

李姗姗,王涛,孙雷,等. 镉胁迫对谷子、糜子和高粱幼苗形态及生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2026, 54(2): 120-128.  
LI S S, WANG T, SUN L, et al. Effects of cadmium stress on morphological and physiological characteristics of foxtail millet, broom-corn millet and sorghum seedlings[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2026, 54(2): 120-128.

doi:10.26942/j.cnki.issn.1002-2481.2026.02.15

## 镉胁迫对谷子、糜子和高粱幼苗形态及生理特性的影响

李姗姗<sup>1</sup>, 王涛<sup>1,2</sup>, 孙雷<sup>1</sup>, 孙启辉<sup>1</sup>, 王小林<sup>1,3</sup>,

郭亚宁<sup>1,3</sup>, 罗艳<sup>1</sup>, 张静<sup>1,3</sup>, 张盼盼<sup>1,3</sup>

(1. 榆林学院 现代农学院, 陕西 榆林 719000; 2. 榆林学院 陕西省陕北矿区生态修复重点实验室, 陕西 榆林 719000;  
3. 榆林学院 陕西省陕北旱区作物节水工程技术研究中心, 陕西 榆林 719000)

**摘要:**为探究谷子、糜子和高粱幼苗对镉胁迫的响应,以晋谷 21 号(谷子)、榆糜 2 号(糜子)和辽杂 27 号(高粱)为材料,进行 0、300  $\mu\text{mol/L}$   $\text{CdCl}_2$  胁迫处理,并测定株高、地上部干质量、地下部干质量、光合性能和叶绿体荧光特性等指标,结合主成分分析和隶属函数法综合评价 3 种作物的耐镉性强弱。结果表明,镉胁迫显著抑制谷子、糜子和高粱的生长发育,且抑制效应存在种间差异。其中,镉胁迫对谷子的株高抑制最显著,对糜子地上部干质量和地下部干质量的抑制作用最强,而对高粱的株高、地上部干质量和地下部干质量的抑制作用较弱。镉胁迫降低了 3 种作物的叶片光合性能,其中,镉胁迫处理 5 d 后,高粱的净光合速率(Pn)的降低幅度小于谷子和糜子。镉胁迫对 3 种作物的叶绿素荧光参数影响存在差异,其中,镉胁迫降低了糜子和谷子的叶片初始荧光( $F_0$ )、最大荧光产量( $F_m$ )、实际光化学效率( $\Phi\text{PS II}$ )和非光化学淬灭系数(qN);而高粱的叶片初始荧光、最大荧光产量、实际光化学效率和非光化学淬灭系数较对照分别增加了 39.66%、25.44%、12.40%、56.25%,且其最大光化学效率降低幅度小于谷子和糜子。对 3 种作物的 12 个测定指标进行主成分分析发现,地下部干质量、株高、 $F_0$ 、 $F_m$ 、蒸腾速率这 5 个指标可作为 3 种作物耐镉性评价的关键指标。隶属函数分析结果显示,3 种作物的耐镉性由强至弱依次为高粱>谷子>糜子。综上,镉胁迫下辽杂 27 号能维持较高的光合效率,并通过增强热耗散以适应镉胁迫环境,从而保持较高的生长特性,因此,辽杂 27 号更适合在陕北镉污染区进行种植。

**关键词:** 谷子; 糜子; 高粱; 主成分分析; 隶属函数法; 镉胁迫; 光合特性; 叶绿素荧光特性

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1002-2481(2026)02-0120-09

## Effects of Cadmium Stress on Morphological and Physiological Characteristics of Foxtail Millet, Broomcorn Millet and Sorghum Seedlings

LI Shanshan<sup>1</sup>, WANG Tao<sup>1,2</sup>, SUN Lei<sup>1</sup>, SUN Qihui<sup>1</sup>, WANG Xiaolin<sup>1,3</sup>,

GUO Yaning<sup>1,3</sup>, LUO Yan<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1,3</sup>, ZHANG Panpan<sup>1,3</sup>

(1. College of Advanced Agricultural Sciences, Yulin University, Yulin 719000, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Ecological Restoration in Northern Shaanxi Mining Area, Yulin University, Yulin 719000, China; 3. Shaanxi Northern Dryland Crop Water-Saving Engineering Technology Research Center, Yulin University, Yulin 719000, China)

**Abstract:** To investigate the responses of foxtail millet, broomcorn millet, and sorghum seedlings to cadmium stress, in this study, Jingu 21(foxtail millet), Yumi 2(broomcorn millet), and Liaozha 27(sorghum) were used as experimental materials. These plants were subjected to cadmium stress treatments with 0 and 300  $\mu\text{mol/L}$   $\text{CdCl}_2$ . Indicators such as plant height, aboveground dry weight, underground dry weight, photosynthetic characteristics, and chloroplast fluorescence characteristics

收稿日期: 2025-06-12

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室项目(23JS068); 第二批“榆林科技之光”中青年领军人才项目(2024-KJZG-ZQNLJ-008); 陕西省科技厅重点研发计划(2025NC-YBXM-024); 陕西省农业农村厅科技创新驱动项目(2022NYT01); 陕西省小杂粮产业技术体系(H2023060239); 府谷县旱作农业科技成果转移转化示范基地建设项目(H2023060049)

作者简介: 李姗姗, 在读硕士, 研究方向: 作物与耕作栽培, E-mail: 2363967772@qq.com。李姗姗、王涛为同等贡献作者

通信作者: 张盼盼, 教授, 博士, 主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究, E-mail: zpp35@163.com

were measured. The cadmium tolerance of the three crops was comprehensively evaluated using principal component analysis and membership function method. The results showed that cadmium stress significantly inhibited the growth and development of foxtail millet, broomcorn millet, and sorghum, with interspecific differences in the inhibitory effects. Among them, cadmium stress had the most significant inhibitory effect on the plant height of foxtail millet, the strongest inhibitory effect on the aboveground dry weight and underground dry weight of broomcorn millet, and a weaker inhibitory effect on the plant height, aboveground dry weight and underground dry weight of sorghum. Cadmium stress reduced the leaf photosynthetic performance of the three crops. After 5 days of cadmium stress treatment, the decrease in net photosynthetic rate(Pn) of sorghum was smaller than that of foxtail millet and broomcorn millet. Cadmium stress had varying effects on the chlorophyll fluorescence parameters of the three crops. It reduced the initial fluorescence( $F_0$ ), maximum fluorescence yield( $F_m$ ), actual photochemical efficiency( $\Phi PS II$ ), and non-photochemical quenching coefficient(qN) of broomcorn millet and foxtail millet leaves. In contrast, the initial fluorescence, maximum fluorescence yield, actual photochemical efficiency, and non-photochemical quenching coefficient of sorghum leaves increased by 39.66%, 25.44%, 12.40%, and 56.25%, respectively, compared to the control, and the decrease in maximum photochemical efficiency( $F_v/F_m$ ) was smaller than that of foxtail millet and broomcorn millet. Principal component analysis of 12 indicators from the three crops revealed that the five indicators including underground dry weight, plant height,  $F_0$ ,  $F_m$ , and transpiration rate(Tr) could be used as the key indicators to evaluate the cadmium tolerance of the three crops. Membership function analysis results indicated that the cadmium tolerance of the three crops, from strongest to weakest, was as follows: sorghum > foxtail millet > broomcorn millet. In summary, under cadmium stress, Liaoza 27 maintained higher photosynthetic efficiency and adapted to the cadmium-stressed environment by enhancing thermal dissipation, thereby preserving better growth characteristics. Therefore, Liaoza 27 was more suitable for cultivation in cadmium-polluted areas of northern Shaanxi.

