

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.06.017

引用格式:孙庆赢,姚兴洁,吕艳贞,等.紫花苜蓿种子萌发期耐镉性综合评价[J].草地学报,2026,34(6):2138—2146

SUN Qing-ying, YAO Xing-jie, LÜ Yan-zhen, et al. Comprehensive Evaluation of Cadmium Tolerance of Alfalfa during Seed Germination[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(6): 2138—2146

## 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性综合评价

孙庆赢<sup>1</sup>, 姚兴洁<sup>1</sup>, 吕艳贞<sup>1</sup>, 张 昭<sup>1</sup>, 闫慧芳<sup>1,2\*</sup>

(1. 青岛农业大学草业学院, 山东 青岛 266109; 2. 天津市农业科学院种质资源与生物技术研究所, 天津 300384)

**摘要:**为综合评价种子萌发期不同紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)种质的耐镉性差异,本试验测定了40个品种在对照(蒸馏水)和镉胁迫( $50\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CdCl}_2$ )两种条件下种子萌发与幼苗生长相关指标,并基于综合指标权重、隶属函数分析和耐镉性综合评价 $D$ 值对供试紫花苜蓿种质进行耐镉性综合分析。结果表明:50  $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  镉溶液对供试紫花苜蓿品种的种子活力指数、根长、幼苗活力指数等9个指标均有抑制作用,其中根长所受抑制程度最大。结合耐镉性综合评价 $D$ 值和聚类分析,40个供试紫花苜蓿种质耐镉性被划分为强耐镉性( $D\geq 0.691$ )、中耐镉性( $0.691>D\geq 0.468$ )和弱耐镉性( $0.468>D$ )3大类,并筛选出耐镉性最强和最弱的品种分别为‘Bara520YQ’和‘WL298HQ’。本试验为紫花苜蓿耐镉性新种质的筛选与利用、耐镉基因挖掘及分子调控机制探索提供了理论参考。

**关键词:**紫花苜蓿;种子萌发;耐镉性;综合评价;聚类分析

中图分类号:S541.9

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)06-2138-09

## Comprehensive Evaluation of Cadmium Tolerance of Alfalfa during Seed Germination

SUN Qing-ying<sup>1</sup>, YAO Xing-jie<sup>1</sup>, LÜ Yan-zhen<sup>1</sup>, ZHANG Zhao<sup>1</sup>, YAN Hui-fang<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Grassland Science, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong Province 266109, China;

2. Institute of Germplasm Resources and Biotechnology, Tianjin Academy of Agricultural Sciences, Tianjin 300384, China)

**Abstract:** To comprehensively evaluate the differences in cadmium tolerance of different alfalfa (*Medicago sativa* L.) germplasms during seed germination, the indicators related to seed germination and seedling growth of 40 cultivars were measured under two conditions of control (distilled water) and cadmium stress ( $50\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ CdCl}_2$ ) in this study. Based on the comprehensive indicator weight, membership function analysis and comprehensive evaluation value ( $D$  value), the cadmium tolerance of the tested alfalfa germplasms was comprehensively analyzed. The results indicated that  $50\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$  cadmium solution had inhibitory effects on nine indicators including seed vigor index, root length, and seedling vigor index of the tested alfalfa cultivars, with root length being the most inhibited. Based on the comprehensive evaluation of cadmium tolerance  $D$  value and systematic clustering analysis, the cadmium tolerance of 40 tested alfalfa germplasms was divided into three categories, namely strong cadmium tolerance ( $D\geq 0.691$ ), medium cadmium tolerance ( $0.691>D\geq 0.468$ ) and weak cadmium tolerance ( $0.468>D$ ). The cultivars with the strongest and weakest cadmium tolerance were selected as ‘Bara520YQ’ and ‘WL298HQ’, respectively. This study provides a theoretical reference for screening and utilization of new germplasms of alfalfa with cadmium tolerance, the mining of cadmium tolerance genes, and the exploration of molecular regulatory mechanisms.

**Key words:** Alfalfa; Seed germination; Cadmium tolerance; Comprehensive evaluation; Cluster analysis

收稿日期:2025-07-04;修回日期:2025-10-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(32301480)资助

作者简介:孙庆赢(2000-),男,汉族,山东泰安人,硕士研究生,主要从事种子活力与抗逆萌发调控机制方面研究,E-mail:15949823182@163.com; \*通信作者 Author for correspondence, E-mail:yanhuifang0516@126.com

镉是一种高毒、难降解、易流动、作物转移吸附能力较强的重金属元素,具有隐蔽性、长期性等特征。近年来,随着城市化进程和工农业的迅速发展,不科学、不合理的生产使用致使大量重金属镉被释放到土壤中并不断积累,导致土壤污染与环境问题日益突出。据统计,我国超过 2500 万  $\text{hm}^2$  农田存在不同程度的镉污染,严重威胁着当地人民的生产生活和生命健康<sup>[1]</sup>。土壤中的镉被植物吸收并不断在体内积累,造成细胞膜系统氧化损伤,阻碍植物正常生长,从而降低其生物量和营养品质。如果人类食用富集镉的农产品,将导致镉在人体内不断累积,进而影响人类生命健康。镉污染严重威胁土地环境、粮食安全和人体健康,不利于农牧业可持续发展<sup>[2]</sup>。因此,研究如何改良被镉污染的土壤对环境保护和国家粮食安全具有重要意义。

植物修复法作为一种发展前景广阔的污染土壤治理方法,具有比传统修复法更高的性价比、稳定性和安全性,而具备耐性能力的植物选择则尤为关键<sup>[3]</sup>。紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)在世界范围内被广泛栽培,抗逆性强、生物量大,且镉吸收能力强,是应用于镉污染土地修复改良的优良候选牧草<sup>[4]</sup>。然而,紫花苜蓿镉吸收能力因品种耐镉性不同而存在差异。种子萌发期作为植物生命周期的起点,不仅是植物响应外界胁迫因子的敏感时期,更是影响幼苗形态建成、关乎植物对镉污染土壤修复效率的关键时期<sup>[5]</sup>。因此,评价不同品种紫花苜蓿萌发期耐镉性并筛选耐镉优异种质,将有利于提高紫花苜蓿镉富集能力,进而提升其对镉污染土壤的修复效率。近年来,国内外关于紫花苜蓿镉胁迫的相关研究主要集中在外源物质缓解效应<sup>[6-8]</sup>、生理生化响应<sup>[9]</sup>、表型响应<sup>[10-11]</sup>、分子机制调控等方面,但有关其不同种质的耐镉性评价研究较少,且缺乏针对种子萌发期的耐镉性综合评价。因此,利用综合评价法研究紫花苜蓿种子萌发期耐镉性将对提高镉污染土壤修复效率、保障草畜产品安全及推动草牧业可持续发展具有重要意义,也将为耐镉种质筛选培育和分子调控机制探究提供理论依据。

