

中图分类号: S532 文献标识码: A 文章编号: 1672-3635(2023)04-0306-14

DOI: 10.19918/j.cnki.1672-3635.2023.04.002

栽培生理

干旱胁迫对18个马铃薯品种生理特性的影响

郑子凡¹, 于佳乐¹, 聂虎帅¹, 刘杰², 魏巍², 王沛捷¹, 武小娟¹, 吴娟¹, 马艳红^{1*}

(1. 内蒙古农业大学, 内蒙古 呼和浩特 010019; 2. 华颂种业(北京)股份有限公司, 北京 100036)

摘要: 随着马铃薯产业的高速发展, 马铃薯主粮化逐渐成为世界趋势, 加快马铃薯产业的发展进程, 对中国农业发展具有重要意义。为筛选适宜内蒙古自治区种植的抗旱马铃薯品种, 以18个马铃薯品种为供试材料, 采用大田干旱胁迫处理, 测定和分析其在苗期、块茎形成期和块茎膨大期的生理指标。干旱胁迫处理后, 马铃薯叶片的POD活性和SOD活性普遍呈现先升高后降低的变化趋势, MDA含量、可溶性糖含量和Pro含量变化趋势存在差异, SPAD值随着生育期的推进逐渐降低。根据各生理指标进行隶属函数分析, ‘中薯28号’和‘中薯9号’在苗期、块茎形成期和块茎膨大期的平均隶属函数值分别为0.623 9、0.543 2、0.814 8和0.561 2、0.488 7、0.704 2, 为相对抗旱的马铃薯品种。该研究结果为评定马铃薯抗旱性指标提供了数据支撑, 对筛选抗旱马铃薯品种具有重要参考价值。

关键词: 马铃薯; 干旱; 生理指标; 生育期; 隶属函数

Effects of Drought Stress on Physiological Characteristics of 18 Potato Varieties

ZHENG Zifan¹, YU Jiale¹, NIE Hushuai¹, LIU Jie², WEI Wei², WANG Peijie¹, WU Xiaojuan¹, WU Juan¹, MA Yanhong^{1*}

(1. Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010019, China;

2. Huasong Seed Industry (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100036, China)

Abstract: With the rapid development of potato industry, potato as staple food has gradually become a world trend, and accelerating the development process of the potato industry is of great significance for the development of agriculture in China. To select drought-resistant potato varieties suitable for planting in Inner Mongolia Autonomous Region, the physiological indicators of 18 potato varieties under drought stress in field conditions were measured at the seedling, tuber formation, and tuber bulking stages. Peroxidase (POD) activity and superoxide dismutase (SOD) activity of potato leaves generally showed a trend of first increasing and then decreasing and SPAD value gradually decreased as the growth period progressed under drought stress treatment. No clear change pattern was found for malondialdehyde (MDA) content, soluble sugar content and proline (Pro) content in the 18 varieties tested. Membership function analysis was performed based on various physiological indicators. The average membership function values of 'Zhongshu 28' and 'Zhongshu 9' at seedling, tuber formation and tuber bulking stages were 0.623 9, 0.543 2, 0.814 8 and 0.561 2, 0.488 7, 0.704 2, respectively, indicating that they are relatively drought-resistant potato varieties. The results of this study provide data support for evaluating drought resistance index of potato and have important reference value for selecting drought-resistant potato varieties.

Key Words: potato; drought; physiological index; growth period; membership function

收稿日期: 2023-04-20

基金项目: 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0221); 内蒙古自治区马铃薯种业技术创新中心项目(2020)。

作者简介: 郑子凡(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事马铃薯遗传育种研究。

*通信作者(Corresponding author): 马艳红, 教授, 主要从事马铃薯遗传育种研究, E-mail: mayanhong80@126.com。

马铃薯是继水稻、小麦、玉米之后的第四大粮食作物, 因其具有耐贫瘠、耐干旱的特点, 目前已在全球157个国家和地区广泛种植^[1], 亦是中国西部地区经济的支柱产业^[2]。然而, 随着全球性气候变化加剧, 各种极端气候和自然灾害的发生频率愈来愈高, 其中干旱胁迫就是危害农业生产的主要自然灾害。目前, 干旱胁迫已经对全球多个国家和地区的植物生长以及陆地生态生产力产生了制约^[3,4], 对马铃薯生产的限制也愈发明显。因此, 筛选抗旱的马铃薯种质资源并建立相应的评价体系, 对于加速抗旱育种进程, 促进马铃薯产业健康、可持续的和环境友好的发展具有重要意义^[5]。