**Keywords:** foxtail millet; broomcorn millet; sorghum; principal component analysis; membership function method; cadmium stress; photosynthetic characteristics; chlorophyll fluorescence characteristics

近年来,随着我国工业的快速发展,金属矿山的开采、冶炼等活动导致周边地区土壤重金属含量超标,部分耕地的重金属污染对生态环境、食品安全、人体健康及农业发展存在严重威胁<sup>[1-2]</sup>。据统计,我国受到重金属工业污染的耕地面积已超过2 500 hm<sup>2</sup><sup>[3]</sup>,占总耕地面积的1/6,涉及11个省市的25个地区,部分地区的污染问题尤为突出<sup>[4]</sup>。根系对镉等重金属有高富集能力<sup>[5]</sup>,当土壤中重金属浓度较高时,植物根系对重金属的富集作用会受到抑制,同时其生长发育也会随之受到影响<sup>[6]</sup>,重金属破坏植物光合结构,降低叶绿素含量、抑制碳代谢酶活性从而降低植物的光合速率、PS II和PS I光化学效率等<sup>[7-11]</sup>。

目前,已有研究针对重金属对植物种子萌发、生理生化等方面的影响进行了深入研究,并发现特定浓度的重金属胁迫会严重抑制植物的生长发育<sup>[12]</sup>。种子萌发和幼苗生长是植物生命周期中对周围环境最为敏感的阶段,这一阶段的生长发育状况对植物后期的生长发育有着决定性的作用<sup>[13]</sup>。卫丹丹等<sup>[14]</sup>研究发现,镉对豆科植物赤豆的PS II反应中心、供体侧和受体侧都造成严重伤害,降低了其光合能力。王亚丽<sup>[15]</sup>研究表明,镉胁迫下,谷子幼苗生长受到明显抑制,根和地上组织中的膜

脂过氧化损伤产物均有所积累,且镉对根部的毒性作用强于地上组织。李娟等<sup>[16]</sup>研究表明,镉胁迫下,谷子幼苗可溶性糖和可溶性蛋白含量降低,ATPase活性受到抑制。因此,研究镉对作物幼苗生长发育的影响,并筛选耐镉性较强的作物,是合理利用镉污染土壤进行适应性种植的关键。

榆林地区是我国小杂粮主产区之一,有着悠久的种植历史<sup>[17]</sup>。该地区生产的小杂粮不仅口感醇香、品质优良,而且营养成分丰富<sup>[18]</sup>。糜子是陕北地区重要的粮食作物<sup>[19]</sup>,其种植面积和产量均居全省首位和全国第二位,产业发展前景广阔<sup>[20]</sup>。谷子在榆林地区拥有悠久的种植历史,品种繁多,具有耐逆性强、适应性广等特性<sup>[21]</sup>。高粱作为陕西北部主要的农作物之一,具有光合效率高、杂种优势强、抗逆性强以及适应性广等特点<sup>[22]</sup>。然而,榆林煤矿区的镉污染问题严重,急需对该区特色杂粮作物谷子、糜子和高粱的耐镉性进行系统研究。因此,本研究通过分析镉胁迫下谷子、糜子、高粱幼苗的形态特征、叶绿素含量、叶片光合和叶绿体荧光参数等指标,阐明镉胁迫对不同禾谷类作物幼苗生长及生理生化特性的影响,进而为重金属镉对糜子、高粱和谷子的毒害效应提供早期预警,以及为镉污染土壤的作物选择与种植提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试材料晋谷 21 号、榆糜 2 号和辽杂 27 号由西北农林科技大学国家小宗粮豆研究中心提供。CdCl<sub>2</sub> 购自天津市科密欧化学试剂有限公司。

### 1.2 试验设计

晋谷 21 号、榆糜 2 号、辽杂 27 号分别设置对照 0 μmol/L CdCl<sub>2</sub> (CK1、CK2、CK3) 和 300 μmol/L CdCl<sub>2</sub> (T1、T2、T3), 共 6 个处理。每个处理 64 株幼苗, 2 组重复。选取 500 粒大小一致的健康种子, 用 10% 次氯酸钠消毒 15 min, 蒸馏水冲洗 4~5 次, 25 °C 黑暗下蒸馏水浸泡 24 h, 再用蒸馏水冲洗 3~4 次, 吸干种子表面的水分, 置于不透光培养盒中, 均匀摆开, 每天喷洒少量水分, 进行催芽。催芽 3 d 后, 待地上部长至 3~5 cm 时, 将其定植在泡沫板上, 置于规格为 0.6 m×0.3 m×0.1 m 的培养盒中, 每盒 64 株幼苗, 2 组重复; 培养盒中添加 3 L 1/2 Hogland 营养液<sup>[23]</sup>, 置于光照培养箱中, 培养条件为昼夜温度为 25 °C/18 °C, 光周期为 16 h 光照/8 h 黑暗, 光照强度为 3 000 lx; 7 d 后培养盒内添加全 Hogland 营养液, 每 7 d 更换一次营养液; 当幼苗长到三叶一心期时, 分别用含有 0、300 μmol/L CdCl<sub>2</sub> 的 Hogland 营养液继续培养, 其他条件保持不变<sup>[5]</sup>。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 幼苗形态指标测定 镉胁迫 5 d 后, 每个处理随机抽取 6 株, 测定幼苗株高; 每个处理再随机抽取 6 株, 蒸馏水冲洗干净后, 置于 105 °C 烘箱中杀青 30 min, 80 °C 下烘干至恒质量, 称量地上、地

下部干质量。

1.3.2 幼苗光合特性指标测定 在镉胁迫的第 0、1、3、5 天, 于晴天 9:00—11:00 选取各处理中长势一致的 3 株幼苗, 以其最上部完全展开叶为材料, 采用便携式光合测定仪 (LI-6400) 对净光合速率 (Pn)、气孔导度 (Gs) 和蒸腾速率 (Tr), 每处理重复测定 3 次, 取其平均值。同时, 采用叶绿素仪 (SPAD-502Plus) 对叶绿素相对含量 (SPAD) 进行测定。