本试验采用培养皿发芽法,利用  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CdCl}_2$  溶液模拟镉胁迫对 40 份紫花苜蓿种质进行种子发芽试验,根据种子萌发与幼苗生长相关指标对镉胁迫的响应特性差异,综合评价不同种质的耐镉性,以期对紫花苜蓿强耐镉种质选择、镉污染土壤

修复效率提高及耐镉调控机制研究提供优异种质材料和理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本试验选用 40 个紫花苜蓿品种,种子于 2020 年收获后保存在实验室  $-20^\circ\text{C}$  冰箱内,以备试验所用(表 1)。

### 1.2 试验设计

**1.2.1 发芽试验** 本试验采用的发芽方法为培养皿发芽法。将大小均匀、饱满一致的紫花苜蓿种子摆放在铺有 3 层滤纸的方形有盖培养皿中,滤纸预先用 10 mL 蒸馏水和  $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{CdCl}_2$  溶液润湿,每皿 50 粒种子,每个处理重复 3 次。将培养皿放置在 8 h 光照和 16 h 黑暗的培养箱( $20^\circ\text{C}$ )中萌发 10 d,每隔 24 h 统计种子露白率、发芽率等情况,并适量补加  $\text{CdCl}_2$  溶液或蒸馏水,以保持镉浓度稳定。

**1.2.2 指标测定** 本试验测定指标包括发芽势(Germination energy, GE)、发芽率(Germination percentage, GP)、发芽指数(Germination index, GI)、种子活力指数(Vigor index, VI)、成苗率(Seedling percentage, SP)、幼苗苗长(Shoot length, SL)和根长(Root length, RL)、幼苗鲜重(Seedling fresh weight, SFW)、幼苗活力指数(Seedling vigor index, SVI)<sup>[12]</sup>。测定方法及计算公式参照已报道研究<sup>[13]</sup>。

### 1.3 耐镉性综合评价

根据 1.2.2 中相关指标测定值,通过以下公式计算求得综合指标权重、隶属函数值、综合指标值和耐镉性综合评价值,进而对各品种紫花苜蓿在种子萌发期的耐镉性强弱进行综合评价。

参照袁嘉苗等<sup>[14]</sup>方法对供试紫花苜蓿各单项测定指标进行主成分分析,并计算综合指标权重。

$W_i = P_i / \sum_{i=1}^n P_i, i=1, 2, 3, \dots, n$ 。式中的  $W_i$  和  $P_i$  分别表示经过主成分分析提取得到的第  $i$  个综合指标在各综合指标中所占的权重和各供试品种第  $i$  个综合指标的贡献率。

基于各指标测定值,结合隶属函数法,分析供试紫花苜蓿耐镉性综合指标值,进而求出耐镉性综合评价  $D$  值,并根据  $D$  值大小进行系统聚类分析。

$$\mu(X_i) = (X_i - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}), i=1, 2, 3, \dots, n。$$

表 1 紫花苜蓿供试品种清单  
Table 1 List of the tested alfalfa cultivars

| 编号 No. | 品种 Cultivar         | 初始发芽率<br>Initial germination percentage/% | 编号 No. | 品种 Cultivar          | 初始发芽率<br>Initial germination percentage/% |
|--------|---------------------|-------------------------------------------|--------|----------------------|-------------------------------------------|
| 1      | MT4015              | 100.00                                    | 21     | 中兰 2 号 Zhonglan No.2 | 96.67                                     |
| 2      | 金皇后 Golden Queen    | 99.33                                     | 22     | 陇东 Longdong          | 95.33                                     |
| 3      | 阿尔冈金 Algonquin      | 99.33                                     | 23     | 英斯特 Instict          | 100.00                                    |
| 4      | 巨能 201 Magna 201    | 98.67                                     | 24     | 苜丰 Mufeng            | 97.33                                     |
| 5      | 巨能 995 Magna 995    | 98.00                                     | 25     | 惊喜 Surprise          | 95.33                                     |
| 6      | 威斯顿 Weston          | 97.33                                     | 26     | 普拉图 Plato            | 94.00                                     |
| 7      | 巨能 601 Magna 601    | 96.67                                     | 27     | 燃力士 Celsius          | 100.00                                    |
| 8      | 角斗士 Colosseo        | 96.67                                     | 28     | 北纬 30 Central        | 98.67                                     |
| 9      | 巨能 401 Magna 401    | 96.00                                     | 29     | 科洛塞奥 Colosseo        | 94.67                                     |
| 10     | 皇冠 Phabulous        | 95.33                                     | 30     | Bara218TR            | 99.33                                     |
| 11     | 沃苜 1 号 Womu No.1    | 94.67                                     | 31     | 三得利 Sanditi          | 99.33                                     |
| 12     | 斯贝德 Spyder          | 94.00                                     | 32     | Bara310SC            | 98.67                                     |
| 13     | SK3010              | 94.00                                     | 33     | Bara520YQ            | 98.67                                     |
| 14     | 佰苜 201 VNS          | 94.00                                     | 34     | 超能 Superpower        | 96.67                                     |
| 15     | 巨能耐盐 Magna salt     | 92.67                                     | 35     | WL366HQ              | 96.00                                     |
| 16     | 威龙 Veyron           | 88.67                                     | 36     | WL712                | 94.67                                     |
| 17     | 中苜 1 号 Zhongmu No.1 | 98.67                                     | 37     | Bara210SC            | 94.67                                     |
| 18     | 中苜 3 号 Zhongmu No.3 | 98.67                                     | 38     | 赛沃 5 Sevo 5          | 94.00                                     |
| 19     | 中苜 4 号 Zhongmu No.4 | 98.00                                     | 39     | WL298HQ              | 90.67                                     |
| 20     | 东苜 2 号 Dongmu No.2  | 97.33                                     | 40     | 一级 First level       | 89.33                                     |

式中的  $\mu(X_i)$ 、 $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别表示某个测定指标的模糊隶属函数值的平均值、最大值和最小值。

$F(X_i) = a_{1i}X_{1i} + a_{2i}X_{2i} + \dots + a_{mi}X_{mi}$ ,  $m=1, 2, 3, \dots, n$ ;  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。式中的  $F(X_i)$  为第  $i$  个综合指标值,  $a_{mi}$  和  $X_{mi}$  分别为各单一测定指标的特征值所对应的特征向量和标准化处理值。

$D = \sum_{i=1}^n [\mu(X_i) \times W_i]$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。式中的  $D$  值为不同紫花苜蓿品种在镉胁迫后由综合指标评价所得的耐镉性综合评价价值。

#### 1.4 数据统计与分析

利用 Microsoft Excel 2021 初步整理试验数据, SAS 软件进行相关性分析和系统聚类分析, 以实现紫花苜蓿耐镉性综合分析。所有数值均以“Mean $\pm$ SE( $n=3$ )”表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性单项测定指标差异分析

