

尉 贇,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.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2025.01.006

不同甘薯品种幼苗耐镉差异性综合评价及指标筛选

尉 贇¹,廖乐琴¹,刘乃榕¹,陈丰艸¹,张利敏¹,张 贺¹,龙 伟¹,刘洪青¹,庞 博¹,
朱洪庆²,周全卢²,李 婷¹,康 乐¹

(1. 西华师范大学环境科学与工程学院/嘉陵江流域生态环境保护与污染防治南充市重点实验室,四川南充 637000;

2. 南充市农业科学院甘薯研究所/甘薯品种改良与应用南充市重点实验室,四川南充 637000)

摘要:为研究不同甘薯品种幼苗镉胁迫后的生理变化,通过筛选适宜在镉胁迫下种植的幼苗品种并利用耐镉差异性建立预测甘薯幼苗耐镉性的数学模型。以 27 个甘薯品种为试验材料,通过对甘薯幼苗水培,研究 450 $\mu\text{mol/L}$ 镉胁迫条件下各甘薯叶片的生理响应,结合主成分分析、隶属函数分析、逐步回归分析及系统聚类分析进行品种筛选及耐镉性评价。在镉胁迫条件下,参试材料各生理指标含量变化不同,且不同品种甘薯幼苗的耐镉系数也不同。通过甘薯幼苗耐镉性综合评价得出,绵紫薯 9 号耐镉性最强,南紫薯 023 耐镉性最差。通过聚类分析将甘薯幼苗耐镉胁迫类型分为镉敏感型、低耐镉型、中耐镉型和高耐镉型 4 种。建立适宜于同等胁迫条件下其他甘薯品种幼苗耐镉性鉴定的预测方程。发现供试甘薯材料中有 5 个品种的甘薯幼苗属于高耐镉型,分别是绵紫薯 9 号、渝苏 303、万薯 9 号、济薯 26 和苏薯 29。这 5 个高耐镉型品种的甘薯幼苗在镉处理后受胁迫影响相对较小,在 450 $\mu\text{mol/L}$ 及更低镉浓度污染环境下进行甘薯栽培种植时,可优先利用。本研究开发的甘薯幼苗耐镉性预测方程可用于同等镉胁迫条件下甘薯幼苗的耐镉性评价和预测。

关键词:甘薯;幼苗;耐镉性;综合评价;聚类分析

中图分类号:S531.037 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2025)01-0038-08

镉是一种有毒污染物,半衰期强、分布广,可被植物根系吸收并积累在植物组织和种子中,严重影响植物的存活和产量。镉还可以通过生物积累和生物放大作用对人类健康构成严重威胁^[1]。而筛

选耐镉性较强且累积低的作物在重度镉污染土壤上种植,是一种有效的技术手段。甘薯具有丰富的营养价值,同时具有抗旱、耐贫瘠及产量多等优点,兼具粮食作物及经济作物的属性^[2-3]。目前,在我国南方地区,随着土壤镉污染程度的日益严重,甘薯的存活率和产量大大降低。因此通过对南方地区广泛种植的甘薯品种的镉耐受性进行综合评价并筛选出镉胁迫下抗性较强的甘薯品种具有重要意义。胡玉龙等研究发现宁紫薯一号在镉胁迫下,叶绿素含量减少,光合作用减弱;丙二醛(MDA)含量和过氧化氢含量升高,细胞受损加速,导致宁紫薯一号抗性减弱^[4]。肖力力研究发现,随着土壤镉浓度的升高,甘薯各部位的镉含量呈增高趋势,且当浓度达到 30 mg/kg 时,甘薯生长受到抑制^[5]。靳艳玲等研究发现,在中度及以下镉污染的土壤中种植

收稿日期:2024-08-02

基金项目:国家甘薯现代农业产业技术体系建设专项(编号:CARS-10-B12-2021);四川省自然科学基金(编号:2024NSFSC1216);四川省育种攻关项目(编号:2021YFYZ0019);南充市科技支撑项目(编号:23JCYJPT0010);西华师范大学博士启动项目(编号:19E057)。

作者简介:尉 贇(2000—),女,山西临汾人,硕士研究生,研究方向为甘薯的非生物胁迫。E-mail:weiyun310805@163.com。

通信作者:李 婷,博士,讲师,研究方向为旱地作物高产高效栽培,E-mail:litng6314238@126.com;康 乐,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为植物逆境响应及抗性机制,E-mail:kangle@cwnu.cdu.cn。

[22]毕影东,樊 超,周广生,等. 北方寒区饲肥兼用型油菜综合利用研究进展[J]. 中国油料作物学报,2023,45(3):437-443.

[23]陈晓杰,杨保安,范家霖,等. 小麦杂种优势利用研究进展[J]. 种子,2022,41(1):66-73.

[24]Diers B W,McVetty P B E,Osborn T C. Relationship between heterosis and genetic distance based on restriction fragment length

polymorphism markers in oilseed rape (*Brassica napus* L.) [J]. Crop Science,1996,36(1):79-83.

[25]余泽文. 中国油菜强优势杂交种亲本的遗传多样性分析[D]. 武汉:华中农业大学,2020:1-8.

[26]李逢雨,孙锡发,冯文强,等. 麦秆、油菜秆还田腐解速率及养分释放规律研究[J]. 植物营养与肥料学报,2009,15(2):374-380.

的甘薯,其含镉量未超过限量标准,比花生和大豆的食用风险低^[6]。前人关于作物耐镉性分析及筛选也进行了一定的研究,如夏蔓蔓等采用单因素方差分析和隶属函数值法对 6 个马铃薯品种的耐镉性进行综合评价^[7]。吴月莹等采用主成分分析和隶属函数分析对 4 个玉米品种耐镉性进行综合评价,筛选耐镉品种^[8]。龙春丽等通过测定不同镉浓度下 2 个耐镉辣椒品种的生理指标来分析其抗性生理变化^[9]。徐天成等采用主成分分析、隶属函数分析对 12 个甜玉米品种的耐镉性进行综合评价,并通过聚类分析将 12 个品种分为敏感型、中间型和耐受型 3 类^[10]。

有关重金属镉胁迫下甘薯的研究大多集中在甘薯对镉的吸收、富集等方面,关于镉胁迫下不同甘薯品种幼苗耐镉性综合评价及抗性指标筛选缺乏系统研究。本研究在镉胁迫条件下,以 27 个甘薯品种为试验材料,结合主成分分析、隶属函数分析、逐步回归分析及聚类分析对各品种的耐镉性进行评价,同时建立数学模型高效确定筛选指标,以期甘薯品种幼苗耐镉性快速评价及耐镉品种快速筛选提供理论依据,同时为镉污染土地高效利用及土壤重金属污染生态修复提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2023 年 5 月 20 日到 2023 年 6 月 17 日在四川省南充市农业科学院温室进行,27 个品种甘薯幼苗采自国家甘薯体系南充综合试验站。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计 以 27 个甘薯品种(表 1)为试验材料进行水培培养,对照组(CK)用改良的霍格兰溶液培养,试验组在改良的霍格兰营养液中添加 450 $\mu\text{mol/L}$ CdCl_2 进行镉胁迫处理(以下用 Cd 处理代表),参照 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》^[11],镉含量超标,为重度污染。每 3 d 换 1 次营养液,15 d 后开始取样,将样品用铝箔纸迅速包好并用液氮处理,后置于 $-80\text{ }^\circ\text{C}$ 的超低温冰箱保存,用于测定各项生理指标。

