

引用格式:

黄鑫浩, 许洪扬, 缪武, 雷佳奇, 金雨珂, 郑井元, 朱凡. 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.

HUANG X H, XU H Y, MIU W, LEI J Q, JIN Y K, ZHENG J Y, ZHU F. Screening the pepper varieties with low cadmium accumulation and high-yield characteristics using principal component analysis and membership function method[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2024, 50(5): 44–53.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



## 基于主成分分析和隶属函数法筛选低镉高产辣椒品种

黄鑫浩<sup>1</sup>, 许洪扬<sup>2</sup>, 缪武<sup>3</sup>, 雷佳奇<sup>1</sup>, 金雨珂<sup>1</sup>, 郑井元<sup>4</sup>, 朱凡<sup>1\*</sup>

(1.湖南农业大学风景园林与艺术设计学院, 湖南 长沙 410128; 2.湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 3.湖南湘研种业有限公司, 湖南 长沙 410139; 4.湖南省农业科学院蔬菜研究所, 湖南 长沙 410125)

**摘要:** 为筛选高产且适合在轻度镉(Cd)污染土壤中种植的低镉积累辣椒品种, 选取了4个辣椒类型(朝天椒、泡椒、牛角椒、线椒)主产区的12个主栽品种为供试材料, 通过Cd污染(2.5 mg/kg)土壤盆栽试验, 研究不同辣椒品种中Cd积累量的差异, 分析Cd对光合色素、光合能力、产量的影响, 并通过主成分分析和隶属函数法从果实Cd含量、产量和光合能力等3个维度筛选具有低Cd、高产特性的辣椒品种。结果表明: 12个辣椒品种中长兴8号和龙福椒的单株产量较高, 分别为402.35、384.26 g, 显著高于其他品种; 供试辣椒品种中根、茎、叶、果中的Cd含量依次降低; 4个类型中, 牛角椒的根和茎富集系数最高, 线椒的根和茎富集系数最低, 朝天椒叶片的富集系数最低; 长兴8号、湘辛28号、龙福椒的果实富集系数较低; 龙福椒鲜果中Cd含量最低, 为0.11 mg/kg; 目标危险系数(THQ)显示, 健康风险较高的是星秀(1.373)、橙艳(1.125)和湘辣699(1.152), 较低的是龙福椒(0.587)、湘辛28号(0.722)、长兴8号(0.732); Cd对叶片CO<sub>2</sub>同化效率的抑制程度高于其对光化学效率的抑制程度, Pn和Fv/Fm共同影响辣椒在Cd处理下的产量, 路径系数分别为0.58和0.37; 通过综合评价, 龙福椒具备低镉高产的特性, 可优先考虑在轻度Cd污染农田推广种植。

**关键词:** 辣椒; 镉; 高产; 主成分分析; 隶属函数法; 富集系数

中图分类号: S641.303

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2024)05-0044-10

## Screening the pepper varieties with low cadmium accumulation and high-yield characteristics using principal component analysis and membership function method

HUANG Xinhao<sup>1</sup>, XU Hongyang<sup>2</sup>, MIU Wu<sup>3</sup>, LEI Jiaqi<sup>1</sup>, JIN Yuke<sup>1</sup>, ZHENG Jingyuan<sup>4</sup>, ZHU Fan<sup>1\*</sup>

(1.College of Landscape Architecture and Art Design, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 2.College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China; 3.Hunan Xiangyan Seed Industry Co. Ltd, Changsha, Hunan 410139, China; 4.Vegetable Institution of Hunan Academy of Agricultural Science, Changsha, Hunan 410125, China)

**Abstract:** To sort out the high-yield pepper varieties with low cadmium(Cd) accumulation suitable for planting in mildly Cd-contaminated soils, the 12 main varieties from major pepper-producing areas were evaluated using pot experiments in Cd-polluted soil. The study examined the differences in Cd accumulation among varieties, the impact of Cd on photosynthesis and yield, and then used principal component analysis and the membership function method to identify varieties with low Cd accumulation and high yield. The results showed that among the 12 pepper varieties,

收稿日期: 2024-03-24

修回日期: 2024-08-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(32072672、32272708); 国家大宗蔬菜产业技术体系(CARS-23); 湖南省自然科学基金青年基金项目(2024JJ6234)

作者简介: 黄鑫浩(1990—), 男, 贵州安顺人, 博士, 讲师, 主要从事植物修复和逆境胁迫下植物光合作用的响应及适应机制研究, 649911354@qq.com; \*通信作者, 朱凡, 博士, 教授, 主要从事植物响应逆境的基本过程和分子机制研究, zf1968001@hau.edu.cn

Changxing 8 and Longfu had higher yields per plant, with respective values of 402.35 g and 384.26 g, significantly higher than other varieties. Cd contents in the roots, stems, leaves and fruits of the 12 peppers varieties decreased sequentially. Among the four types, cowhorn peppers had the highest enrichment coefficients in their roots and stems, while thread peppers had the lowest enrichment coefficients in their roots and stems, and the enrichment coefficient of the leaves were lowest in cluster peppers. Varieties with the relatively low fruit Cd enrichment coefficients included Changxing 8(0.24), Xiangxin 28(0.22), and Longfu(0.24), with Longfu having the lowest Cd content in its fruits. The target hazard quotient(THQ) indicated that the relatively high health risks were associated with Xingxiu(1.373), Chengyan(1.125), and Xiangla 699(1.152), while the relatively low health risks were observed in Longfu(0.587), Xiangxin 28(0.722), and Changxing 8(0.732). The degree of inhibition of leaf CO<sub>2</sub> assimilation efficiency by Cd was greater than that of photochemical efficiency. Pn and Fv/Fm jointly influenced the yield of pepper under Cd treatment, with path coefficients of 0.58 and 0.37, respectively. In conclusion, the Longfu peppers were recommended for cultivation in Cd-contaminated fields due to their optimal parameters on low Cd accumulation and high yield.