与对照组相比, 紫花苜蓿种子发芽与幼苗生长相关指标 (GE, GP, GI, VI, SP, SL, RL, SFW 和 SVI) 的平均值均降低, 特别是 RL 和 SVI 下降幅度

最大, 分别为 77.31% 和 72.90%, 而 GE 和 GP 平均值下降幅度最小, 分别为 1.38% 和 2.42%, 表明镉胁迫下紫花苜蓿各单项测定指标所受抑制程度不同, 且差异较大。镉处理组中测定指标变异系数的最小值 (4.26%) 和最大值 (19.63%) 均大于对照组中的最小值 (2.94%) 和最大值 (18.61%), 且各单项测定指标的变异系数也均大于对照组, 表明镉胁迫引起紫花苜蓿各单项测定指标变异程度的增加 (表 2)。由此可见, 紫花苜蓿种子萌发期各测定指标对镉胁迫的响应程度不同, 其中 RL 和 SVI 变化尤为明显, 表现为平均值的降幅较大。

### 2.2 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性测定指标相关性分析

镉处理后供试紫花苜蓿种子萌发期测定指标相关性分析表明, GI 与 RL、VI 与 SVI、SP 与 SL、RL 与 SFW 间均存在显著相关关系 ( $P < 0.05$ ), 而 GE 与 GP 和 GI、GP 与 GI、GI 与 VI、VI 与 RL 和 SFW、SL 与 SVI 间相关性均达到极显著水平 ( $P < 0.01$ ) (表 3)。镉胁迫后各测定指标的相关系数差异较大, 表明紫花苜蓿种子萌发期耐镉性并不是单一性状, 仅靠单项指标分析难以准确评价不同种质的耐镉性。因此, 需采用其他多元分析评价方法, 全面准确地鉴定紫花苜蓿种质的耐镉性差异。

表 2 紫花苜蓿种子萌发期各测定指标响应镉胁迫的差异分析

Table 2 Variance analysis of the measured indicators to cadmium stress during seed germination stage of alfalfa

| 指标<br>Indicators | 对照组<br>Control group/ (0 μmol·L <sup>-1</sup> CdCl <sub>2</sub> ) |           |              |                | 处理组<br>Treatment group/ (50 μmol·L <sup>-1</sup> CdCl <sub>2</sub> ) |           |              |                | 平均值下降幅度<br>Decrease in mean<br>value/% |
|------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|----------------|----------------------------------------------------------------------|-----------|--------------|----------------|----------------------------------------|
|                  | 平均值<br>Mean                                                       | 标准差<br>SD | 变异系数<br>CV/% | F 值<br>F value | 平均值<br>Mean                                                          | 标准差<br>SD | 变异系数<br>CV/% | F 值<br>F value |                                        |
|                  |                                                                   |           |              |                |                                                                      |           |              |                |                                        |
| 发芽势 GE           | 95.12                                                             | 3.42      | 3.60         | 4.146**        | 93.80                                                                | 4.10      | 4.37         | 13.520**       | 1.38                                   |
| 发芽率 GP           | 96.30                                                             | 2.83      | 2.94         | 3.989**        | 93.97                                                                | 4.00      | 4.26         | 12.972**       | 2.42                                   |
| 发芽指数 GI          | 42.69                                                             | 3.17      | 7.43         | 8.504**        | 35.10                                                                | 2.76      | 7.86         | 19.298**       | 17.77                                  |
| 种子活力指数 VI        | 1.08                                                              | 0.16      | 15.28        | 19.803**       | 0.78                                                                 | 0.12      | 15.75        | 28.036**       | 27.69                                  |
| 成苗率 SP           | 92.03                                                             | 4.04      | 4.39         | 6.094**        | 75.23                                                                | 6.07      | 8.07         | 9.964**        | 18.25                                  |
| 苗长 SL            | 1.35                                                              | 0.25      | 18.61        | 29.266**       | 1.07                                                                 | 0.21      | 19.63        | 21.453**       | 20.65                                  |
| 根长 RL            | 5.87                                                              | 0.58      | 9.85         | 6.807**        | 1.33                                                                 | 0.13      | 9.92         | 11.460**       | 77.31                                  |
| 幼苗鲜重 SFW         | 0.03                                                              | 0.00      | 12.07        | 16.110**       | 0.02                                                                 | 0.00      | 12.23        | 25.344**       | 12.15                                  |
| 幼苗活力指数 SVI       | 664.20                                                            | 66.53     | 10.02        | 6.994**        | 180.00                                                               | 20.51     | 11.39        | 10.652**       | 72.90                                  |

注:\*\*表示差异极显著( $P<0.01$ ),\*表示差异显著( $P<0.05$ ),下同  
Note: \*\*and \* means significant difference at the 0.01 and 0.05 level, the same as below

表 3 紫花苜蓿种子萌发期各测定指标响应镉胁迫的相关系数矩阵

Table 3 Correlation coefficient matrix of the measured indicators to cadmium stress during seed germination stage of alfalfa

| 指标<br>Indicator | 发芽势<br>GE | 发芽率<br>GP | 发芽指数<br>GI | 种子活力指数<br>VI | 成苗率<br>SP | 苗长<br>SL | 根长<br>RL | 幼苗鲜重<br>SFW |
|-----------------|-----------|-----------|------------|--------------|-----------|----------|----------|-------------|
| 发芽率 GP          | 0.991**   |           |            |              |           |          |          |             |
| 发芽指数 GI         | 0.586**   | 0.591**   |            |              |           |          |          |             |
| 种子活力指数 VI       | 0.192     | 0.215     | 0.667**    |              |           |          |          |             |
| 成苗率 SP          | 0.348     | 0.314     | 0.102      | -0.054       |           |          |          |             |
| 苗长 SL           | -0.274    | -0.276    | 0.063      | 0.302        | -0.491*   |          |          |             |
| 根长 RL           | -0.055    | -0.061    | 0.486*     | 0.580**      | -0.081    | 0.364    |          |             |
| 幼苗鲜重 SFW        | -0.150    | -0.122    | 0.205      | 0.861**      | -0.125    | 0.342    | 0.439*   |             |
| 幼苗活力指数 SVI      | 0.000     | -0.027    | 0.351      | 0.470*       | 0.273     | 0.611**  | 0.698**  | 0.384       |

2.3 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性测定指标主成分分析

基于 40 个紫花苜蓿种质材料的 9 个萌发与幼苗生长测定指标的绝对值,主成分分析结果表明,前 4 个综合指标  $CI_1$ ,  $CI_2$ ,  $CI_3$  和  $CI_4$  的贡献率共

90.727%,依次为 37.437%,30.601%,12.392% 和 10.297%(表 4)。因此, $CI_1\sim CI_4$ 是具有相同效果的 4 个因子,可将原本 9 个单项测定指标精简为 4 个代表性较强的独立新指标,为后续隶属函数值计算和综合评价分析奠定基础。