水分是植株体内基本生理生化代谢的直接参与者。干旱胁迫下, 脯氨酸(Proline, Pro)含量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、叶片水势、超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)活性、过氧化物酶(Peroxidase, POD)活性、丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量、叶绿素a含量、叶绿素b含量、总叶绿素含量、叶绿素a/b、ATP含量和离体叶片失水速率均会发生变化^[6,7]。杜培兵和杨文静^[8]对15个马铃薯品种在开花期进行离体叶片失水率的测定, 发现所有参试品种经干旱胁迫后, 叶片失水率与正常灌溉的对照相比均显著降低。马铃薯在受到干旱胁迫时, 植株本身会启动自身的防御系统, 通过降低细胞本身的渗透势来适应外界的环境变化, 在苗期和块茎形成期, 马铃薯叶片的SOD活性会持续降低。对于马铃薯抗旱性强的品种, 其MDA和Pro含量的增加幅度比较小, SOD的活力较高, 而抗旱性弱的马铃薯品种则刚好相反^[9]。在干旱条件下, 马铃薯不同品种的Pro含量升高1.01~5.40倍, MDA含量升高1.10~1.91倍^[10]。贾琼等^[11]通过研究不同浓度聚乙烯乙二醇(Polyethylene glycol, PEG)胁迫对5个马铃薯品种生理特性的影响, 发现可溶性蛋白含量及Pro含量随胁迫加剧呈现一直升高的变化趋势, 且与品种抗旱性呈负相关; POD活性随胁迫加剧呈现先升高后降低的变化趋势, 抗旱性强的品种表现出更强的POD活性; SOD在轻度胁迫下活性下降, 在中、重度胁迫下除‘04-6’品系之外全部呈现活性上升的趋势,

但与品种的抗旱性均未表现出明显的相关规律; MDA在轻、中度胁迫下含量上升, 与品种抗旱性呈显著负相关, 重度胁迫下, 品种间表现虽有不同, 但其含量的高低与品种抗旱性仍表现为负相关关系。

叶绿素是植物进行光合作用的主要场所, 植物在生长过程中所需要的大多数营养物质都是通过光合作用获得。叶绿素含量的多少与外界水分含量密切相关, 进而影响光合作用效率, 最终影响马铃薯的生长状态^[12]。马铃薯叶绿素含量(SPAD值)对水分亏缺非常敏感, 亏缺程度不同, 其叶绿素含量值降低的程度不同^[13]。综上所述, 马铃薯的抗旱性可以通过多个生理指标进行评价。

本研究旨在通过对18个马铃薯品种进行干旱胁迫, 测定与干旱相关的生理生化指标并进行抗旱性评价, 筛选出相对抗旱的马铃薯品种。

1 材料与方法

1.1 试验材料

‘中薯28号’‘华颂34’‘中薯668号’‘中薯9号’‘中薯27号’‘中薯19号’‘中薯31号’‘希森6号’‘华颂7号’‘冀张薯12号’‘内农薯2号’‘大西洋’‘V7’‘华颂58’‘华颂56’‘内农薯1号’‘中薯18号’‘Innovator’。试验材料由华颂种业(北京)股份有限公司提供。

1.2 试验地概况

试验地位于内蒙古自治区乌兰察布市中部集宁区, 阴山山脉灰腾梁南麓, 地处N 40°1', E 113°10', 集宁区气候四季分明, 年平均气温4.4℃, 年日照时数为3 130 h, 年均降水量384 mm, 无霜期为130 d, 海拔1 417 m, 属于典型的蒙古高原大陆性气候。

1.3 试验设计及播种管理

大田干旱胁迫处理试验在内蒙古自治区乌兰察布市集宁区华颂种业(北京)股份有限公司基地的试验田进行。设置2个处理: 干旱胁迫处理为自然降水(生育期内不进行灌溉, 每隔5 d对试验田随机取样, 测得马铃薯生育期内土壤相对含水量为7%~60%); 以自然降水结合常规灌溉(苗期和块茎形成期各灌水1次, 块茎膨大期灌水2次, 每隔5 d对试验田随机取样, 使试验田的土壤相对含水量维持