**Keywords:** pepper; cadmium; high-yield; principal component analysis; membership function method; enrichment coefficient

镉(Cd)是一种毒性很强的重金属元素,生物毒性大,移动性高<sup>[1]</sup>。在农业生产中,由于化肥、农药的过度使用和污水灌溉,导致农田土壤 Cd 污染。据统计,中国约有 1.4 万 hm<sup>2</sup> 耕地受到 Cd 污染,涉及 11 个省(市)的 25 个地区<sup>[2-3]</sup>。Cd 进入农田土壤后易被农作物吸收,严重影响了农产品的食用安全和人类健康。

辣椒在中国年种植面积稳定在 210 万 hm<sup>2</sup> 以上<sup>[4-5]</sup>。河南、湖南、贵州及云南等辣椒主产区耕地土壤平均 Cd 质量分数达到 0.55 ~ 1.31 mg/kg,高于中国耕地土壤 Cd 平均质量分数(0.27 mg/kg)<sup>[6]</sup>,在 Cd 污染耕地上种植辣椒,势必增加 Cd 含量超标的风险,因此,在中国耕地资源有限的背景下,亟需开展“边生产、边修复”的辣椒 Cd 安全生产技术研究<sup>[7-8]</sup>。基于此,筛选和培育高产稳产且重金属低积累的品种是确保中、轻度 Cd 污染农田安全高产的重要措施<sup>[9]</sup>。近年来,诸多研究对不同辣椒品种的 Cd 积累差异进行了探讨。邵晓庆等<sup>[10]</sup>对 91 个辣椒品种资源进行 Cd 试验,发现不同品种辣椒对 Cd 的吸收和积累差异显著;李桃<sup>[11]</sup>的研究结果表明,Cd 污染下辣椒果实中 Cd 含量的差异主要是由于辣椒各器官对 Cd 的富集、转运及积累特性的不同所致<sup>[12]</sup>,当 Cd 向地上部分的迁移能力较大时,辣椒果实中的 Cd 含量会显著增加<sup>[13-14]</sup>。

Cd 污染在增加辣椒果实食用风险的同时,也抑制了辣椒的生长,影响产量。光合作用是影响作物产量形成的关键因素,植物 90% 以上的生物学产量来自叶片光合作用<sup>[15]</sup>。Cd 通过干扰辣椒叶片的光合作用,降低其农业生产效率<sup>[16]</sup>。目前,科研人员已选育出一些具有低 Cd 积累特性的辣椒品种,而

低 Cd 积累品种筛选与产量相结合的研究鲜见报道。本研究以不同辣椒类型主产区的 12 个主栽品种为供试材料,通过盆栽试验,探讨 12 个辣椒品种的 Cd 富集规律以及 Cd 对光合色素、光合能力、产量的影响,阐明不同品种辣椒富集规律和光合能力的差异,利用主成分分析和隶属函数法从果实 Cd 含量、产量和光合能力等 3 个维度出发,以期筛选出具有低 Cd、高产特性的辣椒品种,为保障农产品质量安全提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试品种

12 个供试辣椒品种由湖南湘研种业有限公司提供,包括朝天椒(橙艳、湘辣 699、星秀),泡椒(美优、大果 99、美玉),牛角椒(湘研 55 号、龙福椒、软皮 2307),线椒(湘辣 14、长兴 8 号、湘辛 28 号)。

### 1.2 供试土壤

供试无 Cd 污染土壤(CK)采自湖南农业大学西门大棚(113.084 3 E, 28.185 3 N)。Cd 污染土(T)采自湖南省湘潭市雨湖区腰港桥园区(112.922 9 E, 27.899 7 N),该区域附近曾有采矿活动,使其农田受到 Cd 污染,经测定土壤总 Cd 质量分数为 2.5 mg/kg(当土壤 pH 为 5.5~6.5,农用地土壤污染风险管制值为 2.0 mg/kg(GB 15618—2018))。收集 CK 和 T 处理的土壤,自然风干后,过筛(孔径 5 mm×5 mm),备用。2 种供试土壤的理化性质及 Cd 质量分数见表 1。

向供试土壤中添加育苗基质,土壤、基质的体积比为 7 : 3,混合充分后再按照质量比 8 000 : 1

向供试土壤添加复合肥(氮、磷、钾的质量分数分别为14%、15%、16%),并额外添加磷肥(100 kg 混合土壤添加 100 g 磷肥),充分搅拌均匀后,待用。

表 1 供试土壤的基本理化性质及 Cd 质量分数

供试土壤	pH	有机碳质量分数/ (g kg <sup>-1</sup> )	有机质质量分数/ (g kg <sup>-1</sup> )	速效磷质量分数/ (mg kg <sup>-1</sup> )	速效钾质量分数/ (mg kg <sup>-1</sup> )	总镉质量分数/ (mg kg <sup>-1</sup> )
CK	4.61	13.71	23.63	256.39	813.07	0.0
T	5.92	36.98	63.75	277.02	860.71	2.5

### 1.3 试验设计

12 个辣椒品种各取颗粒饱满种子 50 粒,温水浸种 6 h,将种子均匀洒布于直径 10 cm 的塑料培养皿中(内铺 2 层滤纸,保持湿润),待种子露白后挑选长势基本一致的发芽种子移入装有育苗基质的 50 孔穴盘中,自然光照,常规浇水育苗。

将前期处理好的土壤装入圆形塑料盆,下口径为 9 cm,上口径为 16.5 cm,高为 11 cm,底部有排水孔,每盆装土 2 kg。

待辣椒苗长至 6 叶 1 心时,挑选长势一致、生长状况良好的幼苗移栽至盆装土壤中,每个品种 CK、T 组各种植 5 株,每盆种植 1 株,共 120 盆。移栽后在大棚中结合天气进行正常栽培管理,于移栽后的第 80 天和第 140 天进行叶绿素含量、气体交换和叶绿素荧光参数的测定,并在第 140 天进行破坏性取样,测定辣椒根、茎、叶、果的 Cd 质量分数。

### 1.4 相关指标测定方法

#### 1.4.1 土壤和辣椒根、茎、叶及果实的 Cd 含量测定

采用王水-高氯酸消解方法测定土壤 Cd 含量;采用硝酸消解方法<sup>[3]</sup>测定辣椒样品中根、茎、叶及果实中的 Cd 质量分数;消解后用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OEC, Perkin Elmer SCIEX)测定样品中的 Cd 浓度。

#### 1.4.2 辣椒对 Cd 的富集与转运

采用生物富集系数(bio-concentration factor, BCF)与转运系数(transport factor, TF)<sup>[3]</sup>分析辣椒对 Cd 的富集与转运。

#### 1.4.3 辣椒果实 Cd 对人体健康风险的评估

参照陈立伟等<sup>[17]</sup>的方法,采用目标危害系数法

(target hazard quotients, THQ)对辣椒果实 Cd 进入人体的健康风险进行评估。

#### 1.4.4 辣椒叶片光合色素含量的测定

每个处理随机选取 9 片完全展开的成熟叶片(去掉叶片主叶脉并剪碎),在暗光条件下称取 0.10 g 叶片鲜样,并浸泡在 20 mL 的 95% 的乙醇中,至叶片完全变白。分别在 665、649、440 nm 波长下,用紫外分光光度计测定提取液的吸光光度值,并按照张宪政<sup>[18]</sup>提供的方法分别计算叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量。

#### 1.4.5 辣椒叶片光合生理参数测定

于晴天 8:00-11:00,在 800~1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$  的光强下诱导 30 min,再使用 LI-6400 光合仪(Licor)测定辣椒植株叶片(每个品种每个处理选 5 株,每株选长势相近的完全展开叶 2 片)的最大净光合速率(Pn)、蒸腾强度(Tr)、气孔导度(Gs)、胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Ci)。光合仪叶室的光照强度设置为 1 000  $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \text{s})$ ,CO<sub>2</sub> 浓度设置为 400  $\mu\text{mol}/\text{mol}$ ,空气温度设置为 25 °C,相对湿度设置为 40%~60%。按照吴克宁等<sup>[19]</sup>的方法计算气孔限制值(Ls)。