表 4 紫花苜蓿种子萌发期测定指标响应镉胁迫的主成分分析及综合指标贡献率

Table 4 Principal component analysis and contributive rate of the measured indicators to cadmium stress during seed germination stage of alfalfa

| 指标 Indicator                         | 综合指标 Comprehensive indicator |        |        |        |
|--------------------------------------|------------------------------|--------|--------|--------|
|                                      | $CI_1$                       | $CI_2$ | $CI_3$ | $CI_4$ |
| 发芽势 GE                               | 0.066                        | 0.335  | -0.134 | 0.182  |
| 发芽率 GP                               | 0.068                        | 0.333  | -0.176 | 0.154  |
| 发芽指数 GI                              | 0.212                        | 0.185  | -0.151 | 0.124  |
| 种子活力指数 VI                            | 0.268                        | 0.009  | -0.190 | -0.384 |
| 成苗率 SP                               | -0.002                       | 0.197  | 0.702  | -0.276 |
| 苗长 SL                                | 0.149                        | -0.211 | -0.106 | 0.558  |
| 根长 RL                                | 0.234                        | -0.074 | 0.171  | 0.122  |
| 幼苗鲜重 SFW                             | 0.209                        | -0.113 | -0.134 | -0.604 |
| 幼苗活力指数 SVI                           | 0.225                        | -0.062 | 0.488  | 0.304  |
| 特征值 Eigen values                     | 3.369                        | 2.754  | 1.115  | 0.927  |
| 贡献率 Contributive rate/%              | 37.437                       | 30.601 | 12.392 | 10.297 |
| 累计贡献率 Cumulative contributive rate/% | 37.437                       | 68.039 | 80.431 | 90.727 |

## 2.4 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性D值与综合评价

根据不同紫花苜蓿种质在种子萌发期某个测定指标值 $X_1$ ,计算综合指标值 $F(X_1)$ 和隶属函数值 $\mu(X_1)$ , $\mu(X_1)$ 值越大,说明该种质在 $F(X_1)$ 上表现出的耐镉性越强。以‘巨能995’和‘佰苜201’为例,镉处理后,前

者的 $\mu(X_1)$ 最大(1.000),说明其在 $F(X_1)$ 上表现出的耐镉性最强,而后者的 $\mu(X_1)$ 最小(0.000),说明其在 $F(X_1)$ 上表现出的耐镉性最弱。进一步计算单个综合指标贡献率在全部分综合指标累积贡献率中所占权重,分别为0.413,0.337,0.137和0.113(表5)。

表5 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性的综合指标值 $F(X_i)$ 、隶属函数值 $\mu(X_i)$ 、D值及综合评价

Table 5 Comprehensive indicator  $F(X_i)$ , membership function value  $\mu(X_i)$ , D value and comprehensive evaluation of cadmium tolerance during the seed germination stage of alfalfa

| 品种<br>Cultivars    | $F(X_1)$ | $F(X_2)$ | $F(X_3)$ | $F(X_4)$ | $\mu(X_1)$ | $\mu(X_2)$ | $\mu(X_3)$ | $\mu(X_4)$ | D值<br>D value | 综合评价及排序<br>Comprehensive evaluation and order |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|------------|------------|------------|------------|---------------|-----------------------------------------------|
| Bara520YQ          | 0.651    | 1.801    | 1.343    | -0.625   | 0.659      | 0.968      | 0.900      | 0.344      | 0.763         | 1                                             |
| 巨能995 Magna 995    | 2.102    | 0.408    | 0.274    | -0.101   | 1.000      | 0.629      | 0.615      | 0.481      | 0.763         | 2                                             |
| 燃力士 Celsius        | 0.476    | 1.935    | 0.618    | 0.189    | 0.618      | 1.000      | 0.707      | 0.556      | 0.754         | 3                                             |
| 皇冠 Phabulous       | 1.609    | -0.640   | 1.717    | 0.959    | 0.884      | 0.375      | 1.000      | 0.757      | 0.713         | 4                                             |
| 北纬30 Central 30    | -0.031   | 1.752    | 1.386    | -0.776   | 0.499      | 0.956      | 0.911      | 0.304      | 0.691         | 5                                             |
| 沃苜1号 Womu No.1     | 0.742    | 0.019    | 0.592    | 1.470    | 0.681      | 0.535      | 0.700      | 0.891      | 0.657         | 6                                             |
| 三得利 Sanditi        | 0.694    | 0.306    | 0.950    | -0.294   | 0.669      | 0.605      | 0.795      | 0.430      | 0.639         | 7                                             |
| SK3010             | 0.700    | -0.151   | 0.803    | 1.179    | 0.671      | 0.493      | 0.756      | 0.815      | 0.638         | 8                                             |
| 巨能耐盐 Magna salt    | 0.593    | -0.241   | 0.755    | 1.788    | 0.646      | 0.472      | 0.743      | 0.974      | 0.636         | 9                                             |
| 科洛塞奥 Colosseo      | 1.056    | -0.437   | -0.052   | 1.009    | 0.755      | 0.424      | 0.528      | 0.771      | 0.612         | 10                                            |
| 苜丰 Mufeng          | 1.429    | 0.167    | -1.922   | 0.420    | 0.842      | 0.571      | 0.029      | 0.617      | 0.611         | 11                                            |
| 巨能601 Magna 601    | -0.433   | 1.541    | 0.494    | -0.440   | 0.405      | 0.904      | 0.673      | 0.392      | 0.611         | 12                                            |
| 超能 Superpower      | 1.468    | 0.112    | -0.855   | -1.008   | 0.851      | 0.557      | 0.314      | 0.244      | 0.609         | 13                                            |
| WL366HQ            | -0.274   | 1.443    | 0.176    | -0.799   | 0.442      | 0.881      | 0.589      | 0.298      | 0.596         | 14                                            |
| 阿尔冈金 Algonquin     | -0.366   | 0.619    | 0.648    | 0.206    | 0.421      | 0.681      | 0.715      | 0.561      | 0.566         | 15                                            |
| 中兰2号 Zhonglan No.2 | 0.338    | -0.495   | -0.133   | 1.888    | 0.586      | 0.410      | 0.506      | 1.000      | 0.561         | 16                                            |
| MT4015             | 0.345    | 0.085    | -0.971   | 1.268    | 0.588      | 0.551      | 0.282      | 0.838      | 0.560         | 17                                            |
| 中苜3号 Zhongmu No.3  | 0.182    | 1.129    | -1.445   | -1.018   | 0.550      | 0.804      | 0.156      | 0.241      | 0.547         | 18                                            |
| 东苜2号 Dongmu No.2   | 0.001    | 0.880    | -0.420   | -1.222   | 0.507      | 0.744      | 0.430      | 0.188      | 0.542         | 19                                            |
| 陇东 Longdong        | 1.317    | -0.961   | -0.215   | -0.896   | 0.816      | 0.297      | 0.484      | 0.273      | 0.533         | 20                                            |
| WL712              | 1.176    | -1.070   | 0.050    | -0.852   | 0.783      | 0.270      | 0.555      | 0.285      | 0.522         | 21                                            |
| Bara218TR          | -1.076   | 1.069    | -0.120   | 0.552    | 0.254      | 0.790      | 0.510      | 0.651      | 0.516         | 22                                            |
| Bara210SC          | -0.718   | -0.007   | 0.797    | 1.067    | 0.338      | 0.528      | 0.754      | 0.786      | 0.510         | 23                                            |
| 角斗士 Colosseo       | 0.404    | -0.778   | 0.362    | -0.104   | 0.602      | 0.341      | 0.638      | 0.480      | 0.505         | 24                                            |
| 中苜1号 Zhongmu No.1  | 0.373    | -0.022   | -2.030   | 0.306    | 0.594      | 0.525      | 0.000      | 0.587      | 0.487         | 25                                            |
| 中苜4号 Zhongmu No.4  | -0.148   | 0.497    | -1.049   | -1.372   | 0.472      | 0.651      | 0.262      | 0.149      | 0.468         | 26                                            |
| Bara310SC          | -1.318   | 0.082    | 1.558    | 0.345    | 0.197      | 0.550      | 0.957      | 0.597      | 0.468         | 27                                            |
| 赛沃5 Sevo 5         | -0.035   | -0.019   | -0.390   | -1.942   | 0.498      | 0.526      | 0.437      | 0.000      | 0.444         | 28                                            |
| 巨能401 Magna 401    | -0.962   | 0.066    | -0.026   | 0.277    | 0.281      | 0.546      | 0.535      | 0.579      | 0.439         | 29                                            |
| 惊喜 Surprise        | -0.348   | -0.382   | -1.348   | 0.532    | 0.425      | 0.437      | 0.182      | 0.646      | 0.419         | 30                                            |
| 普拉图 Plato          | -0.239   | -0.835   | -1.153   | 0.599    | 0.451      | 0.327      | 0.234      | 0.663      | 0.402         | 31                                            |
| 金皇后 Golden Queen   | -1.750   | 0.691    | -1.434   | 1.148    | 0.096      | 0.698      | 0.159      | 0.807      | 0.388         | 32                                            |
| 斯贝德 Spyder         | -1.045   | -0.853   | 1.189    | -0.964   | 0.261      | 0.323      | 0.859      | 0.255      | 0.365         | 33                                            |
| 威龙 Veyron          | -0.614   | -1.473   | 0.777    | -0.280   | 0.363      | 0.172      | 0.749      | 0.434      | 0.360         | 34                                            |
| 巨能201 Magna 201    | -1.203   | 0.248    | -1.627   | -0.257   | 0.224      | 0.590      | 0.107      | 0.440      | 0.356         | 35                                            |
| 佰苜201 VNS          | -2.159   | 0.237    | 0.032    | -0.272   | 0.000      | 0.588      | 0.550      | 0.436      | 0.325         | 36                                            |
| 威斯顿 Weston         | -1.621   | -0.805   | -0.335   | 1.400    | 0.126      | 0.335      | 0.452      | 0.873      | 0.325         | 37                                            |
| 一级 First level     | 0.534    | -2.183   | -0.511   | -1.684   | 0.632      | 0.000      | 0.405      | 0.067      | 0.323         | 38                                            |
| 英斯特 Instict        | -0.554   | -1.913   | 0.037    | -0.094   | 0.377      | 0.066      | 0.552      | 0.482      | 0.307         | 39                                            |
| WL298HQ            | -1.295   | -1.826   | 1.476    | -1.605   | 0.203      | 0.087      | 0.936      | 0.088      | 0.253         | 40                                            |