1.3.3 幼苗荧光特性指标测定 镉胁迫的第 0、1、3、5 天, 选取各处理中选取长势一致的 3 株幼苗, 取最上面完全展开叶进行测定。测定前先将幼苗叶片进行暗适应 30 min, 然后采用便携式调制叶绿素荧光仪 (PAM2500) 测定叶绿素荧光参数, 包括初始荧光 (F<sub>0</sub>)、最大荧光产量 (F<sub>m</sub>)、最大光化学效率 (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>)、实际光化学效率 (ΦPS II) 和非光化学淬灭系数 (qN)。

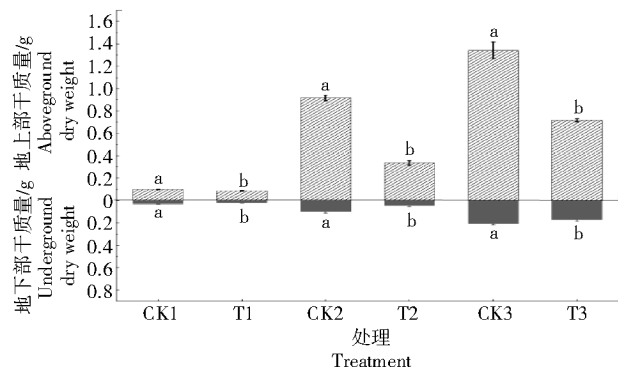
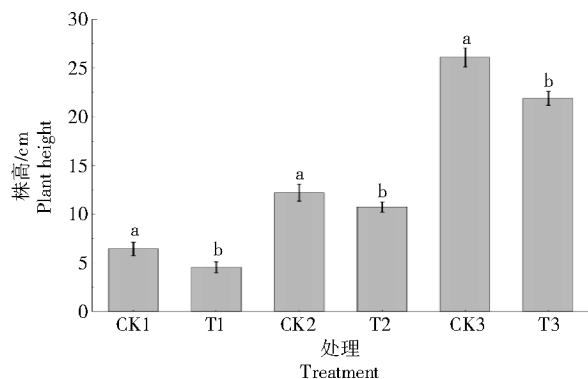
### 1.4 数据分析

采用 Microsoft Excel 2013 进行数据统计; 采用 SPSS 23.0 软件对数据进行差异显著性分析、主成分分析和隶属函数分析; 使用 OriginPro 9.0 软件进行制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉胁迫对谷子、糜子和高粱株高及地上部、地下部干物质积累的影响

镉胁迫对谷子、糜子和高粱幼苗株高及地上部、地下部干质量的影响结果如图 1 所示。



不同小写字母表示同一作物不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下图同

Different lowercase letters indicated significant difference between the different treatments of the same crop ( $P < 0.05$ ). The same as below

图 1 镉胁迫对谷子、糜子和高粱幼苗株高及地上部、地下部干质量的影响

Fig.1 Effects of cadmium stress on plant height, aboveground dry weight, and underground dry weight of foxtail millet, broomcorn millet, and sorghum seedlings

由图1可知,镉胁迫处理后,3种作物的幼苗株高均显著低于对照( $P<0.05$ )。其中,镉胁迫处理后,晋谷21号的株高较对照降低了29.46%,榆糜2号的株高较对照降低了12.09%,辽杂27号的株高较对照降低了16.10%。说明镉胁迫对谷子、糜子和高粱幼苗的株高均表现出显著抑制作用,其中对谷子的抑制程度最强,其次是高粱,对糜子的抑制作用相对最弱。

镉胁迫处理后,3种作物的幼苗地上部及地下部干质量与对照相比均显著降低( $P<0.05$ )。其中,晋谷21号的地上部干质量和地下部干质量较对照分别降低了11.96%、25.02%,榆糜2号的地上部干质量和地下部干质量较对照分别降低了63.34%和53.56%。辽杂27号的地上部干质量和地下部干质量较对照分别降低了46.59%、17.30%。说明镉胁迫显著降低了3种作物的幼苗地上部、地下

部干质量,其降低程度由强到弱依次为糜子>高粱>谷子。

## 2.2 镉胁迫对3种作物叶片光合特性的影响

由图2可知,镉胁迫处理后,3种作物的Pn均呈现出先增加后降低的趋势;3种作物的Gs和叶绿素相对含量呈现出逐渐降低的趋势;晋谷21号的Tr呈现出先增加后降低的趋势,榆糜2号和辽杂27号的Tr呈现出逐渐降低的趋势。镉胁迫处理第5天,晋谷21号的Pn、Gs、Tr、SPAD值较对照分别降低了55.89%、42.31%、68.18%、49.38%;榆糜2号的Pn、Gs、Tr、SPAD值较对照分别降低了59.43%、52.82%、66.05%、32.28%。辽杂27号的Pn、Gs、Tr、SPAD值较对照分别降低了49.00%、99.33%、87.36%、46.88%。表明镉胁迫下,高粱叶片Pn降低幅度低于谷子、糜子。