#### 1.4.6 辣椒叶片最大光化学效率的测定

每个品种每个处理选 5 株,每株选长势相近的完全展开叶 2 片。对所选叶片进行暗适应处理 30 min 后,使用便携式脉冲调制叶绿素荧光仪 mini-PAM (WALZ)测定辣椒植株叶片的最大光化学效率(Fv/Fm)。

### 1.5 数据分析

采用 SPSS 22.0 进行数据处理与差异性分析;采用 Origin 2021 与 Adobe Photoshop 2020 绘图;采用 R 语言对辣椒各器官的富集与转运系数进行主成分分析和路径系数分析;采用主成分分析和隶属函

数法对低 Cd、高产特性的辣椒品种进行综合评价。

### 1.5.1 主成分分析

对 Cd 含量、光合参数、产量等指标进行相关性分析,得出相关系数矩阵,在此基础上进行主成分分析,采用最大方差法按照主成分特征值大于 1 的标准提取主成分,得到各指标的系数及综合评价值。

### 1.5.2 隶属函数值的计算

按照文献[20]的方法计算隶属函数值,利用隶属函数值对参评指标进行综合评价。

### 1.5.3 权重及综合评价值的计算

按照文献[21]的方法结合综合指标的贡献率求各综合指标的权重及综合评价值(*D* 值)。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉胁迫下不同辣椒品种的产量和各器官的镉含量及 Cd 安全风险评价

从表 2 可以看出,镉胁迫下,12 个辣椒品种中长兴 8 号和龙福椒的单株产量较高,分别为 402.35、384.26 g,显著高于其他品种的;产量最低的品种

是星秀(175.85 g);美优、软皮 2307 和湘辣 14 分别是泡椒、牛角椒和线椒中产量最低的品种。

由表 2 可知,各品种根、茎、叶、果的 Cd 质量分数依次降低。朝天辣、泡椒和牛角椒中根系 Cd 质量分数最高的品种分别是湘辣 699、美优和软皮 2307,是线椒 3 个品种根系 Cd 质量分数的 1.73~2.67 倍;茎的 Cd 质量分数范围为 3.10~6.07 mg/kg,其中星秀的 Cd 质量分数最低,橙艳的 Cd 质量分数最高;叶的 Cd 质量分数为 1.68~7.19 mg/kg,软皮 2307 叶的 Cd 质量分数最高,较星秀的 Cd 质量分数高出 327.98%;鲜果中,3 个朝天椒品种的 Cd 质量分数较高,为 0.21~0.26 mg/kg,龙福椒鲜果的 Cd 质量分数最低,为 0.11 mg/kg,长兴 8 号、大果 99、湘研 55 号和湘辛 28 号的鲜果的 Cd 质量分数均较低,为 0.13~0.14 mg/kg。

大果 99、美玉、湘研 55 号、龙福椒、软皮 2307、湘辣 14、长兴 8 号、湘辛 28 号的 THQ 值均小于 1。其中,目标危害系数较高的是星秀(1.373)、橙艳(1.125)和湘辣 699(1.152),较低的是龙福椒(0.587)、湘辛 28 号(0.722)、长兴 8 号(0.732)。

表 2 镉胁迫下 12 个辣椒品种的单株产量及各器官的镉质量分数

Table 2 Yields per plant and Cd mass fractions in organs of 12 varieties of pepper under Cd stress

类别	品种	单株产量/g	根的 Cd 质量分数/(mg kg <sup>-1</sup> )	茎的 Cd 质量分数/(mg kg <sup>-1</sup> )	叶的 Cd 质量分数/(mg kg <sup>-1</sup> )	干果的 Cd 质量分数/(mg kg <sup>-1</sup> )	鲜果的 Cd 质量分数/(mg kg <sup>-1</sup> )	目标危害系数 (THQ)
朝天椒	橙艳	(216.83±21.35)g	(8.73±2.01)d	(6.07±0.09)a	(2.23±0.06)g	(0.72±0.05)c	(0.21±0.01)bc	1.125
	湘辣 699	(215.94±19.84)h	(14.40±1.53)b	(3.93±0.17)fg	(2.07±0.05)g	(0.76±0.04)bc	(0.21±0.01)bc	1.152
	星秀	(175.85±22.56)i	(6.23±0.53)f	(3.10±0.13)h	(1.68±0.17)h	(0.82±0.06)ab	(0.26±0.02)a	1.373
泡椒	美优	(245.66±30.15)f	(11.72±1.50)c	(4.41±0.16)d	(6.36±0.18)b	(0.85±0.03)a	(0.20±0.01)c	1.050
	大果 99	(246.46±27.36)e	(8.66±0.13)d	(4.38±0.22)d	(4.83±0.19)c	(0.65±0.01)d	(0.14±0.01)e	0.748
	美玉	(369.26±49.18)b	(7.85±0.92)de	(4.13±0.27)ef	(3.98±0.19)de	(0.82±0.02)ab	(0.18±0.01)d	0.948
牛角椒	湘研 55 号	(356.07±22.33)c	(14.09±0.64)b	(4.82±0.25)c	(4.61±0.24)c	(0.73±0.08)c	(0.14±0.02)e	0.754
	龙福椒	(384.26±26.58)a	(11.27±0.93)c	(5.25±0.26)b	(4.14±0.20)d	(0.60±0.07)de	(0.11±0.01)f	0.587
	软皮 2307	(336.55±20.89)c	(16.92±2.14)a	(6.06±0.33)a	(7.19±0.16)a	(0.82±0.03)ab	(0.17±0.01)d	0.926
线椒	湘辣 14	(275.71±30.33)d	(6.45±0.44)f	(3.70±0.15)g	(3.79±0.06)e	(0.63±0.05)d	(0.17±0.01)d	0.932
	长兴 8 号	(402.35±28.94)a	(6.32±0.16)f	(4.18±0.03)de	(2.77±0.11)f	(0.55±0.04)e	(0.14±0.01)e	0.732
	湘辛 28 号	(287.26±19.56)d	(6.79±0.14)ef	(4.01±0.21)ef	(4.69±0.17)c	(0.60±0.04)de	(0.13±0.00)e	0.722

同列不同字母表示辣椒品种间的差异有统计学意义( $P<0.05$ )。

### 2.2 不同辣椒品种镉富集和转运差异分析

Cd 处理下 12 个辣椒品种对 Cd 的富集系数如表 3 所示。不同辣椒品种根、茎、叶、果的富集系数存在差异。除美优、大果 99、软皮 2307、湘辣 14 及湘辛 28 号以外,其他 7 个品种均表现出根、茎、叶、