利用上述 4 个综合指标权重值,结合  $F(X_i)$  值和  $\mu(X_i)$  值计算得到紫花苜蓿种子萌发期综合评价  $D$  值,并基于  $D$  值大小对 40 个种质材料的耐镉性强弱进行排序(表 5)。结果发现,‘Bara520YQ’的  $D$  值最大,为 0.763,说明该种质的耐镉性最强,而 ‘WL298HQ’的  $D$  值最小,为 0.253,表明其耐镉性最弱。

2.5 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性的系统聚类分析

根据耐镉性综合评价  $D$  值大小进行系统聚类分析,40 份紫花苜蓿种质的耐镉性被分为强、中和弱 3 类。其中,强耐镉性品种有 5 个,分别为 ‘Bara520YQ’ ‘巨能 995’ ‘燃力士’ ‘皇冠’ 和 ‘北纬 30’;中耐镉性品种有 22 个,包括 ‘三得利’ ‘SK3010’ ‘巨能耐盐’ ‘沃苜 1 号’ 等;弱耐镉性品种

有 13 个,包括 ‘一级’ ‘英斯特’ ‘威龙’ 等,其中最弱的为 ‘WL298HQ’(图 1)。

因此,基于  $D$  值大小排序和聚类分析结果,40 个紫花苜蓿种质在种子萌发期的耐镉性被划分为强耐镉性( $D \geq 0.691$ )、中耐镉性( $0.691 > D \geq 0.468$ )和弱耐镉性( $0.468 > D$ ) 3 个等级(表 6)。

表 6 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性等级划分

|                                                                                          |                        |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| Table 6 Classification of cadmium tolerance during the seed germination stage of alfalfa |                        |
| 相对耐镉性等级                                                                                  | $D$ 值                  |
| Relative cadmium tolerance level                                                         | $D$ value              |
| 强耐镉性 Strong cadmium tolerance                                                            | $D \geq 0.691$         |
| 中耐镉性 Medium cadmium tolerance                                                            | $0.691 > D \geq 0.468$ |
| 弱耐镉性 Weak cadmium tolerance                                                              | $0.468 > D$            |