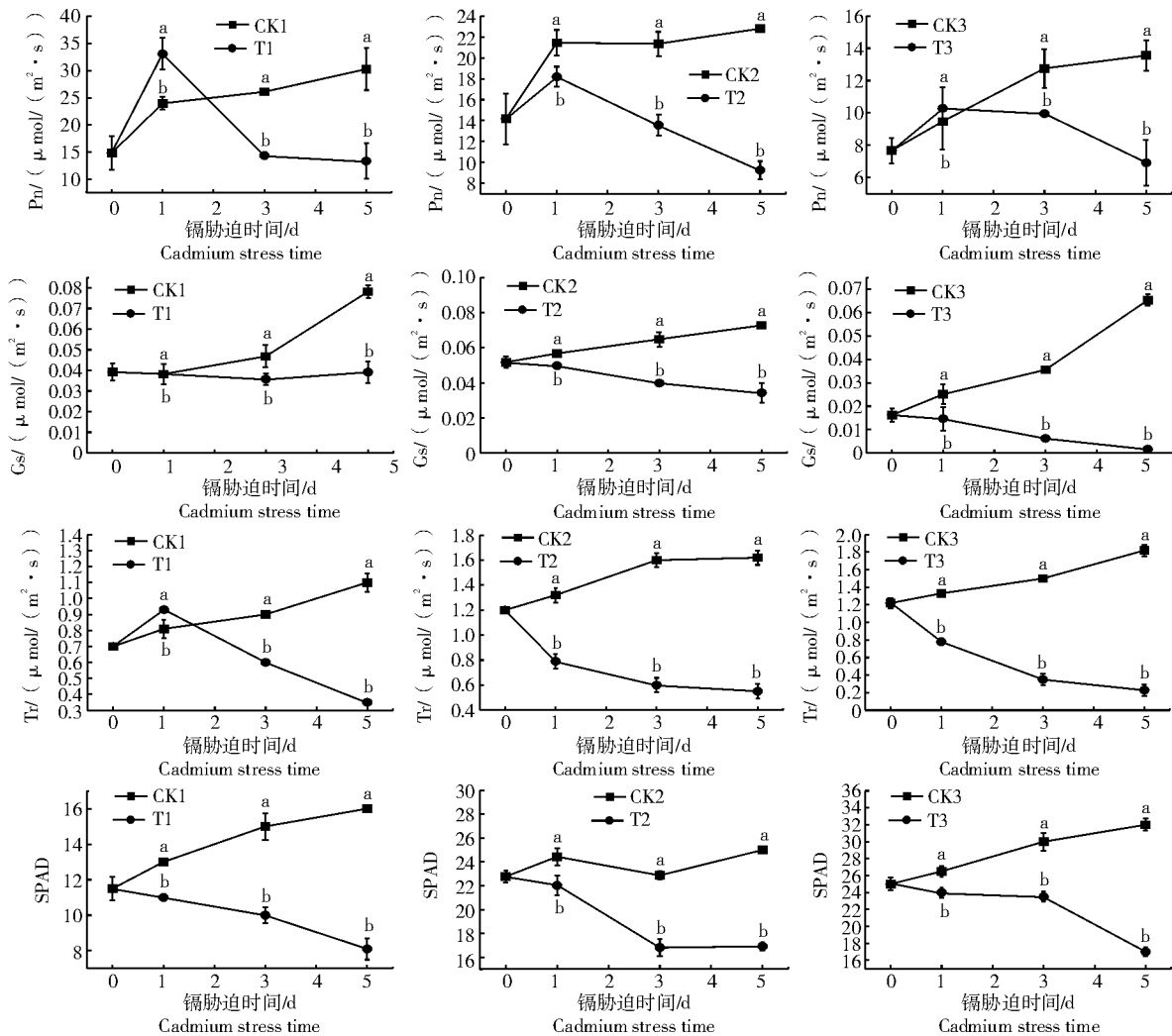


图2 镉胁迫对3种作物叶片光合特性的影响

Fig.2 Effects of cadmium stress on leaf photosynthetic characteristics of three crops

### 2.3 镉胁迫对 3 种作物叶片叶绿素荧光参数的影响

从表 1 可以看出,镉胁迫对 3 种作物的叶绿素荧光参数均产生显著影响( $P<0.05$ )。其中,辽杂 27 号的  $F_0$ 、 $F_m$  和  $qN$  在镉胁迫第 1 天后均有不同程度的升高,较镉胁迫第 0 天分别升高了 37.48%、6.69%、16.67%。镉胁迫第 5 天,晋谷 21 号的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $qN$  较对照分别降低 34.13%、36.0%、37.50%;榆糜 2 号的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $F_v/F_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $qN$  均较对照分

别降低 15.77%、33.33%、7.01%、12.90%、50.00%;辽杂 27 号的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $qN$  较对照分别增加了 39.66%、25.44%、12.40%、56.25%, $F_v/F_m$  较对照降低了 6.34%。综上,在镉胁迫条件下,不同品种间叶绿素荧光参数的响应程度存在差异,其中,辽杂 27 号所受影响最小,而榆糜 2 号受影响最为显著。

表 1 镉胁迫对 3 种作物叶片叶绿素荧光参数的影响

Tab.1 Effects of cadmium stress on leaf chlorophyll fluorescence parameters of three crops

| 品种<br>Variety        | 处理<br>Treatment | 镉胁迫时间/d<br>Cadmium stress time | $F_0$        | $F_m$        | $F_v/F_m$    | $\Phi PS II$ | $qN$         |
|----------------------|-----------------|--------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 晋谷 21 号<br>Jingu 21  | CK1             | 0                              | 0.655±0.007a | 1.317±0.036a | 0.502±0.030a | 0.161±0.042a | 0.175±0.008a |
|                      | T1              |                                | 0.655±0.007a | 1.317±0.036a | 0.502±0.030a | 0.161±0.042a | 0.175±0.008a |
|                      | CK1             | 1                              | 0.518±0.017b | 1.290±0.014a | 0.600±0.003a | 0.315±0.059a | 0.220±0.008a |
|                      | T1              |                                | 0.662±0.017a | 1.191±0.026b | 0.511±0.004b | 0.214±0.008b | 0.120±0.006b |
|                      | CK1             | 3                              | 0.665±0.023a | 1.464±0.028a | 0.530±0.013a | 0.178±0.006a | 0.160±0.003a |
|                      | T1              |                                | 0.596±0.028b | 1.273±0.060b | 0.511±0.019b | 0.131±0.007b | 0.155±0.002b |
| 榆糜 2 号<br>Yumi 2     | CK1             | 5                              | 0.589±0.017a | 1.546±0.135a | 0.622±0.003b | 0.270±0.043b | 0.320±0.006a |
|                      | T1              |                                | 0.388±0.018b | 0.988±0.080b | 0.664±0.005a | 0.452±0.015a | 0.200±0.001b |
|                      | CK2             | 0                              | 0.645±0.015a | 2.250±0.336a | 0.714±0.006a | 0.560±0.002a | 0.120±0.003a |
|                      | T2              |                                | 0.645±0.015a | 2.250±0.336a | 0.714±0.006a | 0.560±0.002a | 0.120±0.003a |
|                      | CK2             | 1                              | 0.582±0.006a | 2.125±0.014a | 0.730±0.001a | 0.590±0.006b | 0.220±0.004a |
|                      | T2              |                                | 0.564±0.005b | 2.000±0.026b | 0.719±0.004b | 0.600±0.008a | 0.130±0.003b |
| 辽杂 27 号<br>Liaoza 27 | CK2             | 3                              | 0.609±0.016a | 1.350±0.028a | 0.724±0.006a | 0.600±0.006a | 0.175±0.004a |
|                      | T2              |                                | 0.566±0.020b | 1.250±0.060b | 0.681±0.003b | 0.550±0.007b | 0.160±0.010b |
|                      | CK2             | 5                              | 0.634±0.012a | 1.500±0.135a | 0.728±0.001a | 0.620±0.003a | 0.250±0.012b |
|                      | T2              |                                | 0.534±0.013b | 1.000±0.080b | 0.677±0.001b | 0.540±0.002b | 0.125±0.011a |
|                      | CK3             | 0                              | 1.505±0.026a | 3.453±0.161a | 0.572±0.060a | 0.289±0.001a | 0.120±0.018a |
|                      | T3              |                                | 1.505±0.026a | 3.453±0.161a | 0.572±0.060a | 0.289±0.001a | 0.120±0.018a |
| 辽杂 27 号<br>Liaoza 27 | CK3             | 1                              | 1.556±0.046b | 3.785±0.038a | 0.590±0.018a | 0.282±0.003a | 0.175±0.016a |
|                      | T3              |                                | 2.069±0.075a | 3.684±0.049b | 0.445±0.030b | 0.120±0.003b | 0.140±0.018b |
|                      | CK3             | 3                              | 1.585±0.049a | 3.388±0.056a | 0.541±0.005a | 0.248±0.008b | 0.175±0.008a |
|                      | T3              |                                | 1.480±0.034b | 3.155±0.083b | 0.518±0.004b | 0.273±0.008a | 0.145±0.019b |
|                      | CK3             | 5                              | 1.069±0.053b | 2.716±0.077b | 0.599±0.005a | 0.258±0.017b | 0.080±0.017b |
|                      | T3              |                                | 1.493±0.058a | 3.407±0.051a | 0.561±0.002b | 0.290±0.008a | 0.125±0.012a |