果 Cd 富集系数依次降低的趋势。在 4 个类型辣椒中,牛角椒的根和茎富集系数较高,线椒的根和茎富集系数较低,朝天椒叶片富集系数最低。湘辣 699、软皮 2307、湘研 55 各器官的富集系数均较高;星秀根、茎、叶的富集系数均较低。不同辣椒品种果实的 Cd

富集系数为 0.22~0.37, 长兴 8 号、湘辛 28 号、龙福椒的果实富集系数较低, 分别为 0.22、0.24、0.24; 美玉的富集系数最高, 为 0.37。

Cd 处理下 12 个辣椒品种对 Cd 的转运系数变化情况如表 3 所示。TF<sub>根茎</sub>、TF<sub>根叶</sub>、TF<sub>根果</sub> 均较高的

辣椒类型是线椒, 朝天椒的 TF<sub>叶果</sub> 在 4 个类型中最高, TF<sub>叶果</sub> 较低的类型是牛角椒。不同辣椒品种对 Cd 的转运系数均表现为 TF<sub>根果</sub> 最低, TF<sub>茎果</sub> 略高于 TF<sub>根果</sub>。牛角椒的 3 个品种的 TF<sub>根果</sub> 低于其他 9 个品种的。TF<sub>茎果</sub> 最低的品种为龙福椒, TF<sub>叶果</sub> 最低的品种为软皮 2307。

表 3 不同品种辣椒对镉的转运系数及富集系数

Table 3 Cd translocation factor and enrichment coefficient of different varieties of pepper

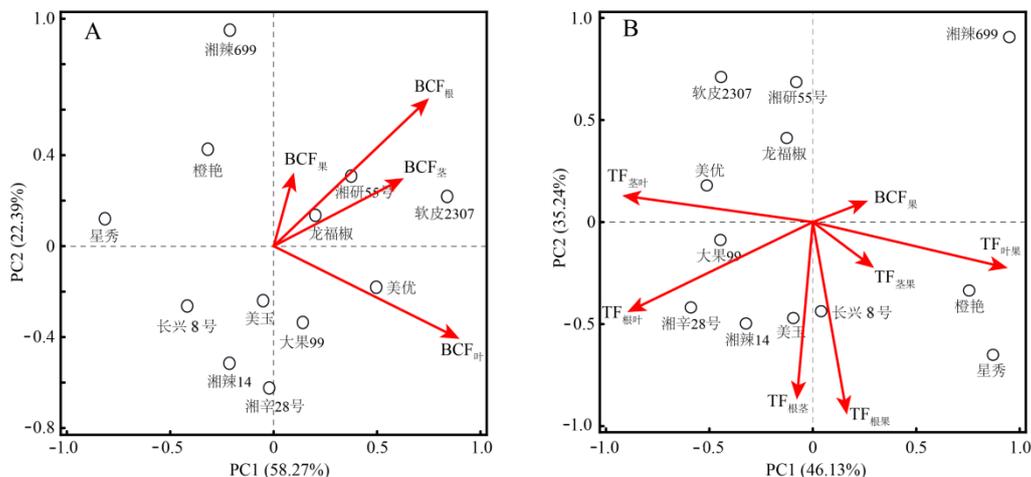
类别	品种	富集系数				转运系数					
		根	茎	叶	果	根茎	根叶	根果	茎叶	茎果	叶果
朝天椒	橙艳	3.49	2.43	0.89	0.29	0.70	0.26	0.08	0.37	0.12	0.32
	湘辣 699	5.76	1.57	0.83	0.30	0.27	0.14	0.05	0.53	0.19	0.37
	星秀	2.49	1.24	0.67	0.36	0.50	0.27	0.13	0.54	0.27	0.49
泡椒	美优	4.69	1.76	2.54	0.34	0.38	0.54	0.07	1.44	0.19	0.13
	大果 99	3.46	1.75	1.93	0.26	0.51	0.56	0.08	1.10	0.15	0.14
	美玉	3.14	1.65	1.59	0.37	0.53	0.51	0.10	0.96	0.20	0.21
牛角椒	湘研 55 号	5.64	1.93	1.84	0.29	0.34	0.33	0.05	0.96	0.15	0.16
	龙福椒	4.51	2.10	1.66	0.24	0.47	0.37	0.05	0.79	0.11	0.15
	软皮 2307	6.77	2.42	2.88	0.33	0.36	0.43	0.05	1.19	0.14	0.11
线椒	湘辣 14	2.58	1.48	1.52	0.25	0.57	0.59	0.10	1.02	0.17	0.17
	长兴 8 号	2.53	1.67	1.11	0.22	0.66	0.44	0.09	0.66	0.13	0.20
	湘辛 28 号	2.72	1.60	1.88	0.24	0.59	0.69	0.09	1.17	0.15	0.13

### 2.3 辣椒果实 Cd 富集系数与其他器官 Cd 富集系数、转运系数的主成分分析

从辣椒各器官 Cd 富集系数的主成分分析结果(图 1-A)可以看出, BCF<sub>果</sub> 和 BCF<sub>根</sub> 距离较近, 表明根的 Cd 富集系数对果实 Cd 含量的富集效应较强, 即根中 Cd 含量对果实 Cd 含量的影响大; BCF<sub>叶</sub> 与

BCF<sub>果</sub> 的距离较远且夹角 > 90°, 表明叶片 Cd 的富集能力对果实 Cd 含量存在负效应。综上所述, 根可能是造成果实 Cd 含量差异的关键器官。

BCF<sub>果</sub> 和 TF<sub>根叶</sub>、TF<sub>根茎</sub>、TF<sub>茎叶</sub> 的距离较远, 表明当根到茎、根到叶、茎到叶转运的 Cd 越多, 果实富集 Cd 含量将会越少。



A 果实中 Cd 的富集系数与各器官 Cd 富集系数的主成分分析; B 果实中 Cd 的富集系数与各器官 Cd 转运系数的主成分分析。

图 1 不同辣椒品种果实 Cd 富集系数与各器官 Cd 富集系数、转运系数的主成分分析

Fig.1 Principal component analysis of cadmium enrichment coefficient in fruit and cadmium enrichment t coefficient, translocation coefficient in various organs of different pepper varieties

2.4 不同辣椒品种光合色素含量

从表 4 可以看出, 12 个辣椒品种中, 软皮 2307 和长兴 8 号的叶绿素 a 含量受 Cd 的影响相对较小; 橙艳和湘辣 14 的叶绿素 a 含量在 T 处理下的下降幅度较大, 与对照相比分别下降了 56.8% 和 57.7%。T 处理下, 湘辣 699、湘研 55 号、龙福椒、软皮 2307

的叶绿素 b 含量均高于 CK 的; 橙艳和湘辣 14 的叶绿素 b 含量较 CK 的分别下降了 59.5% 和 56.5%。除湘辣 699 和龙福椒外, 其余辣椒品种叶片的类胡萝卜素含量均低于 CK 的, 其中, 橙艳和湘辣 14 的类胡萝卜素含量在 T 处理下与对照相比分别下降了 55.8% 和 56.7%。