1.2.2 测定指标及方法 用乙醇-紫外分光光度法测定叶绿素和类胡萝卜素含量^[12-13],单位: mg/g ;盐酸、甲醇-紫外分光光度法测定花青素含量^[14],单位: mg/g ;丙酮-紫外分光光度法测定过氧化氢含量^[15],单位: $\mu\text{mol/g}$;硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[16]单位: nmol/g ;茚三酮-分光光

表 1 供试材料信息

| 编号 | 名称 | 选育单位 | 类型 |
|----|----------|-----------------|------------------|
| 1 | 南紫薯 020 | 南充市农业科学院 | 鲜食型 |
| 2 | 万薯 9 号 | 重庆三峡农业科学院 | 兼用型 (鲜食和淀粉加工) |
| 3 | 南紫薯 023 | 南充市农业科学院 | 鲜食型 |
| 4 | 渝苏 303 | 江苏省农业科学院粮食作物研究所 | 兼用型 |
| 5 | 湘 541 | 湖南省作物研究所 | 淀粉加工型 |
| 6 | 普薯 12 | 普宁市农业科学研究所 | 鲜食型 |
| 7 | 湘薯 203 | 湖南省作物研究所 | 淀粉加工型 |
| 8 | 苏薯 29 | 江苏省农业科学院粮食作物研究所 | 兼用型 |
| 9 | 豫薯 8 号 | 洛阳农科所 | 兼用型 |
| 10 | 湘薯 7 号 | 湖南省作物研究所 | 鲜食型 |
| 11 | 绵紫薯 9 号 | 四川省绵阳市农业科学研究院 | 鲜食型 |
| 12 | 济薯 26 号 | 山东省农业科学院作物研究所 | 鲜食型 |
| 13 | 晋薯 3 号 | 山西省农科院棉花研究所 | 兼用型 |
| 14 | 济薯 9 号 | 山东省农业科学院 | 淀粉加工型 |
| 15 | 烟薯 25 | 烟台市农科院 | 鲜食型 |
| 16 | 西充紫薯 | 南充市农业科学院 | 鲜食型 |
| 17 | 渝薯 1 号 | 西南大学 | 淀粉加工型 |
| 18 | 渝紫 3 号 | 西南大学 | 鲜食型 |
| 19 | 渝薯 33 | 西南大学、四川省南充农科所 | 淀粉加工型 |
| 20 | 渝薯 68 | 西南大学 | 淀粉加工型 |
| 21 | 济薯 15 | 山东省农业科学院 | 淀粉加工型 |
| 22 | 渝红心薯 4 号 | 西南大学 | 鲜食型 |
| 23 | 渝薯 17 | 西南大学 | 淀粉加工型 |
| 24 | 内渝紫 2 号 | 四川省内江市农业科学院 | 兼用型 |
| 25 | 漯紫薯 10 号 | 漯河市农业科学院 | 淀粉加工型 |
| 26 | 黔薯 8 号 | 贵州省农业科学院 | 鲜食型 |
| 27 | 南渝薯 022 | 南充市农业科学院 | 鲜食型 |

度法测定脯氨酸含量,单位: $\mu\text{g/g}$;考马斯亮蓝 G-250 法测定可溶性蛋白含量^[17],单位: mg/g 。

1.2.3 数据分析 采用 Excel 2020 软件对数据进行整理及统计分析,采用 SPSS 22.0 进行主成分分析、隶属函数分析及逐步回归分析,采用 Origin 2021 对品种的耐镉性进行聚类分析。各测试指标耐镉系数 = Cd 处理测定值/CK 测定值。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下不同甘薯品种各单项指标含量变化及其耐镉系数分析

结合表 2、表 3 可以看出,参试材料在 Cd 处理下,叶绿素含量与对照组相比均下降,11 号下降幅度最小,为 5.47%,耐镉系数为 0.944;17 号下降幅度最大,为 59.35%,耐镉系数为 0.406。类胡萝卜