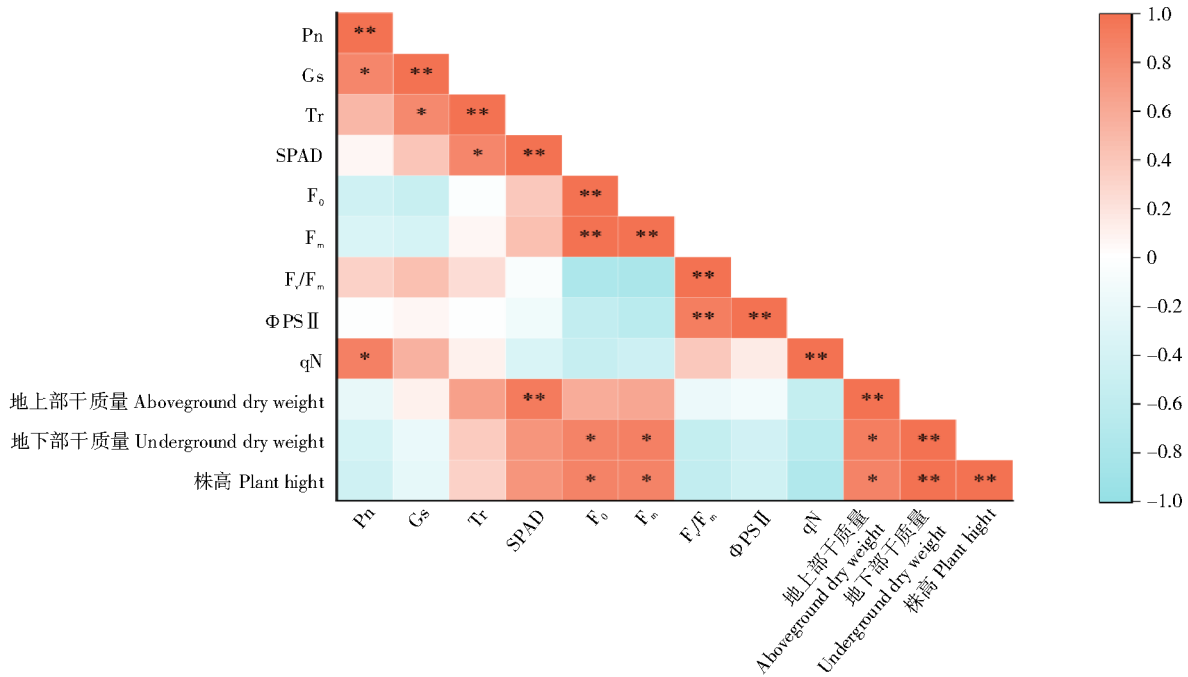
注:不同小写字母表示同一作物不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters indicated significant difference between the different treatments of the same crop( $P<0.05$ ).

### 2.4 形态指标与生理指标的相关性分析

从图 3 可以看出,通过对镉胁迫第 5 天的形态指标和生理指标进行相关性分析发现, $P_n$  与  $G_s$ 、 $qN$  均呈显著正相关( $P<0.05$ ); $G_s$  与  $Tr$  呈显著正相关( $P<0.05$ ); $Tr$  与 SPAD 值呈显著正相关( $P<0.05$ );SPAD 值与地上部干质量呈极显著正相关( $P<0.01$ ); $F_0$  与  $F_m$  呈极显著正相关( $P<0.01$ );

$F_0$ 、 $F_m$  均与地下部干质量和株高呈显著正相关( $P<0.05$ ); $F_v/F_m$  与  $\Phi PS II$  呈极显著正相关( $P<0.01$ );地上部干质量与地下部干质量和株高均呈显著正相关( $P<0.05$ );地下部干质量与株高呈极显著正相关( $P<0.01$ )。综上叶绿素相对含量、 $F_0$ 、 $F_m$  与镉胁迫下 3 种作物的株高、地上部干质量和地下部干质量密切相关。



\*,\*\*分别表示在0.05水平下显著相关和0.01水平下极显著相关

\*, \*\* indicated significant correlation at the 0.05 level and extremely significant correlation at the 0.01 level, respectively

图3 形态指标与生理指标的相关性分析

Fig.3 Correlation analysis of morphological indicators and physiological indicators

2.5 镉胁迫下3种作物耐镉性综合评价

首先对3种作物的12个指标进行标准化处理,然后利用标准化后的指标进行主成分分析。将累计贡献率≥80%和贡献率特征≥1作为评判标准,最终得到3个主成分(表2)。由地下部干质量、株高、F<sub>0</sub>、F<sub>m</sub>、qN、地上部干质量、F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>组成主成分1,其特征值为4.473,贡献率为37.279%;Pn、

Tr、Gs、SPAD值组成主成分2,其特征值为28.094,贡献率为30.277%;ΦPS II为主成分3,其特征值为3.371,贡献率为28.094%。前3个主成分累计贡献率达到95.651%,具有较好的代表性,可作为3种作物耐镉性评价的综合指标。因此,地下部干质量、株高、F<sub>0</sub>、F<sub>m</sub>、Tr这5个指标可作为3种作物耐镉性评价的关键指标。

表2 镉胁迫下3种作物12个指标的主成分分析

Tab.2 Principal component analysis of 12 indicators of three crops under cadmium stress

| 主成分<br>Principal component | Pn     | Gs     | Tr    | SPAD  | F <sub>0</sub> | F <sub>m</sub> | F <sub>v</sub> /F <sub>m</sub> | ΦPS II |
|----------------------------|--------|--------|-------|-------|----------------|----------------|--------------------------------|--------|
| 1                          | -0.517 | -0.367 | 0.174 | 0.609 | 0.923          | 0.928          | -0.708                         | -0.547 |
| 2                          | 0.638  | 0.886  | 0.980 | 0.760 | -0.174         | -0.077         | 0.383                          | 0.116  |
| 3                          | -0.548 | -0.222 | 0.006 | 0.173 | -0.172         | -0.271         | 0.570                          | 0.768  |

| 主成分<br>Principal component | qN     | 地上部干质量<br>Aboveground dry weight | 地下部干质量<br>Underground dry weight | 株高<br>Plant height | 贡献特征值/%<br>Eigenvalue | 贡献率<br>Contribution rate | 累计贡献率/%<br>Cumulative contribution rate |
|----------------------------|--------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|--------------------------|---|
| 1                          | -0.731 | 0.781                            | 0.968                            | 0.981              | 4.473                 | 37.279                   | 37.279                                  |
| 2                          | 0.270  | 0.538                            | 0.213                            | 0.160              | 3.633                 | 30.277                   | 67.556                                  |
| 3                          | -0.510 | 0.295                            | 0.064                            | 0.100              | 3.371                 | 28.094                   | 95.651                                  |