表 4 镉胁迫下不同品种辣椒叶绿素含量

**Table 4 Chlorophyll content in different varieties of pepper under cadmium stress** mg/g

类别	品种	供试土壤	叶绿素 a 含量	叶绿素 b 含量	叶绿素 a 含量+叶绿素 b 含量	类胡萝卜素含量
朝天椒	橙艳	CK	(2.36±0.21)Aab	(1.16±0.38)Aa	(3.52±0.21)Aa	(0.86±0.06)Aabc
		T	(1.02±0.12)Bef	(0.47±0.04)Bcd	(1.49±0.08)Bef	(0.38±0.02)Bde
	湘辣 699	CK	(2.30±0.33)Aab	(0.37±0.14)Be	(2.67±0.47)Acd	(0.62±0.12)Ade
		T	(1.79±0.07)Ba	(0.78±0.04)Aa	(2.57±0.11)Aa	(0.65±0.09)Aa
	星秀	CK	(2.12±0.28)Abcd	(0.82±0.15)Abc	(2.93±0.43)Abcd	(0.76±0.09)Aabcde
		T	(1.30±0.07)Bde	(0.78±0.44)Aa	(2.09±0.46)Bbcd	(0.52±0.04)Babcd
泡椒	美优	CK	(2.40±0.15)Aab	(0.95±0.12)Aab	(3.35±0.27)Aab	(0.87±0.06)Aab
		T	(1.69±0.22)Babc	(0.61±0.14)Babc	(2.30±0.36)Babc	(0.62±0.10)Babc
	大果 99	CK	(2.11±0.27)Abcd	(0.84±0.10)Abc	(2.95±0.36)Abcd	(0.78±0.06)Aabcd
		T	(1.18±0.20)Bde	(0.48±0.14)Bcd	(1.66±0.34)Bde	(0.42±0.08)Bcde
	美玉	CK	(2.12±0.13)Abc	(0.82±0.08)Abc	(2.94±0.20)Abcd	(0.78±0.06)Aabcd
		T	(1.47±0.11)Bbcd	(0.61±0.08)Aabc	(2.08±0.18)Bbcd	(0.54±0.04)Babcd
牛角椒	湘研 55 号	CK	(2.58±0.22)Aa	(0.55±0.09)Ade	(3.12±0.30)Aabc	(0.94±0.05)Aa
		T	(1.44±0.25)Bcd	(0.59±0.16)Aabc	(2.03±0.39)Bbcd	(0.46±0.10)Bbcde
	龙福椒	CK	(2.14±0.29)Abc	(0.40±0.14)Be	(2.53±0.43)Ade	(0.57±0.11)Ae
		T	(1.82±0.13)Ba	(0.74±0.13)Aab	(2.56±0.26)Aa	(0.61±0.04)Aabc
	软皮 2307	CK	(1.62±0.13)Ae	(0.57±0.05)Ade	(2.18±0.17)Ae	(0.61±0.04)Ade
		T	(1.70±0.13)Aabc	(0.67±0.06)Aabc	(2.37±0.19)Aab	(0.57±0.06)Aabcd
线椒	湘辣 14	CK	(1.82±0.14)Ade	(0.69±0.02)Acd	(2.51±0.13)Ade	(0.67±0.05)Acde
		T	(0.77±0.03)Bf	(0.30±0.03)Bd	(1.07±0.04)Bf	(0.29±0.02)Be
	长兴 8 号	CK	(2.00±0.04)Acd	(0.75±0.04)Abcd	(2.75±0.32)Acd	(0.74±0.01)Abcde
		T	(1.76±0.21)Aab	(0.66±0.11)Aabc	(2.43±0.32)Aab	(0.65±0.11)Aab
	湘辛 28 号	CK	(2.11±0.09)Abcd	(0.89±0.12)Abc	(3.00±0.21)Abc	(0.78±0.04)Aabcd
		T	(1.32±0.11)Bd	(0.52±0.05)Bbcd	(1.85±0.17)Bcde	(0.48±0.05)Babcde

同列不同大写字母表示同一辣椒品种在不同供试土壤中的差异具有统计学意义( $P < 0.05$ ); 同列不同小写字母表示不同辣椒品种在同一供试土壤中的差异具有统计学意义( $P < 0.05$ )。

2.5 不同辣椒品种的气体交换和叶绿素荧光参数

从表 5 可以看出, 泡椒品种美玉的最大净光合速率 Pn 在 T 处理下较对照组显著增加, 牛角椒 3 个品种(湘研 55、龙福椒、软皮 2307)以及朝天椒品种星秀的 Pn 较对照组略有增加, 而其余 7 个品种辣椒的 Pn 在 T 处理下均表现出受抑制的趋势, 其中, 橙艳和湘辣 14 的 Pn 较对照组分别显著下降

23.6% 和 26.2%。Cd 处理下, 橙艳、美玉及湘辛 28 号的光系统 II 最大光化学效率 Fv/Fm 较对照组显著降低, 而其余品种辣椒的 Fv/Fm 受镉胁迫的影响较小。此外, 在镉胁迫下, 不同品种辣椒的 Fv/Fm 存在显著差异, 其中, 湘辣 699、湘研 55 的 Fv/Fm 显著高于其他品种辣椒的 Fv/Fm, 而橙艳、美玉及湘辣 14 的 Fv/Fm 较其他品种辣椒下降率更大。

T 处理下,除橙艳的气孔导度  $G_s$  较对照组略有降低以外,其余品种辣椒的  $G_s$  均较对照组有不同程度的增加,星秀、美优、美玉、湘研 55 号、龙福椒、软皮 2307、长兴 8 号及湘辛 28 号的  $G_s$  较对照组显著增加。Cd 处理下,长兴 8 号的气孔限制值较对照组显著增加,大部分品种辣椒的气孔限制值较对照的低,尤其是星秀、美优、美玉、湘研 55 号及湘辣 14 的气孔限制值较对照组的显著下降。

除了湘辣 14 和橙艳外,其余品种辣椒在 Cd 处理下的蒸腾速率均高于对照组的。长兴 8 号的胞间  $CO_2$  浓度在 T 处理下较对照组显著降低,而星秀、美优、美玉、湘研 55 号及湘辣 14 的胞间  $CO_2$  浓度在 T 处理下较对照组的显著增加,长兴 8 号的  $C_i$  在 T 处理下显著降低,而其余品种辣椒的胞间  $CO_2$  浓度在 T 处理下与对照组相比没有明显差异。

表 5 镉胁迫下不同品种辣椒的气体交换参数及最大光化学效率

Table 5 Gas exchange parameters and maximum photochemical efficiency of different varieties of pepper under cadmium stress.