表 2 镉胁迫对不同甘薯品种各项生理指标的影响

| 编号 | 处理 | 叶绿素含量 (mg/g) | 类胡萝卜素含量 (mg/g) | 花青素含量 (mg/g) | 过氧化氢含量 ($\mu\text{mol/g}$) | 丙二醛含量 (nmol/g) | 脯氨酸含量 ($\mu\text{g/g}$) | 可溶性蛋白含量 (mg/g) |
|----|----|-------------------|-------------------|-------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|
| 1 | CK | 1.70 \pm 0.034a | 0.25 \pm 0.006a | 0.04 \pm 0.003a | 0.70 \pm 0.070b | 17.06 \pm 1.037b | 119.31 \pm 5.186b | 46.14 \pm 1.037b |
| | Cd | 1.12 \pm 0.073b | 0.18 \pm 0.008b | 0.02 \pm 0.004b | 2.44 \pm 0.147a | 46.70 \pm 2.211a | 242.51 \pm 10.380a | 79.49 \pm 2.211a |
| 2 | CK | 1.13 \pm 0.104a | 0.15 \pm 0.011a | 0.09 \pm 0.006a | 4.75 \pm 0.209a | 20.04 \pm 1.564a | 183.20 \pm 15.642b | 37.09 \pm 3.128b |
| | Cd | 0.97 \pm 0.069b | 0.13 \pm 0.004b | 0.07 \pm 0.002b | 5.17 \pm 0.139a | 21.82 \pm 2.076a | 185.65 \pm 10.379a | 72.67 \pm 2.076a |
| 3 | CK | 1.69 \pm 0.008a | 0.22 \pm 0.013a | 0.22 \pm 0.007a | 0.94 \pm 0.018b | 27.62 \pm 2.655b | 154.75 \pm 13.274a | 32.10 \pm 2.655b |
| | Cd | 0.72 \pm 0.051b | 0.08 \pm 0.005b | 0.10 \pm 0.002b | 2.67 \pm 0.103a | 73.29 \pm 1.546a | 248.72 \pm 7.728a | 53.00 \pm 1.546a |
| 4 | CK | 1.20 \pm 0.073a | 0.19 \pm 0.011a | 0.24 \pm 0.005a | 3.07 \pm 0.147b | 23.41 \pm 2.207b | 91.85 \pm 11.034b | 35.62 \pm 2.207b |
| | Cd | 0.87 \pm 0.019b | 0.11 \pm 0.001b | 0.20 \pm 0.001b | 5.72 \pm 0.038a | 34.21 \pm 2.306a | 227.98 \pm 11.531a | 81.57 \pm 2.306a |
| 5 | CK | 1.42 \pm 0.048a | 0.23 \pm 0.015a | 0.20 \pm 0.007a | 1.51 \pm 0.097b | 14.99 \pm 1.455b | 178.70 \pm 7.273b | 36.67 \pm 1.455b |
| | Cd | 1.14 \pm 0.016b | 0.13 \pm 0.001b | 0.17 \pm 0.000a | 2.78 \pm 0.033a | 27.12 \pm 1.477a | 179.53 \pm 7.384a | 76.21 \pm 1.477a |
| 6 | CK | 1.55 \pm 0.088a | 0.27 \pm 0.017a | 0.26 \pm 0.008a | 5.50 \pm 0.178b | 21.62 \pm 2.661b | 207.16 \pm 13.305b | 44.51 \pm 2.661b |
| | Cd | 0.96 \pm 0.068b | 0.12 \pm 0.007b | 0.24 \pm 0.003a | 9.92 \pm 0.136a | 36.52 \pm 2.040a | 249.91 \pm 10.201a | 96.14 \pm 1.140a |
| 7 | CK | 1.51 \pm 0.123a | 0.29 \pm 0.017a | 0.17 \pm 0.008a | 1.81 \pm 0.247b | 16.32 \pm 3.698b | 250.19 \pm 18.488b | 25.55 \pm 3.698b |
| | Cd | 1.08 \pm 0.012b | 0.15 \pm 0.007b | 0.14 \pm 0.003b | 3.25 \pm 0.024a | 30.03 \pm 1.815a | 261.41 \pm 9.073a | 51.66 \pm 1.815a |
| 8 | CK | 1.46 \pm 0.019a | 0.19 \pm 0.000a | 0.01 \pm 0.000a | 2.78 \pm 0.038b | 8.73 \pm 2.308b | 243.68 \pm 11.540b | 34.55 \pm 2.308b |
| | Cd | 0.82 \pm 0.013b | 0.11 \pm 0.001b | 0.01 \pm 0.000a | 5.07 \pm 0.027a | 16.08 \pm 1.993a | 281.28 \pm 9.966a | 57.00 \pm 1.993a |
| 9 | CK | 1.58 \pm 0.024a | 0.20 \pm 0.012a | 0.26 \pm 0.006a | 1.63 \pm 0.050b | 28.90 \pm 1.498b | 177.04 \pm 7.489b | 34.71 \pm 1.498b |
| | Cd | 0.74 \pm 0.005b | 0.10 \pm 0.001b | 0.19 \pm 0.000b | 3.15 \pm 0.010a | 52.98 \pm 1.546a | 185.04 \pm 7.729a | 58.10 \pm 1.546a |
| 10 | CK | 1.21 \pm 0.028a | 0.17 \pm 0.008a | 0.09 \pm 0.004a | 2.56 \pm 0.056b | 45.20 \pm 2.535b | 144.58 \pm 12.676b | 39.93 \pm 2.535b |
| | Cd | 0.80 \pm 0.016b | 0.10 \pm 0.002b | 0.06 \pm 0.001b | 6.43 \pm 0.033a | 67.79 \pm 2.440a | 277.75 \pm 12.202a | 92.00 \pm 2.440a |
| 11 | CK | 1.28 \pm 0.013a | 0.21 \pm 0.018a | 0.29 \pm 0.009a | 1.76 \pm 0.028b | 17.76 \pm 1.247a | 165.68 \pm 6.233b | 19.33 \pm 1.247b |
| | Cd | 1.21 \pm 0.006b | 0.15 \pm 0.002b | 0.27 \pm 0.001a | 2.80 \pm 0.014a | 19.26 \pm 2.060a | 176.88 \pm 10.301a | 45.95 \pm 2.060a |
| 12 | CK | 1.39 \pm 0.112a | 0.18 \pm 0.015a | 0.21 \pm 0.007a | 1.22 \pm 0.113b | 12.06 \pm 0.846b | 114.48 \pm 16.916b | 57.83 \pm 3.383b |
| | Cd | 1.08 \pm 0.026b | 0.13 \pm 0.013b | 0.11 \pm 0.006b | 5.46 \pm 0.053a | 39.03 \pm 2.400a | 289.37 \pm 11.998a | 190.35 \pm 2.400a |
| 13 | CK | 1.49 \pm 0.135a | 0.22 \pm 0.014a | 0.20 \pm 0.007a | 1.14 \pm 0.136b | 6.58 \pm 4.072b | 123.96 \pm 20.362b | 30.73 \pm 4.072b |
| | Cd | 1.10 \pm 0.027b | 0.11 \pm 0.011b | 0.05 \pm 0.006b | 2.48 \pm 0.056a | 14.00 \pm 2.501a | 177.85 \pm 12.505a | 46.65 \pm 2.501a |