采用隶属函数分析法,获得各综合指标值、隶属函数值和D值,结果显示(表3),3种作物耐镉性按D值由大到小依次为辽杂27号>晋谷21号>榆

糜2号。表明辽杂27号的耐镉性最强,其次为晋谷21号,榆糜2号的耐镉性最弱。

表 3 镉胁迫下 3 种作物的综合指标值、隶属值、D 值与排名

Tab.3 The comprehensive indicator value, subordinate value, D value, and ranking of three crops under cadmium stress

| 处理  | Treatment | $X_1$  | $X_2$  | $X_3$  | $\mu_1$ | $\mu_2$ | $\mu_3$ | D      | 排名 | Ranking |
|-----|-----------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|--------|----|---------|
| CK1 |           | -0.824 | 0.723  | 1.605  | 0.103   | 0.762   | 0.000   | 0.282  | 1  |         |
| T1  |           | -1.096 | -0.485 | -0.300 | 0.000   | 0.268   | -1.904  | -0.475 | 5  |         |
| CK2 |           | 0.805  | -1.139 | 0.577  | 0.721   | 0.000   | -1.028  | -0.021 | 3  |         |
| T2  |           | -0.296 | -0.965 | -0.825 | 0.303   | 0.071   | -2.429  | -0.573 | 6  |         |
| CK3 |           | 1.539  | 0.561  | 0.090  | 1.000   | 0.696   | -1.515  | 0.165  | 2  |         |
| T3  |           | -0.128 | 1.304  | -1.147 | 0.367   | 1.000   | -2.751  | -0.349 | 4  |         |

注: $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  为耐镉性综合指标值; $\mu_1$ 、 $\mu_2$ 、 $\mu_3$  为综合耐镉指标隶属值;D 为耐镉性综合评价。

Note:  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  were comprehensive indicator values of cadmium tolerance;  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  and  $\mu_3$  were the subordinate values of the comprehensive cadmium tolerance indicators. D was the comprehensive evaluation of cadmium tolerance.

### 3 结论与讨论

作物株高和生物量是衡量作物对重金属逆境胁迫抵抗能力的重要指标<sup>[24]</sup>。本研究发现,镉胁迫下 3 种作物幼苗株高、地上部干质量和地下部干质量与对照相比均有所降低,表明镉胁迫对 3 种作物幼苗株高有显著抑制作用,对其地上部、地下部干质量有抑制作用,这与马伊馨等<sup>[25]</sup>和秦华等<sup>[26]</sup>在高粱上的研究结果一致,与田保华<sup>[27]</sup>在谷子上的研究结果相似。本研究还发现,镉胁迫对不同作物生长指标的影响存在差异:对株高的抑制效应表现为谷子>高粱>糜子,对地上部干质量的抑制效应表现为糜子>高粱>谷子,对地下部干质量抑制效应表现为糜子>谷子>高粱。

光合作用是地球上几乎所有生命的能量和物质基础<sup>[28]</sup>,对作物生长发育具有重要作用。本研究发现,镉胁迫下 3 种作物的光合参数  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  均随镉胁迫时间的变化有所不同,其中,3 种作物的  $P_n$  随镉胁迫时间的变化均呈现先增加后降低的趋势; $G_s$  随镉胁迫时间增加呈现缓慢下降的趋势。谷子的  $T_r$  随镉胁迫时间增加呈现先增加后降低的趋势,而糜子和高粱的  $T_r$  呈现持续降低的趋势。镉胁迫 1 d 后,3 种作物幼苗叶片的  $P_n$  均增加,这可能是由于短时间的镉胁迫对幼苗有促进作用。随着镉胁迫时间延长,3 种作物的  $P_n$ 、 $G_s$  和  $T_r$  均呈现下降趋势,这与霍瑞朋等<sup>[29]</sup>和 ALI 等<sup>[30]</sup>在油菜,以及闫雷等<sup>[31]</sup>在黄瓜上的研究结果相似,然而这与张诗行等<sup>[32]</sup>在花生上的研究结果不同,表明镉胁迫降低了 3 种作物光合作用是由气孔限制引起的,具体表现为气孔导度降低,导致进入叶肉细胞的  $CO_2$  含量降低,从而使得  $CO_2$  同化速率降低。本研究发现,镉胁迫下 3 种作物幼苗的  $P_n$ 、 $G_s$ 、 $T_r$  的降

幅分别表现为糜子>谷子>高粱、高粱>糜子>谷子、高粱>谷子>糜子。镉胁迫下,3 种作物幼苗叶片 SPAD 值均降低,这与王敬言<sup>[33]</sup>的研究结果一致,因此,推测镉胁迫可抑制幼叶叶绿素合成酶活性或提高叶绿素降解酶活性,导致叶绿素合成受阻,叶绿体发育不良,进一步影响幼苗光合能力<sup>[34]</sup>。本研究发现,镉胁迫下糜子 SPAD 值降幅最大,说明镉胁迫对糜子叶片叶绿素合成抑制作用最强。

叶绿素荧光能够反映光合作用的动态变化,因此,广泛被应用于植物逆境生理的评价<sup>[35]</sup>。本研究发现,镉胁迫处理第 5 天,谷子幼苗的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $qN$  较对照均降低,而  $F_v/F_m$ 、 $\Phi PS II$  较对照均增加;糜子幼苗的 5 个荧光指标均较对照减少;高粱幼苗的  $F_0$ 、 $F_m$ 、 $\Phi PS II$ 、 $qN$  较对照均增加,而  $F_v/F_m$  较对照降低。随着镉胁迫时间的增加,3 种作物的荧光指标呈下降趋势,表明镉胁迫对作物荧光起到抑制作用,这与王瑞波<sup>[36]</sup>在小麦上的研究结果一致。本研究还发现,镉胁迫下,3 种作物的地上部干质量与 SPAD 值呈极显著正相关,株高和地下部干质量与  $F_0$ 、 $F_m$  呈显著正相关,表明 SPAD 值、 $F_0$  和  $F_m$  的增加有利于促进镉胁迫中 3 种作物地上及地下部分的生长发育。