类别	品种	供试土壤	最大净光合速率/ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ )	蒸腾速率/ ( $\text{g m}^{-2}\text{ h}^{-1}$ )	气孔导度/ ( $\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ )	胞间 $CO_2$ 浓度/ ( $\mu\text{mol m}^{-2}\text{ s}^{-1}$ )	气孔限制值	最大光化学效率
朝天椒	橙艳	CK	(13.12±2.36)Aab	(2.59±1.56)Acde	(0.16±0.04)Acd	(298.04±10.88)Abcd	(0.25±0.03)Aef	(0.81±0.01)Aabc
		T	(10.02±1.13)Bef	(2.59±0.33)Af	(0.19±0.05)Af	(307.35±9.94)Aabcd	(0.23±0.02)Adefg	(0.78±0.01)Bde
	湘辣 699	CK	(12.26±1.37)Abc	(3.25±0.57)Babcd	(0.17±0.04)Abcd	(281.47±16.95)Aef	(0.30±0.04)Abcd	(0.81±0.01)Aabc
		T	(11.28±1.61)Acdef	(6.04±1.30)Ab	(0.21±0.07)Aef	(274.35±12.46)Ag	(0.31±0.03)Aa	(0.82±0.01)Aab
	星秀	CK	(14.15±1.85)Aa	(4.00±1.40)Aab	(0.22±0.07)Bab	(291.16±7.32)Bcde	(0.27±0.04)Adef	(0.80±0.01)Abc
		T	(14.83±2.63)Aa	(4.63±0.91)Ad	(0.29±0.08)Ac	(312.83±12.04)Aab	(0.22±0.03)Bfg	(0.81±0.01)Abcd
泡椒	美优	CK	(10.91±1.93)Acd	(2.12±0.95)Bef	(0.14±0.03)Bd	(274.53±11.66)Bfg	(0.31±0.03)Aab	(0.81±0.01)Aabc
		T	(9.86±1.44)Af	(7.89±1.47)Aa	(0.26±0.07)Acde	(297.62±14.42)Ade	(0.26±0.04)Bcd	(0.81±0.01)Abcd
	大果 99	CK	(12.94±1.48)Aab	(2.53±0.35)Acde	(0.21±0.04)Aabc	(310.43±12.84)Aab	(0.22±0.03)Agh	(0.81±0.01)Aabc
		T	(12.18±1.97)Abcde	(3.68±0.66)Aef	(0.23±0.05)Aef	(318.16±7.68)Aa	(0.20±0.02)Ag	(0.80±0.01)Acde
	美玉	CK	(9.84±1.35)Bd	(1.48±0.99)Af	(0.12±0.02)Bd	(278.86±13.94)Bef	(0.30±0.03)Abc	(0.80±0.01)Abc
		T	(13.33±1.62)Aab	(2.15±1.51)Af	(0.46±0.09)Aa	(311.11±7.96)Aabc	(0.22±0.02)Befg	(0.79±0.01)Be
牛角椒	湘研 55 号	CK	(10.93±1.30)Acd	(3.27±1.37)Babcd	(0.13±0.03)Bd	(263.93±28.86)Bg	(0.34±0.07)Aa	(0.81±0.01)Aabc
		T	(12.09±2.37)Abcde	(5.46±1.54)Abc	(0.25±0.06)Acde	(283.91±14.23)Afg	(0.29±0.04)Bab	(0.82±0.01)Aa
	龙福椒	CK	(11.83±1.59)Abc	(3.44±2.25)Babc	(0.17±0.05)Bbcd	(283.90±22.24)Aef	(0.29±0.06)Abcd	(0.82±0.01)Aa
		T	(12.63±2.06)Abcd	(7.91±2.08)Aa	(0.28±0.09)Acd	(282.98±15.35)Afg	(0.29±0.04)Aab	(0.80±0.01)Acde
	软皮 2307	CK	(12.90±1.20)Aab	(3.08±0.44)Abcd	(0.20±0.04)Bbc	(301.24±17.79)Aabc	(0.25±0.04)Afg	(0.81±0.01)Aabc
		T	(13.30±2.09)Aab	(3.23±1.11)Aef	(0.38±0.11)Ab	(301.67±5.59)Abcde	(0.25±0.01)Acdef	(0.81±0.01)Abcd
线椒	湘辣 14	CK	(13.89±2.05)Aa	(4.11±0.80)Aa	(0.20±0.05)Abc	(285.87±18.08)Bdef	(0.29±0.05)Abcd	(0.80±0.01)Abc
		T	(10.25±3.88)Bef	(3.86±0.90)Ae	(0.23±0.08)Adef	(304.06±15.33)Abc	(0.24±0.04)Bcdef	(0.79±0.01)Ae
	长兴 8 号	CK	(12.08±2.13)Abc	(1.40±0.42)Bf	(0.16±0.06)Acd	(298.33±10.02)Abcd	(0.25±0.03)Befg	(0.80±0.01)Abc
		T	(11.77±1.68)Abcde	(5.92±1.00)Ab	(0.22±0.06)Aef	(274.47±13.51)Bg	(0.31±0.03)Aa	(0.81±0.01)Aabc
	湘辛 28 号	CK	(13.16±1.89)Aab	(3.99±1.47)Aab	(0.20±0.07)Aabc	(290.18±21.92)Acde	(0.28±0.05)Acde	(0.82±0.01)Aa
		T	(10.76±1.35)Bef	(4.08±1.43)Ade	(0.27±0.07)Acde	(292.09±17.52)Aef	(0.27±0.04)Abc	(0.80±0.01)Bcde

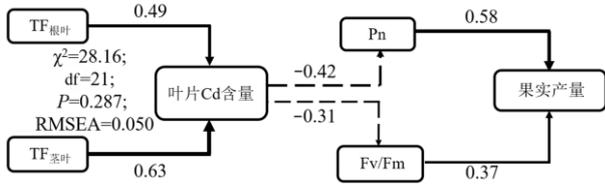
不同大写字母表示同一辣椒品种在不同供试土壤中的差异有统计学意义( $P<0.05$ );不同小写字母表示不同辣椒品种在同一供试土壤中的差异有统计学意义( $P<0.05$ )

## 2.6 不同辣椒品种产量与叶片 Cd 富集转运、光合性能的关系

利用结构方程模型对产量与叶片 Cd 富集转运、光合性能的关系进行研究,模型拟合后适配度指标卡方值( $\chi^2$ )为 28.16( $P=0.287$ ),近似误差均方根(RMSEA)为 0.050,说明该模型与假设模型符合程

度较高。路径分析结果(图 2)显示,  $TF_{根叶}$  和  $TF_{茎叶}$  影响叶片 Cd 含量的路径系数分别为 0.49、0.63,均有明显正向影响,Cd 从茎到叶的分配较大程度地影响叶片 Cd 含量。当叶片 Cd 含量到一定程度时会影响辣椒叶片的光合能力和光化学效率,由路径系数可知,Cd 对叶片光合能力的抑制程度高于对光化学