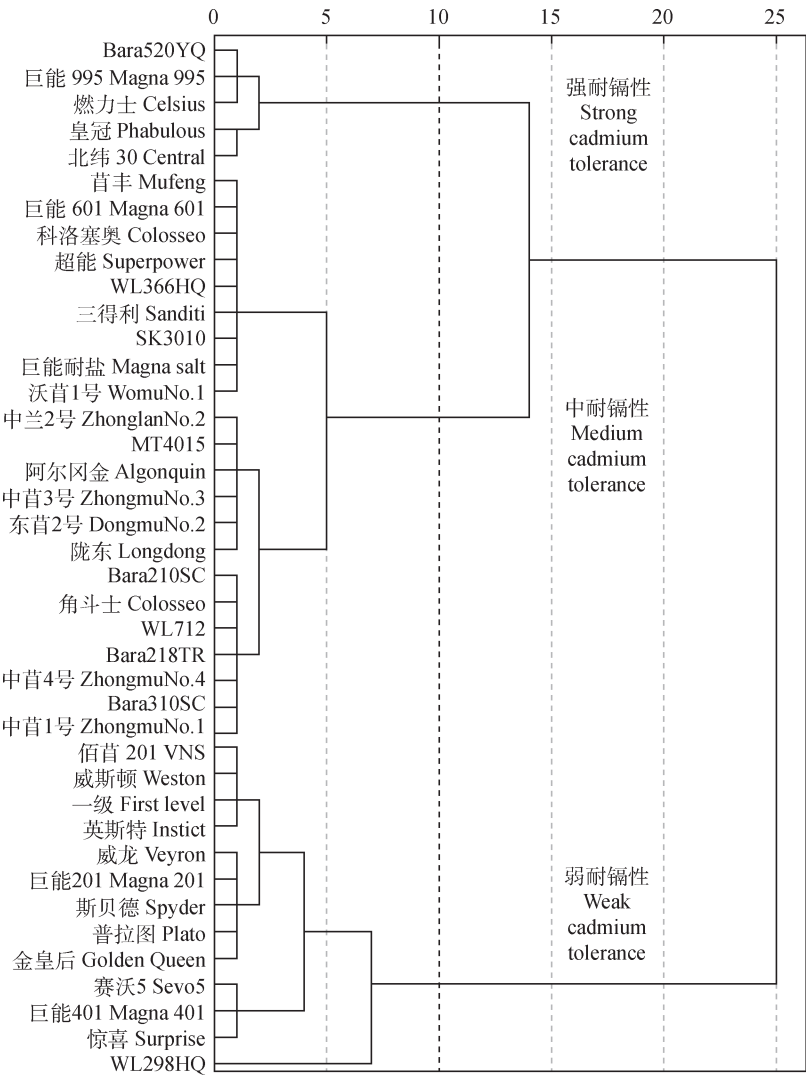


图 1 基于紫花苜蓿种子萌发期耐镉性综合评价  $D$  值的系统聚类分析

Fig. 1 Cluster analysis based on comprehensive evaluation value ( $D$  value) of cadmium tolerance during the seed germination stage of alfalfa

### 3 讨论

镉是我国农田污染中的首要重金属污染物,是植物非必需有毒重金属元素<sup>[15]</sup>。镉污染土壤使镉通过粮草到畜禽,最终积累于人体肾脏和肝脏,引发肾病、癌症等疾病,严重威胁我国粮饲安全和人体健康。因此,镉污染土壤亟待治理。利用修复性植物紫花苜蓿富集土壤中过量累积的镉元素,是一种绿色可行的有效措施。种子萌发是植物生命周期的初始阶段,在该时期植物自身对非生物胁迫因子的响应较为敏感<sup>[14]</sup>,能够快速感知土壤镉胁迫,是评价植物不同品种耐镉性和镉污染土壤修复效率的重要时期。因此,本试验选用了40个品种紫花苜蓿,针对其种子萌发期进行耐镉性研究评价,旨在筛选出强耐镉性材料。

#### 3.1 紫花苜蓿种子萌发对镉胁迫的响应

镉胁迫一般会通过渗透调节和离子毒害干扰细胞正常代谢和生理过程,从而影响种子吸胀、萌动和发芽,最终抑制种子萌发及幼苗生长<sup>[16]</sup>。镉胁迫影响种子萌发及幼苗生长的具体表现为种子发芽率降低,胚芽和胚根生长受抑制,幼苗叶片卷曲、失绿、萎蔫甚至病变坏死,这与本试验 $50\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CdCl}_2$ 胁迫下紫花苜蓿种子GP、RL和SVI等9个萌发期相关指标变化结果一致。

种子萌发时,土壤和种子中的 $\text{Cd}^{2+}$ 通过改变细胞内外渗透压影响其内部水分代谢,导致种子因缺乏充足水分而难以进行吸胀及其他萌发过程。种子露白后,通过胚根吸收进入种胚的 $\text{Cd}^{2+}$ 会降低细胞内水解酶活性,影响胚内营养物质分解利用,造成种胚缺乏充足营养和能量供给,影响根的正常发育,进而抑制种子萌发<sup>[17]</sup>。同时, $\text{Cd}^{2+}$ 入侵诱导细胞内产生更多活性氧,打破了细胞内氧化还原平衡,加剧膜脂、蛋白质和DNA氧化,损坏细胞膜、大分子和细胞器,扰乱细胞正常生理和代谢过程,最终表现为幼苗活力降低,幼苗生长受到抑制<sup>[18]</sup>。成苗率SP、苗长SL、根长RL、幼苗鲜重SFW及幼苗活力指数SVI是幼苗生长的重要指标,反映了幼苗存活、胚芽和胚根生长发育、整体生物量和幼苗活力情况,其相对数值大小可直观反映不同品种紫花苜蓿对镉胁迫响应的差异。本试验中,相对于SP、SL和SFW,镉胁迫导致RL和SVI降低幅度更大,分别为77.31%和72.90%,说明紫花苜蓿种子萌发

时不同部位对镉胁迫的响应程度不同,根部所受抑制作用更强,这与青葙(*Celosia argentea* L.)、荻(*Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth.)等种子萌发对镉胁迫的响应表现一致<sup>[19-20]</sup>。 $\text{Cd}^{2+}$ 通过降低根部分生组织细胞和染色体有丝分裂活性,尤其是在细胞初始生长阶段到S期,作为敏感刺激源的 $\text{Cd}^{2+}$ 会减少正常细胞分裂数量,从而抑制胚根生长<sup>[21]</sup>。根系作为 $\text{Cd}^{2+}$ 最先侵害和主要积累的部位,其所受镉胁迫的抑制效应会随胁迫时长增加和 $\text{Cd}^{2+}$ 积累而增强<sup>[22]</sup>。因此,镉胁迫下幼苗根系表现出较为显著的生长抑制现象。

当根部 $\text{Cd}^{2+}$ 积累到一定水平时,通过木质部和韧皮部被运输至幼苗地上部分,进而毒害整个植物体。随着幼苗体内 $\text{Cd}^{2+}$ 不断积累,当超过细胞耐受点时,叶绿体、线粒体、细胞质和液泡等膜结构完整性被破坏,内部成分流失,相关酶活性降低,光合作用、呼吸作用和水分吸收利用受阻,影响了幼苗生长速度和生长量,最终导致生物量减少<sup>[23]</sup>。