目前,用于评价植物的耐镉性的方法有很多,如隶属函数法、主成分分析法、相关性分析法等。大多数学者采用多个评价方法相结合的方法,如范利荣等<sup>[37]</sup>运用主成分分析法、隶属函数法和聚类分析法对 58 份不同谷子品种耐镉性进行综合评价;李海录等<sup>[38]</sup>利用隶属函数分析法和聚类分析法相结合的方法评价了 6 种观赏牡丹的耐旱性;刘莹等<sup>[39]</sup>利用相关性分析法、主成分分析法和聚类分析法对不同谷子品种进行耐盐碱筛选。本研究中,首先利用主成分分析将多个复杂的单项指标转化

为一个综合指标,虽然能保证原有信息不损失,但可能造成的信息重叠与片面性。随后基于隶属函数法,计算得出镉胁迫下3种作物各综合指标的隶属函数值,最终得到其综合耐镉评价值(D值)。通过主成分分析与隶属函数法的综合评价,3种禾谷类作物的耐镉性强弱依次为辽杂27号>晋谷21号>榆糜2号。表明辽杂27号在陕北镉污染区具有较好的种植适应潜力。

#### 参考文献:

- [1] 史沉鱼,阳月,陈月萍,等.外源油菜素内酯对铅胁迫下花生幼苗的缓解效应[J].山西农业科学,2024,52(04):58-67. SHI C Y, YANG Y, CHEN Y P, et al. Alleviating effect of exogenous brassinosteroids on seedlings of *Arachis hypogaea* L. under Pb stress[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2024, 52(4): 58-67.
- [2] RAVANBAKSH M, KOWALCHUK G, JOUSSET A. Optimization of plant hormonal balance by microorganisms prevents plant heavy metal accumulation[J]. Hazard Mater, 2019, 379: 120787.
- [3] 王亚丽,仪慧兰,韩彦莎. SO<sub>2</sub>对谷子幼苗根系镉胁迫的缓解作用[J].农业环境科学学报,2017,36(3):443-448. WANG Y L, YI H L, HAN Y S. Sulfur dioxide alleviates cadmium toxicity in the roots of foxtail millet seedlings[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(3): 443-448.
- [4] TUKAJ Z, SKOWRONSKI T. Cadmium effect on the growth, photosynthesis, ultrastructure and phytochelatin content of green microalga *Scenedesmus armatus*: a study at low and elevated CO<sub>2</sub> concentration[J]. Environmental and Experimental Botany, 2007, 60(3): 291-299.
- [5] 覃婷微,何宇豪,罗胜,等.水稻种质资源籽粒矿质离子浓度NIRS模型的建立与评价[J/OL].基因组学与应用生物学,1-13. [2026-02-07]. <https://link.cnki.net/urlid/45.1369.Q.20260112.1458.002>. QIN T W, HE Y H, LUO S, et al. Establishment and evaluation of near-infrared spectroscopy models for grain mineral element concentration in rice germplasm resources[J/OL]. Genomics and Applied Biology, 1-13. [2026-02-07]. <https://link.cnki.net/urlid/45.1369.Q.20260112.1458.002>.
- [6] 尹华.城市污泥堆肥制备复混肥料及其在重金属污染土地修复中的应用[D].广州:华南理工大学,2018. YIN H. Preparation of compound fertilizer from municipal sludge composting and its application in remediation of heavy metal polluted land[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2018.
- [7] CHEN X, XU K, HRNG S, et al. Systematic analysis of the physiological and molecular responses of foxtail millet (*Setaria italica*) to cadmium stress[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2025: 1-12.
- [8] REVATHY K, SHANKER S R. Effect of cadmium stress on seed germination and seedling morpho-physiological growth parameters of barnyard millet (*Echinochloa frumentacea* link) [J]. Plant Science Today, 2023, 10(1): 252-260.
- [9] JADID N, PUSPANINGTYAS I, JANNAH A L, et al. Growth responses of Indonesian foxtail millet (*Setaria italica* (L.) Beauv.) to cadmium stress[J]. Air, Soil and Water Research, 2022, 15: 11786221221114310.
- [10] IWUALA E, OLAJIDE O, ABIODUN I, et al. Silicon ameliorates cadmium (Cd) toxicity in pearl millet by inducing anti-oxidant defense system[J]. Heliyon, 2024, 10(3): e25514.
- [11] 郭晖,周慧,庄静静,等.镉胁迫下丛枝菌根真菌对小麦生理特性和根际土壤酶活性的影响[J].河南农业科学,2022,51(8):20-27. GUO H, ZHOU H, ZHUANG J J, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on wheat physiological characteristics and rhizosphere soil enzyme activities under cadmium stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(8): 20-27.
- [12] 苗明军,李佳佳,雷晓葵,等.32个菠菜品种对镉胁迫的生长响应及耐镉性评价[J].河南农业科学,2024,53(9):108-116. MIAO M J, LI J J, LEI X K, et al. Growth response and tolerance evaluation of 32 spinach varieties to cadmium stress[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2024, 53(9): 108-116.
- [13] 王永吉,关正,解丽媛,等.镉镍胁迫对3种草本植物种子萌发及幼苗生长的影响[J].草业科学,2024,41(3):599-610. WANG Y J, GUAN Z, XIE L Y, et al. Effects of cadmium and nickel single and combined stress on the seed germination and seedling growth of three herbaceous plants[J]. Pratacutural Science, 2024, 41(3): 599-610.
- [14] 卫丹丹,王丙全,戴丽.镉污染对2种豆科植物叶绿素荧光特性的影响[J].山西农业科学,2021,49(10):1205-1211. WEI D D, WANG B Q, DAI L. Influence of cadmium pollution on chlorophyll fluorescence characteristics in two leguminous plants[J]. Journal of Shanxi Agricultural Science, 2021, 49(10): 1205-1211.
- [15] 王亚丽.谷子对黑穗病菌和镉胁迫的响应[D].太原:山西大学,2017. WANG Y L. Response of foxtail millet to smut disease and cadmium stress[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2017.
- [16] 李娟,田保华,刘旦梅,等.硫化氢调节谷子幼苗P-ATPase响应镉胁迫[J].农业环境科学学报,2018,37(1):52-57. LI J, TIAN B H, LIU D M, et al. Hydrogen sulfide regulates cadmium stress resistance through P-ATPases in foxtail millet seedlings[J]. Journal of Agro-Environment Science. 2018, 37(1): 52-57.
- [17] 柴梅梅,侯磊磊,贺亚如,等.陕北榆林地区小杂粮的种植及产业发展状况分析[J].粮食加工,2023,48(4):127-129. CHAI M M, HOU L L, HE Y R, et al. Analysis of planting and industrial development of small coarse grain in Yulin area of northern Shaanxi province[J]. Grain Processing, 2023, 48(4): 127-129.
- [18] 李海霞,米银法,陈双臣.干旱胁迫下6种观赏牡丹生理响应及耐旱性评价[J].江苏农业科学,2022,50(7):131-139. LI H X, MI Y F, CHEN S C. Physiological response and drought tolerance of 6 species of ornamental peony under drought stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(7): 131-139.
- [19] 张盼盼,王小林,郭亚宁,等.40个不同糜子品种种子萌发期耐镉性评价[J].西北农业学报,2020,29(12):1803-1813. ZHANG P P, WANG X L, GUO Y N, et al. Evaluation on