效率的抑制。Pn 和 Fv/Fm 共同影响辣椒在 Cd 处理下的产量，路径系数分别为 0.58 和 0.37。



实线表示 2 个变量之间呈正相关,虚线表示 2 个变量之间呈负相关;线上数字为路径系数。

图 2 辣椒品种产量与叶片 Cd 富集转运、光合性能的关系  
Fig.2 Relationship between yield of tested pepper varieties and leaf Cd accumulation and translocation, as well as photosynthetic performance

### 2.7 Cd 处理下低 Cd 高产辣椒品种的筛选

对 12 个品种的 Cd 含量、产量和光合参数等指

标进行主成分分析,在特征值大于 1 的提取标准下共提取到 3 个主成分,各主成分的贡献率分别为 54.99%、26.48% 和 18.33%,累计贡献率达到 98.20%。再根据贡献率计算出权重,进而计算出隶属函数值,得到不同辣椒品种低 Cd 高产综合评价(D 值)。D 值越大,表明低 Cd、高产的优势越突出。由表 6 可知,龙福椒的 D 值最大,表明其低 Cd、高产的能力最强。本研究通过综合评价得出 12 个辣椒品种的低 Cd 高产能力由强到弱依次为龙福椒、湘辛 28 号、长兴 8 号、湘研 55 号、美玉、湘辣 14、软皮 2307、大果 99、美优、橙艳、湘辣 699、星秀。其中,龙福椒是具备低 Cd 积累且高产特性的辣椒品种。

表 6 Cd 胁迫下低 Cd 高产辣椒品种的综合评价

Table 6 Comprehensive evaluation of low cadmium high-yield pepper varieties under cadmium stress

种类	品种	综合指标值			综合指标的隶属函数值			D 值	排序
		C1	C2	C3	M1	M2	M3		
朝天椒	橙艳	1.29	1.65	4.92	0.36	0.04	0.14	0.23	10
	湘辣 699	-6.86	-0.09	3.38	0.22	0.03	0.18	0.16	11
	星秀	-3.52	17.56	-2.25	0.16	0.02	0.26	0.13	12
泡椒	美优	8.02	3.17	4.75	0.47	0.11	0.21	0.32	9
	大果 99	1.61	3.73	-2.50	0.44	0.35	0.16	0.36	8
	美玉	1.33	-2.41	-1.07	0.55	0.49	0.11	0.44	5
牛角椒	湘研 55 号	0.29	-4.09	-0.77	0.56	0.41	0.99	0.59	4
	龙福椒	-0.44	-5.33	4.86	0.89	0.38	0.80	0.72	1
	软皮 2307	-2.54	-2.77	-2.37	0.51	0.35	0.12	0.39	7
线椒	湘辣 14	3.17	-0.64	-6.94	0.55	0.31	0.15	0.40	6
	长兴 8 号	-3.20	-8.37	-1.77	0.63	1.00	0.31	0.65	3
	湘辛 28 号	0.87	-2.39	-0.20	0.76	0.78	0.27	0.66	2
	贡献率	56.20	17.92	11.50					
	权重				0.54	0.26	0.18		

### 3 结论与讨论

在保证农产品质量安全的前提下筛选 Cd 低积累品种,是近年来农业生产中合理利用重金属污染耕地的重要方向<sup>[22]</sup>。通常采用果实 Cd 含量、转移系数或富集系数等材料进行初步分析,以评价作物的 Cd 积累特性。本研究通过对 12 个辣椒品种不同器官 Cd 富集转运特征、果实产量、光合特性进行分析,最终筛选出 1 个具备低 Cd 积累和高产特性的品种——龙福椒。

土壤中的 Cd<sup>2+</sup>通过共质体途径进入根系,在蒸腾拉力的作用下经过跨膜转运和木质部转载逐渐向上运输<sup>[23]</sup>。辣椒果实中 Cd 的含量与不同器官对 Cd 的吸收转运有关。本研究中,辣椒根部的 Cd 富集系数最大,由于根到果实的转运系数最小,同时辣椒茎和叶的富集系数较高,说明辣椒吸收的 Cd 大部分转运、富集在茎和叶片中。蔡秋玲等<sup>[24]</sup>、ZHANG 等<sup>[25]</sup>和邓婷等<sup>[26]</sup>通过田间试验分别对水稻、小麦和玉米进行了研究,认为根部向地上部的转运过程是影响水稻、小麦和玉米 Cd 积累的关键

因素。本研究主成分分析结果表明,辣椒叶对 Cd 的吸收及 Cd 从根到叶的转运过程并不是影响辣椒果实 Cd 积累差异的关键因素,而根对 Cd 的吸收及根到果实的转运过程是影响辣椒果实 Cd 积累差异的关键因素之一。Cd 从根部通过茎转运到果实,茎和叶中 Cd 向果实再分配的过程造成了不同品种辣椒果实中 Cd 含量的差异。本研究中,长兴 8 号、龙福椒、湘辛 28 号是果实 Cd 积累较低品种,橙艳、湘辣 699、星秀是果实 Cd 积累较高的品种。通过对果实 Cd 积累较低和转移系数较高的品种进行比较,发现果实 Cd 积累较低品种,茎到叶的 Cd 转运系数较高,而茎到果和叶到果的 Cd 转运系数则较低,表明低 Cd 积累品种茎中的 Cd 在向上运输过程中较多地被固定在茎和叶中,从而减少了 Cd 向果实的迁移。这与鄢小龙等<sup>[27]</sup>、ZHANG 等<sup>[25]</sup>在对玉米和小麦籽粒 Cd 含量的研究结果相似。这表明后期可通过外源药理学或分子生物学的方法,阻隔茎叶中 Cd 向果实的转运,进而达到降低果实 Cd 含量的目的。

叶绿素是植物光合作用的重要参数,其含量直接影响着植物的光合速率。当土壤中的 Cd 被辣椒的根系吸收后,根和茎的 Cd 会转移到叶片中,一旦 Cd<sup>2+</sup>代替叶绿素四吡咯环中的 Mg<sup>2+</sup>或取代 Fe<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>等离子,或与叶绿体蛋白质的巯基(-SH)结合,就会使叶绿素含量降低<sup>[26-27]</sup>。结构方程模型分析结果显示,Cd 从根到叶片和茎到叶片的转运,显著影响叶片的 Cd 含量,其中茎到叶的转运对叶片 Cd 含量的影响较大。本研究中,当 Cd 被转运到叶片中后,12 个辣椒品种的光合色素含量均受到了不同程度的抑制。本研究中,美玉、湘研 55 号、龙福椒、软皮 2307、星秀的 Pn 较对照组略有升高,结合 Gs 可以看出,Cd 处理下这几个品种的气孔导度高于对照组的,进而促进了 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 在气孔中的交换过程,使得 Pn 升高。可能是由于在 Cd 处理下这 5 个品种为防止光系统中激发能的过剩,加快了光化学猝灭过程,从而将更多的激发能分配到了光化学过程中<sup>[28]</sup>。其余 7 个品种的 Pn 在 Cd 处理下均表现出受抑制的趋势,其中橙艳和湘辣 14 与对照相比下降率最大,这与光合色素分析的结果一致。与此同时,对辣椒光系统 II 的最大光化学效率的研究发现,Cd 处理对湘辣 699、湘研 55 号的 Fv/Fm