| 14 | CK | 1.97 \pm 0.006a | 0.31 \pm 0.005a | 0.21 \pm 0.003a | 0.85 \pm 0.014b | 16.44 \pm 2.067b | 141.87 \pm 10.337b | 24.12 \pm 2.067b |
| | Cd | 1.07 \pm 0.075b | 0.12 \pm 0.003b | 0.18 \pm 0.002a | 1.60 \pm 0.152a | 26.69 \pm 2.275a | 142.60 \pm 11.374a | 51.68 \pm 2.275a |
| 15 | CK | 1.74 \pm 0.098a | 0.23 \pm 0.012a | 0.17 \pm 0.006a | 1.41 \pm 0.099a | 33.05 \pm 2.960a | 180.28 \pm 14.821b | 23.96 \pm 2.964b |
| | Cd | 1.25 \pm 0.014b | 0.16 \pm 0.000b | 0.17 \pm 0.000a | 1.45 \pm 0.030a | 34.75 \pm 1.784a | 240.01 \pm 8.918a | 44.08 \pm 1.784a |
| 16 | CK | 1.52 \pm 0.019a | 0.22 \pm 0.006a | 0.10 \pm 0.002a | 3.72 \pm 0.038b | 22.00 \pm 2.867b | 65.49 \pm 7.168b | 35.23 \pm 2.867b |
| | Cd | 0.76 \pm 0.053b | 0.09 \pm 0.004b | 0.08 \pm 0.002b | 6.05 \pm 0.108a | 31.57 \pm 1.619a | 110.79 \pm 8.094a | 53.51 \pm 1.619a |
| 17 | CK | 1.55 \pm 0.095a | 0.21 \pm 0.002a | 0.38 \pm 0.001a | 4.22 \pm 0.191b | 25.43 \pm 2.859b | 121.55 \pm 14.293b | 42.32 \pm 2.859b |
| | Cd | 0.63 \pm 0.030b | 0.07 \pm 0.000b | 0.19 \pm 0.000b | 16.04 \pm 0.061a | 63.67 \pm 2.725a | 290.86 \pm 13.624a | 92.11 \pm 2.725a |
| 18 | CK | 1.78 \pm 0.070a | 0.25 \pm 0.010a | 0.07 \pm 0.005a | 1.02 \pm 0.140b | 40.18 \pm 2.103b | 162.09 \pm 10.514b | 32.54 \pm 2.103b |
| | Cd | 0.90 \pm 0.001b | 0.11 \pm 0.001b | 0.06 \pm 0.000a | 1.85 \pm 0.035a | 51.31 \pm 2.633a | 324.14 \pm 13.166a | 52.42 \pm 2.633a |
| 19 | CK | 1.38 \pm 0.038a | 0.22 \pm 0.002a | 0.18 \pm 0.001a | 1.28 \pm 0.076b | 35.00 \pm 1.144b | 134.06 \pm 5.719b | 39.83 \pm 1.144b |
| | Cd | 0.94 \pm 0.066b | 0.11 \pm 0.003b | 0.09 \pm 0.002b | 4.55 \pm 0.134a | 78.29 \pm 2.005a | 381.32 \pm 10.024a | 45.75 \pm 2.005a |
| 20 | CK | 2.01 \pm 0.002a | 0.24 \pm 0.005a | 0.21 \pm 0.002a | 2.19 \pm 0.005b | 19.92 \pm 0.361b | 83.08 \pm 1.804b | 33.83 \pm 0.361b |
| | Cd | 0.99 \pm 0.030b | 0.12 \pm 0.003b | 0.18 \pm 0.001b | 4.28 \pm 0.061a | 26.82 \pm 2.741a | 150.74 \pm 13.706a | 62.31 \pm 2.741a |
| 21 | CK | 1.31 \pm 0.004a | 0.16 \pm 0.003a | 0.10 \pm 0.001a | 0.70 \pm 0.009b | 31.94 \pm 0.131b | 97.08 \pm 0.654b | 51.43 \pm 0.131a |
| | Cd | 0.81 \pm 0.017b | 0.10 \pm 0.001b | 0.03 \pm 0.000a | 3.10 \pm 0.036a | 84.23 \pm 2.692a | 225.95 \pm 13.459a | 52.19 \pm 2.692a |
| 22 | CK | 1.58 \pm 0.036a | 0.19 \pm 0.002a | 0.09 \pm 0.001a | 0.87 \pm 0.072b | 31.02 \pm 1.081b | 122.73 \pm 5.405b | 36.04 \pm 1.081a |
| | Cd | 0.80 \pm 0.010b | 0.10 \pm 0.001b | 0.05 \pm 0.000b | 4.67 \pm 0.021a | 143.57 \pm 3.616a | 260.87 \pm 18.079a | 41.21 \pm 3.616a |
| 23 | CK | 1.80 \pm 0.035a | 0.30 \pm 0.004a | 0.29 \pm 0.002a | 2.55 \pm 0.071b | 26.21 \pm 1.065b | 112.64 \pm 5.326b | 24.72 \pm 1.065a |
| | Cd | 1.19 \pm 0.050b | 0.16 \pm 0.011b | 0.21 \pm 0.006b | 7.50 \pm 0.101a | 65.62 \pm 1.517a | 270.39 \pm 7.585a | 25.61 \pm 1.517a |
| 24 | CK | 1.37 \pm 0.100a | 0.16 \pm 0.020a | 0.17 \pm 0.010a | 1.45 \pm 0.201b | 27.81 \pm 3.021a | 164.87 \pm 15.104b | 26.30 \pm 3.021b |
| | Cd | 0.79 \pm 0.038b | 0.10 \pm 0.007b | 0.16 \pm 0.003a | 2.70 \pm 0.077a | 32.36 \pm 1.152a | 183.66 \pm 5.760a | 50.75 \pm 1.152a |
| 25 | CK | 1.62 \pm 0.002a | 0.20 \pm 0.005a | 0.19 \pm 0.002a | 1.11 \pm 0.006b | 26.13 \pm 1.693b | 169.65 \pm 8.466b | 28.00 \pm 1.693b |
| | Cd | 0.91 \pm 0.025b | 0.12 \pm 0.008b | 0.18 \pm 0.004a | 1.60 \pm 0.052a | 37.99 \pm 3.872a | 259.00 \pm 19.360a | 38.84 \pm 3.872a |
| 26 | CK | 1.75 \pm 0.002a | 0.25 \pm 0.006a | 0.10 \pm 0.003a | 1.46 \pm 0.006b | 9.43 \pm 1.006b | 161.89 \pm 10.059b | 37.54 \pm 2.012b |
| | Cd | 0.81 \pm 0.057b | 0.10 \pm 0.006b | 0.05 \pm 0.003b | 4.00 \pm 0.115a | 24.70 \pm 1.722a | 547.07 \pm 8.608a | 44.19 \pm 1.722a |
| 27 | CK | 1.32 \pm 0.051a | 0.20 \pm 0.003a | 0.17 \pm 0.001a | 1.15 \pm 0.102b | 9.75 \pm 0.767b | 158.38 \pm 7.674a | 46.95 \pm 1.535b |
| | Cd | 0.93 \pm 0.053b | 0.12 \pm 0.005b | 0.07 \pm 0.003b | 3.58 \pm 0.106a | 24.12 \pm 1.591a | 179.90 \pm 7.956a | 55.44 \pm 1.591a |