- cadmium tolerance of 40 different broomcorn millet varieties during seed germination[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2020, 29(12): 1803-1813.
- [20] 张晋. 陕西省定边县小杂粮产业发展策略研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2022.  
ZHANG J. A study on the industrial development strategy of sundry grain in ding biam county, Shaanxi province[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2022.
- [21] 马良. 榆林小杂粮产业发展现状、问题及对策研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.  
MA L. The research on the current situation, problems and countermeasures of small grains industry in Yulin[D]. Yanling: Northwest A&F University, 2020.
- [22] 赵俊城, 曹红霞, 任利宇, 等. 补充灌溉下施肥量及基追比对陕北高粱干物质积累和产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2025, 43(2): 204-214.  
ZHAO J C, CAO H X, REN L Y, et al. Effects of fertilizer application rates and basal to topdressing ratios on dry matter accumulation and yield of sorghum under supplementary irrigation in northern Shaanxi[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2025, 43(2): 204-214.
- [23] 张盼盼, 袁琴琴, 王小林, 等. 镉胁迫对糜子幼苗生长及抗性生理的影响[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(4): 1279-1286.  
ZHANG P P, YUAN Q Q, WANG X L, et al. Effects of Cadmium on growth and resistance physiological of *Panicum miliaceum* L. seedlings[J]. *Molecular Plant Breeding*, 2023, 21(4): 1279-1286.
- [24] WANG X Q, DU G D, LU X F, et al. Characteristics of mitochondrial membrane functions and antioxidant enzyme activities in strawberry roots under exogenous phenolic acid stress[J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 248: 89-97.
- [25] 马伊馨, 徐宗国, 陈春, 等. 镉胁迫下硫对甜高粱幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. *延安大学学报(自然科学版)*, 2016, 35(4): 84-88.  
MA Y X, XU Z G, CHEN C, et al. Effects of sulfur on root morphology and physiological characteristics of sweet sorghum seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Yanan University(Natural Science Edition)*, 2016, 35(4): 84-88.
- [26] 秦华, 贺前锋, 刘代欢, 等. 重金属铅镉对甜高粱生长的影响及其积累特性研究[J]. *中国农学通报*, 2018, 34(13): 119-125.  
QIN H, HE Q F, LIU D H, et al. The effect of heavy metal lead and cadmium on the growth and their accumulation in sweet sorghum[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(13): 119-125.
- [27] 田保华. 硫化氢信号在谷子响应镉胁迫中的生理作用[D]. 太原: 山西大学, 2016.  
TIAN B H. Physiological function of hydrogen sulfide signaling in response to cadmium stress in doxtail millet[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016.
- [28] 杨文强, 林荣呈, 端木德强, 等. 近 10 年光合作用领域若干重要研究进展[J]. *植物生理学报*, 2024, 60(2): 211-247.  
YANG W Q, LIN R C, DUANMU D Q, et al. Multiple of important progress on photosynthesis in the last 10 years[J]. *Plant Physiology Journal*, 2024, 60(2): 211-247.
- [29] 霍瑞朋, 张召娣, 徐雪芹, 等. 园林废弃物生物炭对镉胁迫下油菜生理及光合荧光特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(7): 2158-2165.  
HUO R P, ZHANG Z D, XU X Q, et al. Effects of garden waste biochar on physiological and photosynthetic fluorescence characteristics of rapeseed under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(7): 2158-2165.
- [30] ALI B, GILL RA, YANG S, et al. Hydrogen sulfide alleviates cadmium-induced morpho-physiological and ultra-structural changes in *Brassica napus*[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 110: 197-207.
- [31] 闫雷, 孙小贺, 李威, 等. 外源 2, 4-表油菜素内酯对镉胁迫下黄瓜幼苗生长及光合生理特性的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2022, 53(6): 10-19.  
YAN L, SUN X H, LI W, et al. Effects of exogenous 2, 4-epibrassinolide on growth and photosynthetic physiological characteristics of cucumber seedlings under cadmium stress[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2022, 53(6): 10-19.
- [32] 张诗行, 于树涛, 张君, 等. 腐熟花生秸秆对镉胁迫下花生生长、生理特性及镉积累的影响[J]. *生态学杂志*, 2024, 43(4): 1074-1081.  
ZHANG S X, YU S T, ZHANG J, et al. Effects of rotted peanut straw on peanut growth, physiological characteristics and cadmium accumulation under cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024, 43(4): 1074-1081.
- [33] 王敬言. 大蒜废弃物缓解大豆重金属镉胁迫作用研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2022.  
WANG J Y. Effect of garlic waste on alleviating cadmium stress in soybean[D]. Shenyang: Shenyang University, 2022.
- [34] CHEN X, TAO H, WU Y, et al. Effects of Cadmium on metabolism of photosynthetic pigment and photosynthetic system in *Lactuca sativa* L. revealed by physiological and proteomics analysis[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 305: 111371.
- [35] ZAVAFER A, LABEEUW L, MANCILLA C. Global trends of usage of chlorophyll fluorescence and projections for the next decade[J]. *Plant Phenomics*, 2020, 2020: 6293145.
- [36] 王瑞波. 水杨酸对镉胁迫小麦叶绿素荧光参数的影响[J]. *生物技术通报*, 2017, 33(7): 96-99.  
WANG R B. Advances in chlorophyll fluorescence analysis and its uses[J]. *Bulletin of Biotechnology*, 2017, 33(7): 96-99.
- [37] 范利荣, 晁赢, 阎祥慧, 等. 镉胁迫对不同谷子品种种子萌发特性的影响[J]. *草业科学*, 2023, 40(9): 2330-2339.  
FAN L R, CHAO Y, YAN X H, et al. Effects of cadmium stress on seed germination characteristics of 58 millet accessions[J]. *Pratacultural Science*, 2023, 40(9): 2330-2339.
- [38] 李海录, 冯瑞瑞, 王孟, 等. 榆林小杂粮产业发展面临问题及对策思路[J]. *现代农业研究*, 2022, 28(5): 116-118.  
LI H L, FENG R R, WANG M, et al. The problems and countermeasures in the development of the minor grain crops industry in Yulin[J]. *Modern Agricultural Research*, 2022, 28(5): 116-118.
- [39] 刘莹, 尹泽群, 吴柏辰, 等. 复合盐碱胁迫对不同谷子品种萌发期的影响及耐盐碱筛选[J]. *作物杂志*, 2024, (3): 207-215.  
LIU Y YIN Z Q, WU B C, et al. Effects of combined salt and alkali stress on germination stage of different millet varieties and screening of salt and alkali tolerance[J]. *Crops*, 2024, (3): 207-215.