#### 3.2 紫花苜蓿种子萌发期耐镉性综合评价

紫花苜蓿种子萌发期耐镉性差异是由多个内外因素共同作用的结果,其中品种、评价指标和分析方法是重要的影响因素,仅利用单一品种、指标或分析方法进行评价存在可信度低且不全面的问题<sup>[24-25]</sup>,因此,紫花苜蓿种质萌发期耐镉性综合评价需基于多个品种和多项关键指标结合多元分析方法进行研究。范利荣等<sup>[26]</sup>基于相对发芽势、相对根长等多个萌发期相对测定指标,先利用主成分分析明确各指标综合权重,后利用模糊隶属函数法和聚类分析综合评价58份谷子[*Setaria italica* (L.) Beauv.]种质萌发期的耐镉性,并将其耐镉等级分成3类。尉贇等<sup>[27]</sup>以过氧化氢、叶绿素含量等7个生理指标为评价依据,通过综合指标权重、隶属函数值、系统聚类 and 回归方程多个方法评价27份甘薯[*Dioscorea esculenta* (Lour.) Burkill]幼苗耐镉性,并将叶绿素、脯氨酸等5个生理指标鉴定为可靠评价指标。李阿蕾等<sup>[28]</sup>也通过此类综合分析方法,基于相对镉害率、活力指数等7个指标,对239份长果种黄麻(*Corchorus olitorius* L.)萌发期耐镉性进行综合排序,并将根长、发芽指数和活力指数确定为综合耐镉指标。植物耐镉性是多个指标的综合体现,本试验单项指标间的相关性结果证实了这一点,如呈显著负相关的SP与SL,仅依据单项指标值

大小无法全面评价幼苗耐镉能力,因此需要结合多项指标进行评定。虽然各学者采用的评价指标不尽相同,但大多集中于形态和生理两方面,而表型性状是镉胁迫下植物生理和代谢变化更为直观的反应,也是比较简便、快捷的评价指标<sup>[29]</sup>。

基于前人研究,本试验选取GI,RL,SVI等9个萌发期指标,对40份紫花苜蓿种质采取多个分析方法综合评价供试材料耐镉性。主成分分析法通过数据降维、赋予权重,将原本信息重叠、相关性强的多个指标浓缩为彼此独立且权重占比不同的少量综合指标<sup>[30]</sup>。本试验利用主成分分析将原始指标整合为4个综合指标,累计贡献率超过90%,可覆盖原始指标的大多数信息。隶属函数法可基于多个指标,应用模糊数学原理,通过归一化方式消除指标间量纲差异,从而定量、准确反映植物耐镉能力<sup>[31]</sup>。最后,通过综合指标值、隶属函数值获得的综合评价 $D$ 值和聚类分析结果,量化耐镉性强弱顺序和等级,在弥补分析方法不足的同时更加精确地评定耐镉性<sup>[32]</sup>。因此,本试验采用上述方法综合分析发现,40个紫花苜蓿种质萌发期的耐镉性被分成3类,其中,‘Bara520YQ’ $D$ 值(0.763)最大,耐镉性最强,而‘WL298HQ’ $D$ 值(0.253)最小,耐镉性最弱。本试验为紫花苜蓿耐镉差异比较、耐镉育种改良和耐镉分子机制探索提供了基础材料和理论基础,而耐镉性极端材料的生理响应、差异基因挖掘及多组学分析仍有待进一步研究,以实现从表型-生理-基因-多组学全面揭示紫花苜蓿种子萌发期耐镉差异和调控机制,培育耐镉新种质。

## 4 结论

经 $50\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{CdCl}_2$ 处理后,40份紫花苜蓿种质的根长、幼苗活力指数等9个萌发期指标均降低,其中根长降幅最大,幼苗活力指数次之。结合耐镉性综合评价 $D$ 值和聚类分析,不同紫花苜蓿种质的耐镉性被分为强、中和弱3大类,并筛选出强耐镉性品种‘Bara520YQ’和弱耐镉性品种‘WL298HQ’。

## 参考文献

- [1] 曾今朵,王志勇,魏义长. 我国镉污染农田土壤修复技术研究进展[J]. 现代农业科技,2025(8):99-103  
ZENG J D, WANG Z Y, WEI Y C. Research progress on remediation technology for cadmium polluted farmland soil in China[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2025(8):99-103
- [2] 王斌,王玉昆,肖艳辉. 丁香罗勒(*Ocimum gratissimum*)叶片响应镉胁迫的比较转录组学分析[J]. 生物技术通报,2025,41(3):255-270  
WANG B, WANG Y K, XIAO Y H. Comparative transcriptomic analysis of clove basil (*Ocimum gratissimum*) leaves in response to cadmium stress[J]. Biotechnology Bulletin, 2025, 41(3):255-270
- [3] 李旭,晁赢,阎祥慧,等. 植物修复技术治理农田土壤重金属污染的研究进展[J]. 河南农业科学,2022,51(12):10-18  
LI X, CHAO Y, YAN X H, et al. Research progress of phytoremediation technology in treating heavy metal pollution in farmland soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(12):10-18
- [4] 刘泰. 生物有机肥提高重金属污染盐渍化土壤植物修复效率的互作机制[D]. 呼和浩特:内蒙古大学,2024:1-23  
LIU T. The interaction mechanism of bio-organic fertilizer promoting phytoremediation efficiency of heavy metals contaminated saline soil[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2024:1-23
- [5] 孙全航. 镉对紫丁香种子和幼苗的影响及钙缓解镉胁迫作用研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2024:1-6  
SUN Q H. Effects of cadmium on seeds and seedlings of *Syringa oblata* L. and effects of calcium on alleviating cadmium stress[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2024:1-6
- [6] 白旭琴,贾春云,李文栓,等. 叶面喷施硒肥对紫花苜蓿富硒降镉效果的影响[J]. 草业学报,2024,33(1):50-60  
BAI X Q, JIA C Y, LI W S, et al. An investigation of foliar spraying of selenium fertilizer for selenium enrichment and cadmium reduction in alfalfa[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2024, 33(1):50-60
- [7] KAREEM H A, ADEEL M, AZEEM M, et al. Antagonistic impact on cadmium stress in alfalfa supplemented with nano-zinc oxide and biochar via upregulating metal detoxification[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 443:130309
- [8] 孔海明,李开源,高双红,等. 根瘤菌对紫花苜蓿生物修复镉污染功能的影响[J]. 草地学报,2021,29(12):2763-2768  
KONG H M, LI K Y, GAO S H, et al. Effects of *Rhizobium* on the cadmium bioremediation function of alfalfa [J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(12):2763-2768
- [9] 闫志强,陈银萍,蓬苗苗,等. 镉胁迫对紫花苜蓿幼苗生理特性和镉富集的影响[J]. 广西植物,2019,39(2):218-227  
YAN Z Q, CHEN Y P, QU M M, et al. Effects of Cd stress on physiological characteristics of alfalfa and its Cd enrichment[J]. Guihaia, 2019, 39(2):218-227
- [10] 张杨杨,李希铭,高鹏,等. 不同浓度镉胁迫下6种草本植物的耐性及富集特征比较[J]. 草地学报,2021,29(6):1265-1276  
ZHANG Y Y, LI X M, GAO P, et al. Comparison of tolerance and enrichment characteristic for six herbaceous plant under different levels Cd stress[J]. Acta Agrestia Sinica, 2021, 29(6):1265-1276
- [11] 杨婧,张晓蓉,鲁松. 5种草坪草种在镉胁迫下的萌发响应[J]. 四川林业科技,2017,38(4):15-20, 24  
YANG J, ZHANG X R, LU S. Seed germination of five turf grasses under cadmium stress[J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2017, 38(4):15-20, 24