注:同列数据后不同小写字母表示同一品种不同处理间差异显著($P < 0.05$)。表 3 同。

表 3 镉胁迫条件下不同甘薯幼苗各单项生理指标的耐镉系数

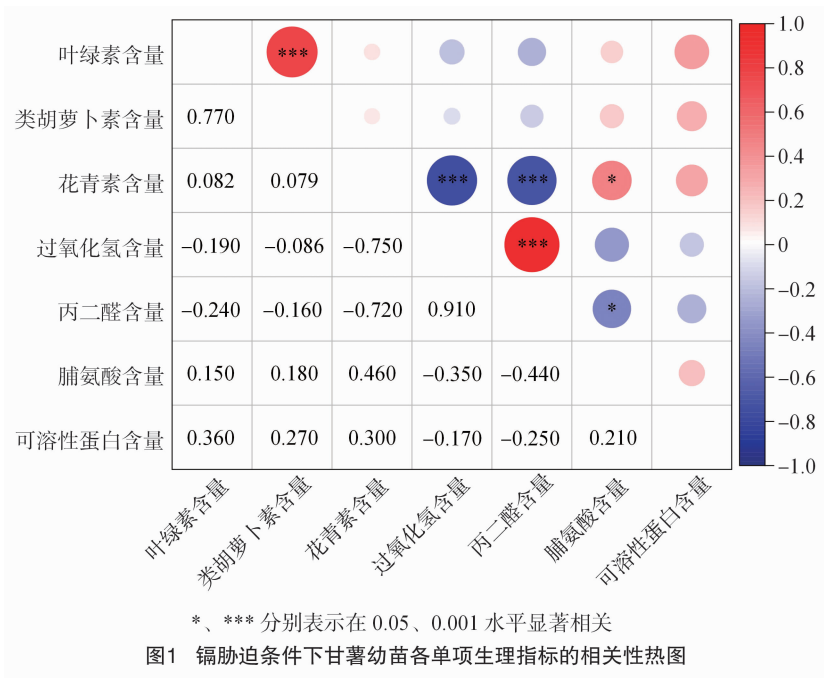
| 编号 | 耐镉系数 | | | | | | |
|----|-------|---------|-------|--------|-------|-------|---------|
| | 叶绿素含量 | 类胡萝卜素含量 | 花青素含量 | 过氧化氢含量 | 丙二醛含量 | 脯氨酸含量 | 可溶性蛋白含量 |
| 1 | 0.656 | 0.729 | 0.496 | 3.481 | 2.737 | 1.520 | 1.723 |
| 2 | 0.860 | 0.842 | 0.759 | 1.088 | 1.089 | 1.633 | 1.959 |
| 3 | 0.431 | 0.375 | 0.474 | 2.838 | 2.654 | 1.073 | 1.651 |
| 4 | 0.726 | 0.557 | 0.811 | 1.863 | 1.461 | 2.482 | 2.290 |
| 5 | 0.804 | 0.589 | 0.858 | 1.842 | 1.809 | 1.318 | 2.078 |
| 6 | 0.619 | 0.454 | 0.905 | 1.805 | 1.690 | 1.402 | 2.160 |
| 7 | 0.718 | 0.523 | 0.831 | 1.790 | 1.840 | 1.426 | 2.022 |
| 8 | 0.561 | 0.579 | 0.833 | 1.820 | 1.841 | 2.809 | 1.650 |
| 9 | 0.471 | 0.497 | 0.746 | 1.914 | 1.833 | 1.544 | 1.674 |
| 10 | 0.660 | 0.593 | 0.693 | 2.508 | 1.500 | 1.944 | 2.304 |
| 11 | 0.944 | 0.739 | 0.938 | 1.592 | 1.085 | 3.143 | 2.377 |
| 12 | 0.779 | 0.733 | 0.511 | 4.494 | 3.237 | 1.350 | 3.291 |
| 13 | 0.742 | 0.516 | 0.235 | 2.174 | 2.130 | 1.435 | 1.518 |
| 14 | 0.544 | 0.391 | 0.844 | 1.875 | 1.624 | 1.533 | 2.142 |
| 15 | 0.720 | 0.701 | 0.967 | 1.032 | 1.051 | 1.404 | 1.840 |
| 16 | 0.501 | 0.406 | 0.807 | 1.627 | 1.435 | 1.692 | 1.519 |
| 17 | 0.406 | 0.337 | 0.502 | 3.801 | 2.504 | 1.635 | 2.176 |
| 18 | 0.507 | 0.435 | 0.983 | 1.809 | 1.277 | 2.119 | 1.563 |
| 19 | 0.682 | 0.504 | 0.507 | 3.544 | 2.237 | 1.609 | 1.148 |
| 20 | 0.493 | 0.486 | 0.855 | 1.959 | 1.347 | 1.814 | 1.842 |
| 21 | 0.620 | 0.627 | 0.314 | 4.633 | 2.637 | 1.479 | 1.015 |
| 22 | 0.509 | 0.504 | 0.494 | 5.368 | 4.628 | 1.475 | 1.144 |
| 23 | 0.660 | 0.533 | 0.688 | 2.764 | 2.504 | 1.164 | 1.036 |
| 24 | 0.580 | 0.649 | 0.924 | 1.431 | 1.164 | 1.976 | 1.929 |
| 25 | 0.562 | 0.569 | 0.972 | 1.438 | 1.453 | 2.077 | 1.388 |
| 26 | 0.463 | 0.403 | 0.520 | 2.715 | 2.619 | 1.798 | 1.177 |
| 27 | 0.707 | 0.621 | 0.433 | 3.101 | 2.474 | 1.136 | 1.181 |

素含量与对照组相比均下降,其中 2 号下降幅度最小,为 13.33%,耐镉系数为 0.842;17 号下降幅度最大,为 66.67%,耐镉系数为 0.337。花青素含量与对照组相比均下降,其中 8 号与 15 号与 CK 对比没有下降,降幅为最小;13 号下降幅度最大,为 75.00%,耐镉系数为 0.235。过氧化氢含量与对照组相比均增加,其中 15 号上升幅度最小,为 2.84%,耐镉系数为 1.032;22 号上升幅度最大,为 436.78%,耐镉系数为 5.367。丙二醛含量与对照组相比均增加,其中 15 号上升幅度最小,为 4.89%,耐镉系数为 1.051;22 号上升幅度最大,为 362.83%,耐镉系数为 4.627。脯氨酸含量与对照组相比均增加,其中 26 号上升幅度最大,为 237.92%,耐镉系数为 3.379;5 号上升幅度最小,为 0.46%,耐镉系数为 1.005。可溶性蛋白含量与对

照组相比均有所增加,其中 12 号上升幅度最大,为 229.15%,耐镉系数为 3.291;21 号上升幅度最小,为 1.43%,耐镉系数为 1.014。综上可得,不同品种各指标含量变化和耐镉系数均不同。因此,用各单项生理指标的耐镉系数对甘薯耐镉性进行评价,其结果可能存在差异。

2.2 甘薯幼苗各单项生理指标相关性分析

如图 1 所示,镉胁迫条件下,甘薯幼苗各生理指标间存在不同程度的相关性。叶绿素含量与类胡萝卜素含量呈极显著正相关,相关系数为 0.770;花青素含量与过氧化氢含量呈极显著负相关,相关系数为 -0.750;丙二醛含量与过氧化氢含量呈极显著正相关,相关系数为 0.910。综合表 2、表 3 可知,各指标在不同甘薯品种耐镉性中所起的作用不同。因此,利用单项指标不能准确直观地反映甘薯的耐



镉性,须结合主成分分析及隶属函数综合分析各甘薯品种的耐镉性。

2.3 镉胁迫下甘薯幼苗耐镉性综合评价

用主成分分析法^[16]对本研究的 7 个单项指标进行分析,如表 4 所示,得到新的 7 个综合指标,前

4 个的贡献率分别为 45.241%、24.666%、11.487%和 10.600%,累计贡献率达 91.994%,表明这 4 个指标基本能反映出原有指标所包含的绝大部分信息,可以用这 4 个新的相互独立的综合指标来代替原先的 7 个指标。

表 4 主成分分析结果

| 指标 | 各主成分载荷 | | | |
|------------------|--------|--------|--------|--------|
| | PC1 | PC2 | PC3 | PC4 |
| 叶绿素含量(X_1) | 0.149 | 0.460 | -0.243 | -0.066 |
| 类胡萝卜素含量(X_2) | 0.128 | 0.470 | -0.291 | 0.139 |
| 花青素含量(X_3) | 0.259 | -0.202 | 0.095 | -0.073 |
| 过氧化氢含量(X_4) | -0.269 | 0.199 | 0.308 | 0.285 |
| 丙二醛含量(X_5) | -0.281 | 0.153 | 0.220 | 0.171 |
| 脯氨酸含量(X_6) | 0.191 | -0.049 | 0.283 | 1.030 |
| 可溶性蛋白含量(X_7) | 0.149 | 0.199 | 0.935 | -0.412 |
| 特征根 | 3.167 | 1.727 | 0.804 | 0.742 |
| 贡献率(%) | 45.241 | 24.666 | 11.487 | 10.600 |
| 累计贡献率(%) | 45.241 | 69.907 | 81.394 | 91.994 |