影响较小,对橙艳、美玉及湘辣 14 的 Fv/Fm 的影响较大。总而言之,在 Cd 处理下橙艳和湘辣 14 的光合性能是 12 个品种中表现较差的品种,这也是造成这 2 个品种产量较低的原因之一;相反,湘研 55 号、龙福椒、软皮 2307 由于在 Cd 处理下维持了较高的光合能力,其果实产量相对较高。另外,Cd 对叶片的 CO<sub>2</sub> 同化能力和光化学效率均有抑制作用,由路径系数可知,辣椒叶片 Cd 含量对辣椒 CO<sub>2</sub> 同化能力的抑制程度高于对光化学效率的抑制程度。Cd 处理会抑制原初光化学反应和气体交换过程,进而导致产量下降<sup>[28]</sup>,通过结构方程模型分析结果可知,辣椒的 Pn 对产量的形成有较大的影响,因此,在后期筛选高产品种时,可以更多地关注光合速率较高的品种。

#### 参考文献:

- [1] ZHOU J, QI A G, WANG T, et al. Exogenous chelating agents influence growth, physiological characteristics and cell ultrastructure of *Robinia pseudoacacia* seedlings under lead-cadmium stress[J]. *Tree Physiology*, 2024, 44(1): tpad120.
- [2] REN S Y, SONG C Q, YE S J, et al. The spatiotemporal variation in heavy metals in China's farmland soil over the past 20 years: a meta-analysis[J]. *The Science of the Total Environment*, 2022, 806(Pt 2): 150322.
- [3] 彭秋, 李桃, 徐卫红, 等. 不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异[J]. *环境科学*, 2019, 40(7): 3347-3354.
- [4] 邹学校, 朱凡. 辣椒传入中国的途径与传播路径[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 46(6): 629-640.
- [5] 邹学校, 胡博文, 熊程, 等. 中国辣椒育种 60 年回顾与展望[J]. *园艺学报*, 2022, 49(10): 2099-2118.
- [6] LIU H, TU Y, GU X, et al. Accumulative effect and environmental impact of cadmium in farmland soil with high background of geochemistry[J]. *Journal of Agricultural Biological And Environmental Statistics*, 2018, 37(5): 1-5.
- [7] 刘娜. 重金属汞/镉低积累小麦品种筛选及根际微环境研究[D]. 济南: 山东大学, 2020.
- [8] 陈志琴, 刘奇珍, 张世君, 等. 基于定量评价方法研究不同水稻品种的镉积累差异[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(1): 123-130.
- [9] PERRIER F, YAN B, CANDAUDAP F, et al. Variability in grain cadmium concentration among durum wheat cultivars: impact of aboveground biomass partitioning[J].

- Plant and Soil, 2016, 404(1): 307–320.
- [10] 邵晓庆, 贺章咪, 徐卫红. 辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较[J]. 环境科学, 2021, 42(2): 952–959.
- [11] 李桃. 不同品种辣椒镉胁迫耐受机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [12] XU W H, HUANG H, LI X D, et al. CaHMA1 promotes Cd accumulation in pepper fruit[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 460: 132480.
- [13] XIN J L, HUANG B F, DAI H W, et al. Roles of rhizosphere and root-derived organic acids in Cd accumulation by two hot pepper cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(8): 6254–6261.
- [14] LUO K, LIU H Y, LIU Q D, et al. Cadmium accumulation and migration of 3 peppers varieties in yellow and limestone soils under geochemical anomaly[J]. Environmental Technology, 2022, 43(1): 10–20.
- [15] 欧昆鹏, 王学礼, 王艳, 等. 氮、磷、钾肥不同配比对粉葛光合特性及产量和品质的影响[J]. 作物杂志, 2024(3): 216–222.
- [16] TODORENKO D A, HAO J R, SLATINSKAYA O V, et al. Effect of thiamethoxam on photosynthetic pigments and primary photosynthetic reactions in two maize genotypes(*Zea mays*)[J]. Functional Plant Biology, 2021, 48(10): 994–1004.
- [17] 陈立伟, 杨文弢, 周航, 等. 土壤调理剂对土壤–水稻系统 Cd、Zn 迁移累积的影响及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2018, 38(4): 1635–1641.
- [18] 张宪政. 植物叶绿素含量测定—丙酮乙醇混合液法[J]. 辽宁农业科学, 1986(3): 26–28.
- [19] 吴克宁, 赵彦锋, 吕巧灵, 等. 潮土区灌浆水和施磷对冬小麦光合作用和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 428–434.
- [20] 韩艳红, 杨海棠, 胡延岭, 等. 基于隶属函数法对大粒高油花生品种品质的综合评价[J/OL]. 花生学报, 1–5[2024–08–27]. <https://doi.org/10.14001/j.issn.1002-4093.2024.03.010>.
- [21] 刘梦霜, 郭海峰, 陈观秀, 等. 不同水稻品种对 NaCl 胁迫的生理响应及耐盐性评价[J]. 热带作物学报, 2023, 44(2): 326–336.
- [22] 刘峰, 弭宝彬, 魏瑞敏, 等. 基于聚类分析法筛选低镉累积辣椒品种[J]. 园艺学报, 2017, 44(5): 979–986.
- [23] ZHENG Z Y, LI P, XIONG Z Q, et al. Integrated network analysis reveals that exogenous cadmium-tolerant endophytic bacteria inhibit cadmium uptake in rice[J]. Chemosphere, 2022, 301: 134655.
- [24] 蔡秋玲, 林大松, 王果, 等. 不同类型水稻镉富集与转运能力的差异分析[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(6): 1028–1033.
- [25] ZHANG L G, ZHANG C, DU B Y, et al. Effects of node restriction on cadmium accumulation in eight Chinese wheat(*Triticum turgidum*) cultivars[J]. Science of the Total Environment, 2020, 725: 138358.
- [26] 邓婷, 卢维盛, 吴家龙, 等. 不同玉米品种对土壤镉富集和转运的差异研究[J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(4): 33–39.
- [27] 鄢小龙, 马宏朕, 李元, 等. 铅锌矿区周边农田 Cd、Pb 低累积玉米品种筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(6): 1076–1083.
- [28] DOBRIKOVA A G, APOSTOLOVA E L, HANĆ A, et al. Cadmium toxicity in *Salvia sclarea* L. an integrative response of element uptake, oxidative stress markers, leaf structure and photosynthesis[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2021, 209: 111851.

责任编辑: 毛友纯  
英文编辑: 柳 正