- [12] 张昭,金琪凡,史彦欣,等. 不同品种紫花苜蓿种子萌发期耐低温性综合评价[J]. 草地学报,2023,31(10):3050-3057  
ZHANG Z, JIN Q F, SHI Y X, et al. Comprehensive evaluation on low temperature tolerance of different varieties of alfalfa seeds during germination [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31 (10):3050-3057
- [13] 姚兴洁,孙庆赢,张昭,等. 61个品种紫花苜蓿种子萌发期耐盐性综合评价[J]. 草地学报,2025,33(4):1181-1191  
YAO X J, SUN Q Y, ZHANG Z, et al. Comprehensive evaluation on salt tolerance of 61 alfalfa cultivars during seed germination[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4):1181-1191
- [14] 袁嘉苗,李陈建,曾怡,等. 19份无芒雀麦种质萌发期的耐盐性评价[J]. 草地学报,2025,33(2):524-534  
YUAN J M, LI C J, ZENG Y, et al. Evaluation of salt tolerance of 19 *Bromus inermis* germplasm at germination stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2):524-534
- [15] 齐菲,付同刚,高会,等. 污水灌溉农田土壤镉污染研究进展[J]. 生态与农村环境学报,2022,38(1):10-20  
QI F, FU T G, GAO H, et al. Review on cadmium pollution from sewage irrigation in farmland soil[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(1):10-20
- [16] 周德,黄薇,唐卿雁,等. 外源谷胱甘肽对镉胁迫下4种紫花苜蓿光合作和抗氧化酶活性的影响[J]. 饲料研究,2024,47(14):75-80  
ZHOU D, HUANG W, TANG Q Y, et al. Effects of exogenous glutathione on photosynthesis and antioxidant enzymes activity of four *Medicago sativa* species under cadmium stress[J]. Feed Research, 2024, 47(14):75-80
- [17] LUO Y Y, HUANG X, SHA A J, et al. Analysis of growth physiological changes and metabolome of highland barley seedlings under cadmium (II) stress[J]. Environmental Pollution, 2025, 367:125664
- [18] WANG W W, YU L, ZHANG X X, et al. Effects of cadmium stress on seed germination and physiological-biochemical characteristics in okra: a comparative study of red and green varieties[J]. PeerJ, 2025, 13:e19498
- [19] 胡佳瑶,王悟敏,匡雪韶,等. 镉胁迫下青葙种子萌发及幼苗生理特性[J]. 草业科学,2022,39(7):1391-1398  
HU J Y, WANG W M, KUANG X S, et al. Seed germination and seedling physiological characteristics of *Celosia argentea* under cadmium stress[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(7):1391-1398
- [20] 贾英华,辛建攀,朱原,等. 外源褪黑素对镉胁迫下荻种子萌发和幼苗生长特性的影响[J]. 北方园艺,2025(12):74-82  
JIA Y H, XIN J P, ZHU Y, et al. Effects of exogenous melatonin on seed germination and seedling growth characteristics of thistle under cadmium stress[J]. Northern Horticulture, 2025(12):74-82
- [21] 于圆圆. 一氧化氮调控大豆幼苗镉胁迫耐受性的作用研究[D]. 新乡:河南师范大学,2024:1-7  
YU Y Y. Study on the mechanism of nitric oxide in the regulation of cadmium tolerance in soybean seedlings[D]. Xinxiang: Henan Normal University, 2024:1-7
- [22] AL-IMRAN, ISLAM M A, BISWAS S, et al. Enhancing cadmium stress resilience in rice seedlings via *Bacillus pseudomycoides*: modulation of heavy metal transporters and physiological responses for sustainable agriculture[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2025, 32 (26): 15896-15914
- [23] AHSAN M, RADICETTI E, MANCINELLI R, et al. Alleviation of cadmium stress and improved growth performance of periwinkle (*Catharanthus roseus* L.) by foliar application of zinc oxide nanoparticles[J]. South African Journal of Botany, 2025, 176:129-140
- [24] LIU C T, MAO B G, YUAN D Y, et al. Salt tolerance in rice: physiological responses and molecular mechanisms [J]. The Crop Journal, 2022, 10(1):13-25
- [25] 胡樱,王慧春,贾慧萍,等. 三种高寒牧草种子萌发期耐镉性研究[J]. 干旱区资源与环境,2023,37(2):171-176  
HU Y, WANG H C, JIA H P, et al. Cadmium tolerance of three alpine herbages during seed germination [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2023, 37(2):171-176
- [26] 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 different millet varieties[J]. Pratacultural Science, 2023, 40(9):2330-2339
- [27] 尉赞,廖乐琴,刘乃榕,等. 不同甘薯品种幼苗耐镉差异性综合评价及指标筛选[J]. 江苏农业科学,2025,53(1):38-45  
WEI Y, LIAO L, LIU N, et al. Comprehensive evaluation and index screening of cadmium tolerance difference in seedlings of different sweet potato varieties [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2025, 53(1):38-45
- [28] 李阿蕾,戴志刚,陈基权,等. 239份长果种黄麻种质资源萌发期耐镉性评价及耐镉资源筛选[J]. 作物学报,2023,49(10):2677-2699  
LI A L, DAI Z G, CHEN J Q, et al. Evaluation of cadmium tolerance in germination stage of 239 dark jute (*Corchorus olitorius* L.) germplasm resources and screening of cadmium tolerance resources[J]. Acta Agronomica Sinica, 2023, 49(10):2677-2699
- [29] LV Y Y, ZHAO Y T, HE Y S, et al. Synergistic effects of gamma-aminobutyric acid and melatonin on seed germination and cadmium tolerance in tomato[J]. Plant Signaling & Behavior, 2023, 18(1):2216001
- [30] ZHANG Y F, XU S Q, MO L L. Screening of grape genotypes for aluminum tolerance and evaluation on selecting indices [J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2020, 66(4):560-568
- [31] 李亚亮,刘海涛,刘玲,等. 高温干旱环境下11种园林绿化树种的水分生理特性研究[J]. 山东农业科学,2024,56(7):57-66  
LI Y L, LIU H T, LIU L, et al. Water physiological characteristics of 11 landscaping tree species under high temperature and drought environment [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(7):57-66
- [32] 曾怡,袁嘉苗,杨静,等. 23份紫花苜蓿材料萌发期的耐盐性综合评价[J]. 草地学报,2025,33(7):2249-2261  
ZENG Y, YUAN J M, YANG J, et al. Comprehensive evaluation of salt tolerance of 23 alfalfa materials during seeds germination stage[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(7):2249-2261