注:PC1、PC2、PC3、PC4 分别表示主成分 1、主成分 2、主成分 3、主成分 4。

在各指标特征根、贡献率和累计贡献率基础上,通过隶属函数分析^[16]得到 27 个甘薯品种的综合评价价值 D 值。从表 5 可以看出,不同甘薯品种耐镉性排序为绵紫薯 9 号>渝苏 303>万薯 9 号>济薯 26>苏薯 29>湘薯 7 号>内渝紫 2 号>烟薯 25>湘 541>漯紫薯 10 号>南紫薯 020>湘薯 203>渝紫 3 号>普薯 12>渝薯 68>济薯 9 号>晋薯 3 号>渝薯 33>豫薯 8 号>西充紫薯>南渝薯

022>济薯 15>渝薯 1 号>渝薯 17>黔薯 8 号>渝红心薯 4 号>南紫薯 023。

2.4 镉胁迫下甘薯幼苗各品种系统聚类分析

对 27 个甘薯品种进行系统聚类分析,由图 2 可见,在欧氏距离为 14 处可分为 4 个类群。第 1 类群为绵紫薯 9 号、渝苏 303、万薯 9 号、济薯 26 和苏薯 29 品种,此类群综合评价价值(D 值)最高,耐镉性最好,为强耐镉群体。第 2 类群为湘薯 7 号、内渝紫 2

表 5 镉胁迫下不同甘薯品种幼苗的耐镉性综合评价

| 编号 | F_1 | F_2 | F_3 | F_4 | U_1 | U_2 | U_3 | U_4 | D 值 | 排名 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----|
| 1 | -0.62 | 1.27 | -0.26 | 0.32 | 0.38 | 0.68 | 0.30 | 0.46 | 0.46 | 11 |
| 2 | 1.29 | 1.48 | -1.38 | -0.65 | 0.82 | 0.73 | 0.03 | 0.19 | 0.63 | 3 |
| 3 | -1.27 | -0.90 | 0.36 | -1.02 | 0.24 | 0.14 | 0.45 | 0.09 | 0.22 | 27 |
| 4 | 1.03 | 0.17 | 0.95 | 0.89 | 0.76 | 0.41 | 0.59 | 0.62 | 0.63 | 2 |
| 5 | 0.57 | 0.61 | -0.22 | -1.35 | 0.66 | 0.51 | 0.31 | 0.00 | 0.50 | 9 |
| 6 | 0.39 | -0.57 | 0.60 | -1.35 | 0.62 | 0.22 | 0.50 | 0.00 | 0.43 | 14 |
| 7 | 0.41 | 0.06 | 0.03 | -1.11 | 0.62 | 0.38 | 0.37 | 0.07 | 0.46 | 12 |
| 8 | 0.72 | -0.55 | 0.32 | 2.25 | 0.69 | 0.23 | 0.44 | 1.00 | 0.57 | 5 |
| 9 | -0.08 | -0.92 | -0.04 | -0.43 | 0.51 | 0.14 | 0.35 | 0.26 | 0.36 | 19 |
| 10 | 0.48 | 0.37 | 0.83 | 0.02 | 0.64 | 0.46 | 0.56 | 0.38 | 0.55 | 6 |
| 11 | 2.09 | 1.31 | 0.56 | 2.12 | 1.00 | 0.69 | 0.49 | 0.96 | 0.85 | 1 |
| 12 | -0.49 | 2.59 | 2.69 | -0.99 | 0.41 | 1.00 | 1.00 | 0.10 | 0.61 | 4 |
| 13 | -0.62 | 0.59 | -0.98 | -0.35 | 0.38 | 0.51 | 0.13 | 0.28 | 0.37 | 17 |
| 14 | 0.23 | -1.02 | 0.90 | -1.07 | 0.58 | 0.11 | 0.57 | 0.08 | 0.40 | 16 |
| 15 | 1.15 | 0.25 | -1.09 | -1.22 | 0.79 | 0.43 | 0.10 | 0.04 | 0.52 | 8 |
| 16 | 0.16 | -1.42 | -0.24 | -0.29 | 0.56 | 0.01 | 0.30 | 0.30 | 0.35 | 20 |
| 17 | -1.11 | -0.86 | 2.01 | -0.08 | 0.27 | 0.15 | 0.84 | 0.35 | 0.32 | 23 |
| 18 | 0.60 | -1.48 | 0.10 | 0.56 | 0.66 | 0.00 | 0.38 | 0.53 | 0.43 | 13 |
| 19 | -0.78 | 0.20 | -0.89 | 0.61 | 0.35 | 0.41 | 0.15 | 0.54 | 0.36 | 18 |
| 20 | 0.38 | -1.03 | 0.34 | -0.15 | 0.61 | 0.11 | 0.44 | 0.33 | 0.42 | 15 |
| 21 | -1.45 | 0.85 | -1.06 | 1.04 | 0.20 | 0.57 | 0.11 | 0.66 | 0.34 | 22 |
| 22 | -2.31 | 0.41 | 0.48 | 1.39 | 0.00 | 0.47 | 0.47 | 0.76 | 0.27 | 26 |
| 23 | -0.67 | -0.03 | -1.44 | -0.40 | 0.37 | 0.36 | 0.02 | 0.27 | 0.31 | 24 |
| 24 | 1.00 | -0.31 | -0.10 | 0.07 | 0.75 | 0.29 | 0.34 | 0.39 | 0.53 | 7 |
| 25 | 0.74 | -0.88 | -0.71 | 0.68 | 0.69 | 0.15 | 0.19 | 0.56 | 0.47 | 10 |
| 26 | -0.96 | -1.01 | -0.23 | 0.85 | 0.31 | 0.11 | 0.31 | 0.61 | 0.29 | 25 |
| 27 | -0.88 | 0.81 | -1.51 | -0.33 | 0.33 | 0.56 | 0.00 | 0.28 | 0.34 | 21 |

注: $F_1 \sim F_4$ 依次表示综合指标值 1~4; $U_1 \sim U_4$ 分别表示 $F_1 \sim F_4$ 对应的隶属函数值。

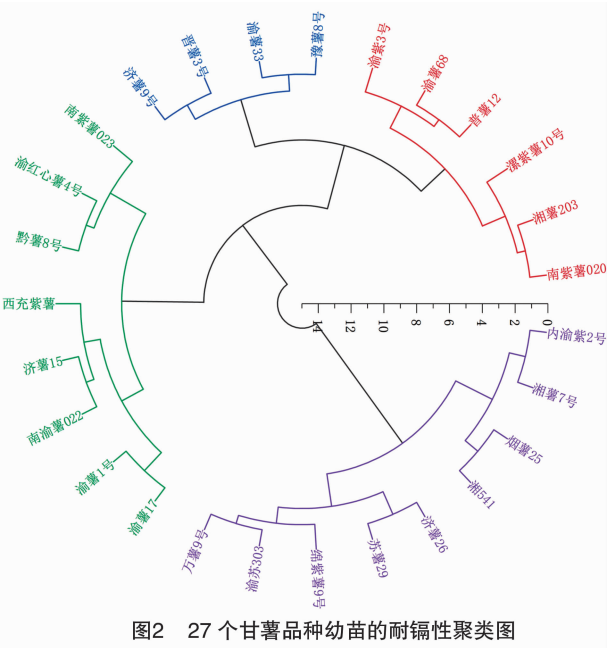


图2 27 个甘薯品种幼苗的耐镉性聚类图

号、烟薯 25、湘 541、溧紫薯 10 号、南紫薯 020、湘薯 203,此类群综合评价值排在 6~12 位,耐镉性较好,为中耐镉群体。第 3 类群为渝薯 3 号、普薯 12、渝薯 68、济薯 9 号、晋薯 3 号、渝薯 33、豫薯 8 号,此类群综合评价值排在 13~19 位,耐镉性一般,为低耐镉群体。第 4 类群为西充紫薯、南渝薯 022、济薯 15、渝薯 1 号、渝薯 17、黔薯 8 号、渝红心薯 4 号、南紫薯 023,此类群综合评价值排在 20~27 位,耐镉性较差,为镉敏感类群。

2.5 回归方程建立及不同甘薯品种耐镉性鉴定指标筛选

在上述研究基础上,以耐镉性综合评价值 D 值为因变量,以各单项指标的耐镉系数为自变量,通过逐步回归分析,建立可用于不同甘薯品种幼苗耐镉性评价的数学模型,得到方程: $D = -0.349 + 0.294X_1 + 0.123X_6 + 0.086X_7 + 0.320X_2 + 0.099X_3$

($R^2 = 0.998, P = 0.000\ 1$)。如表 6 所示,各品种估计精度均在 93% 以上,表明方程中的 5 个指标对甘薯耐镉性有显著影响,可用于甘薯耐镉性评价。同时,若在相同条件下分析测定其他甘薯品种的耐镉性,可用该方程预测。

表 6 回归方程的精度分析

| 编号 | 回归值 | 原始值 | 差值 | 估计精度 (%) |
|----|----------|----------|-----------|----------|
| 1 | 0.461 35 | 0.461 28 | -0.000 07 | 99.98 |
| 2 | 0.617 66 | 0.625 47 | 0.007 81 | 98.75 |
| 3 | 0.218 74 | 0.221 47 | 0.002 73 | 98.77 |
| 4 | 0.625 31 | 0.626 78 | 0.001 47 | 99.77 |
| 5 | 0.501 69 | 0.499 33 | -0.002 36 | 99.53 |
| 6 | 0.426 10 | 0.425 75 | -0.000 35 | 99.92 |
| 7 | 0.461 00 | 0.459 45 | -0.001 55 | 99.66 |
| 8 | 0.570 97 | 0.568 78 | -0.002 19 | 99.62 |
| 9 | 0.356 09 | 0.359 91 | 0.003 82 | 98.94 |
| 10 | 0.540 75 | 0.547 84 | 0.007 09 | 98.71 |
| 11 | 0.848 67 | 0.847 64 | -0.001 04 | 99.88 |
| 12 | 0.614 15 | 0.608 83 | -0.005 32 | 99.13 |
| 13 | 0.364 50 | 0.373 81 | 0.009 31 | 97.51 |
| 14 | 0.392 61 | 0.395 02 | 0.002 41 | 99.39 |
| 15 | 0.513 78 | 0.518 41 | 0.004 63 | 99.11 |
| 16 | 0.346 63 | 0.351 76 | 0.005 13 | 98.54 |
| 17 | 0.316 17 | 0.320 31 | 0.004 14 | 98.71 |
| 18 | 0.431 46 | 0.433 50 | 0.002 04 | 99.53 |
| 19 | 0.359 71 | 0.362 65 | 0.002 94 | 99.19 |
| 20 | 0.417 89 | 0.423 91 | 0.006 02 | 98.58 |
| 21 | 0.333 99 | 0.340 15 | 0.006 17 | 98.19 |
| 22 | 0.290 53 | 0.270 67 | -0.019 86 | 93.16 |
| 23 | 0.315 92 | 0.311 86 | -0.004 07 | 98.71 |
| 24 | 0.529 60 | 0.534 99 | 0.005 39 | 98.99 |
| 25 | 0.469 35 | 0.469 20 | -0.000 14 | 99.97 |
| 26 | 0.290 04 | 0.289 57 | -0.000 47 | 99.84 |
| 27 | 0.341 70 | 0.344 71 | 0.003 01 | 99.13 |

3 讨论与结论

镉胁迫下植物的生长受到影响,发育缓慢,植物产量减少。最直观的表现就是植物体内的叶绿素合成受阻,叶绿素含量下降,光合作用减弱^[18]。本研究中,27 个甘薯品种的叶绿素含量均比对照组低,耐镉甘薯幼苗通过比镉敏感甘薯幼苗含有更多的叶绿素来维持植物的光合作用。镉胁迫会降低辣椒中的叶绿素(叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素)含量,耐镉辣椒品种叶绿素含量下降相对较少^[1]。

脯氨酸能调节植物渗透作用,通过改变细胞水势防止质膜通透性改变^[19]。本研究中,随着镉胁迫时间的增加,甘薯品种的脯氨酸含量均比对照组高,耐镉甘薯通过比镉敏感甘薯产生更多的脯氨酸来稳定细胞蛋白质的结构以及减少酶活性的降低。与杨馥榕等关于木槿脯氨酸含量与镉胁迫浓度成正比的研究成果^[20]一致。镉胁迫下,植株内会产生大量的活性氧与脂膜的不饱和酸反应,使丙二醛含量增加^[21]。本研究中,在镉胁迫下,甘薯植株体内 MDA 和过氧化氢含量与对照组相比均有所增加,镉敏感甘薯品种比耐镉甘薯品种产生更多的 MDA 和过氧化氢,加速细胞受损。以往研究中,玉米植株在镉胁迫下的处理也有类似现象,其叶片中产生超氧阴离子自由基的速率会加快,过氧化氢含量随镉处理时间的增加而增加^[22]。可溶性蛋白对植物能起到一定的渗透调节作用,在镉胁迫下可通过提高其含量来维持体内正常渗透压^[23]。本研究中,镉胁迫下 27 个甘薯品种的可溶性蛋白含量均比对照组高,耐镉甘薯品种通过比镉敏感甘薯品种产生更多的可溶性蛋白来维持植物的渗透调节功能,以此来减少植物遭受镉胁迫的伤害程度。以往研究中,生菜可溶性蛋白含量会随着镉浓度的增加而升高来抵抗胁迫带来的压力^[24]。

前人关于作物抗性鉴定采用的指标可能不同,如可以用株高、地上部干重和根系干重来鉴定棉花的耐盐性^[25],也可用相对株高、相对叶面积^[26]、脯氨酸含量^[27]来鉴定。如可以用株高、节间长、穗数、穗粒重来鉴定小麦抗旱性^[28-29],也可用总茎数、有效穗数、株高、穗长来鉴定^[30]。这是因为作物抗性受多因子影响,单一或少量指标可能难以全面反映作物的抗性强弱。因此,在研究作物抗性时,须用能反映植物抗性的指标进行研究。本研究中,不同甘薯品种的耐镉性采用 7 个指标(叶绿素、类胡萝卜素、花青素、过氧化氢、丙二醛、脯氨酸和可溶性蛋白含量)进行评价,研究发现不同品种各指标含量变化不同,其耐镉系数也不同。所以,用不同单项生理指标的耐镉系数对甘薯耐镉性进行评价,其结果可能存在差异。但是这些指标存在着一定的相关关系,如花青素含量与过氧化氢、丙二醛含量呈极显著负相关,与脯氨酸含量呈显著正相关。因此,在各指标特征根、贡献率和累计贡献率基础上,进一步结合主成分分析及隶属函数分析对各甘薯品种的耐镉性进行综合评价。依据综合评价值 D

值分析得到绵紫薯 9 号的耐镉性最强,南紫薯 023 对镉最敏感。且绵紫薯 9 号、渝苏 303、万薯 9 号、济薯 26、苏薯 29 这 5 个品种的综合评价值(D 值)均大于 0.55,受镉胁迫影响较小,其幼苗可优先在 450 $\mu\text{mol/L}$ 及更低浓度镉污染土壤中种植。同时建立了一个相对最优的回归方程作为评价甘薯幼苗耐镉强弱的数学模型,通过方程得到的预测值及排序与通过主成分分析及隶属函数分析得到的结果一致。后续,可用该模型预测甘薯幼苗的耐镉强度。

本研究选用幼苗进行试验且是在水培条件下进行,要筛选出适用于实际生产的耐镉品种,还需结合田间试验、多种指标与更多的分析方法才能建立更加精准的模型,以服务国家粮食安全及改善生态环境战略。

参考文献:

- [1] Sana S, Ramzan M, Ejaz S, et al. Differential responses of chili varieties grown under cadmium stress [J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 7.
- [2] 朱旭霞,刘莉莎,何素兰,等. 保健甘薯的功能及产品开发研究[J]. 中国食物与营养, 2014, 20(11): 34–36.
- [3] 马居奎,张成玲,杨冬静,等. 我国甘薯病毒病研究进展[J]. 河北农业科学, 2020, 24(1): 51–56.
- [4] 胡玉龙,李雪华,赵苹艺,等. 镉胁迫对甘薯苗生理生化指标的影响[J]. 湖北农业科学, 2015, 54(4): 858–861.
- [5] 肖力力. 甘薯碳代谢对镉胁迫的响应及镉积累特征[D]. 贵阳: 贵州大学, 2022: 60–61.
- [6] 靳艳玲,丁凡,方扬,等. 甘薯对土壤中镉的吸收特征研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(24): 9194–9200.
- [7] 夏蔓蔓,何冠谛,符东顺,等. 镉胁迫对不同马铃薯品种形态和生理特性的影响及评价[J]. 种子, 2020, 39(9): 41–46.
- [8] 吴月莹,邓思情,刘松芹,等. 镉胁迫对不同品种玉米幼苗生长及生理特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(5): 509–515.
- [9] 龙春丽,宋拉拉,胡明文,等. 镉胁迫对不同品种辣椒种子萌发及苗期抗性生理的影响[J]. 种子, 2021, 40(5): 105–109.
- [10] 徐天成,宿惠渊,黄允,等. 不同甜玉米品种苗期耐镉胁迫响应分析[J]. 分子植物育种, 2022, 20(1): 276–284.
- [11] 生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018[S]. 北京: 中国环境出版集团, 2018.
- [12] 苏正淑,张宪政. 几种测定植物叶绿素含量的方法比较[J]. 植物生理学通讯, 1989(5): 77–78.
- [13] 杜咏梅,张怀宝,王晓玲,等. 光度法测定烟草中总类胡萝卜素的方法研究[J]. 中国烟草科学, 2003(3): 28–29.
- [14] 王舒璇,王若琼,张裕,等. 4 种不同产地黑豆营养成分及花青素含量的分析与评价[J]. 现代食品科技, 2023, 39(3): 156–163.
- [15] 任艳芳,何俊瑜,杨军,等. 外源 H_2O_2 对盐胁迫下小白菜种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7745–7756.
- [16] 段文学,张海燕,解备涛,等. 甘薯苗期耐盐性鉴定及其指标筛选[J]. 作物学报, 2018, 44(8): 1237–1247.
- [17] 强伟,王洪伦,周昌范,等. 考马斯亮蓝 G-250 染色法测定柠条锦鸡儿种子中可溶性蛋白含量[J]. 氨基酸和生物资源, 2011, 33(3): 74–76.
- [18] 李秀,陈曦,李梦霞,等. 不同木芙蓉品种的镉胁迫响应[J]. 四川林业科技, 2024, 45(1): 58–65.
- [19] Cheng Y F, Wei H M, Sun R, et al. Rapid method for protein quantitation by Bradford assay after elimination of the interference of polysorbate 80[J]. Analytical Biochemistry, 2016, 494: 37–39.
- [20] 杨馥榕,王晓红,肖琪,等. 木槿品种对镉胁迫的生理响应及耐镉能力评价[J]. 生物技术通报, 2022, 38(1): 98–107.
- [21] 阿曼古丽·买买提阿力. 盐胁迫对不同栽培种棉花幼苗生长及生理特性影响的差异研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016: 26.
- [22] 王芳,常盼盼,陈永平,等. 外源 NO 对镉胁迫下玉米幼苗生长和生理特性的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(2): 178–186.
- [23] Li Y, Zhang S S, Jiang W S, et al. Cadmium accumulation, activities of antioxidant enzymes, and malondialdehyde (MDA) content in *Pistia stratiotes* L. [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, 20(2): 1117–1123.
- [24] 王涛,黄语燕,陈永快,等. 镉胁迫对生菜生长、生理特性及镉富集转运特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(7): 115–124.
- [25] 张国伟,路海玲,张雷,等. 棉花萌发期和苗期耐盐性评价及耐盐指标筛选[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2045–2053.
- [26] Ashraf M. Salt tolerance of cotton: some new advances[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2002, 21(1): 1–30.
- [27] 孙小芳,刘有良. 棉花品种耐盐性鉴定指标可靠性的检验[J]. 作物学报, 2001, 27(6): 794–802.
- [28] 贾永红,魏海鹏,侯殿亮,等. 新疆自育春小麦品种抗旱性及农艺性状相关性评价[J]. 新疆农业科学, 2023, 60(12): 2940–2948.
- [29] 史田斌,刘震,李志涛,等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯生长特性、块茎产量和水分利用效率的影响[J]. 江苏农业学报, 2024, 40(2): 193–202.
- [30] 段珊,付之乐,王晶晶,等. 陇东旱地冬小麦区域试验品系农艺性状及抗逆性分析[J]. 西南农业学报, 2024, 37(5): 980–989.