在65%~80%)为对照。采用随机区组试验设计,播种方式为机械起垄,人工点播,株距为0.4 m,行距为1.1 m,每个品种3行,每行10株,小区面积为20 m²,设3次重复。在幼苗长到0.13 m左右时进行中耕除草;在现蕾期高度约为0.2 m时进行机械起垄培土1次;播种时施用有机肥225 kg/hm²+马铃薯专用肥(N:P₂O₅:K₂O = 17:17:17)975 kg/hm²共1 200 kg/hm²,后期追加施用大量元素水溶肥(N:P₂O₅:K₂O = 14:14:30)375 kg/hm²,植株生长期及时除草,防御病虫害。试验于2021年5月17日播种,9月18日收获。

1.4 试验方法

分别在马铃薯苗期、块茎形成期和块茎膨大期,于早晨7:00~9:00随机摘取18个马铃薯品种的叶片,置于液氮中保存,带回实验室,参照南京建成生物工程研究所试剂盒(SOD试剂盒、MDA试剂盒、Pro试剂盒、POD试剂盒、植物可溶性糖试剂盒)的操作说明测定18个马铃薯品种3个生育期叶片中SOD活性、MDA含量、Pro含量、POD活性及可溶性糖含量,每个处理3次生物学重复。

SPAD值的测定采用SPAD-502叶绿素测定仪进行,分别测定各材料每株第3个平展叶的SPAD值,3次生物学重复。

1.5 数据处理

试验数据采用Microsoft excel 2017软件进行

相关数据的汇总,计算均值、变异系数等;对测定的相关指标利用SPSS 22.0软件进行方差分析和显著性分析。模糊数学隶属函数采用公式 $X(\mu) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})$,MDA含量采用反隶属函数公式 $X(\mu) = 1 - [(X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min})]$ 。式中 X 表示不同马铃薯品种某一指标的测定值,该指标测定值中的最小值用 $X_{\min}$ 表示,最大值用 $X_{\max}$ 表示。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫对18个品种相关生理指标的影响

2.1.1 干旱胁迫对18个品种保护酶活性的影响

不同时期叶片过氧化物酶(POD)活性和超氧化物歧化酶(SOD)活性在处理、品种及品种与处理互作效应均极显著(表1、表2)。

随着干旱胁迫时间的延长,18个马铃薯品种的POD活性均呈现先升高后降低的变化趋势,在块茎形成期POD活性达到最大(表3)。

随着干旱胁迫时间的延长,‘大西洋’的SOD活性呈现逐渐升高的变化趋势,‘中薯31号’的SOD活性呈现逐渐降低的变化趋势,其余16个品种的SOD活性呈现先升高后降低的变化趋势(表4)。

2.1.2 干旱胁迫对18个品种丙二醛(MDA)含量的影响

不同时期叶片丙二醛(MDA)含量在处理、品种及品种与处理互作效应均极显著(表5)。

表1 干旱胁迫下18个品种过氧化物酶(POD)活性的方差分析

Table 1 Analysis of variance for peroxidase activity in leaves of 18 varieties under drought stress

项目 Item	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking
处理(U/g·FW) Treatment (T)			
对照CK	418.93 b	474.80 b	404.72 a
干旱Drought	450.63 a	490.17 a	375.05 b
变异来源(F值) Source of variation (F value)			
品种 Variety (V)	23.76**	523.66**	124.25**
处理 Treatment (T)	48.84**	485.14**	211.81**
品种×处理 V×T	3.07**	196.19**	197.57**

注:处理和对照平均值后标有不同小写字母表示差异在0.05水平显著;*和**分别表示在0.05和0.01水平显著。下同。

Note: Treatment and control means followed with different lowercase letters indicate that the difference is significant at the level of 0.05;

* and ** indicate significant at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

表2 干旱胁迫下18个品种超氧化物歧化酶(SOD)活性的方差分析

Table 2 Analysis of variance for superoxide dismutase activity in leaves of 18 varieties under drought stress

项目 Item	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking
处理(U/g·FW) Treatment (T)			
对照 CK	627.28 a	758.46 b	679.49 b
干旱 Drought	519.98 b	791.43 a	714.36 a
变异来源(F值) Source of variation (F value)			
品种 Variety (V)	50.95**	51.39**	177.56**
处理 Treatment (T)	166.62**	71.05**	258.04**
品种 × 处理 V × T	23.37**	6.29**	70.17**

表3 干旱胁迫下18个品种过氧化物酶(POD)活性的比较

Table 3 Comparison of peroxidase activity in leaves of 18 varieties under drought stress

品种 Variety	苗期(U/g·FW) Seedling		块茎形成期(U/g·FW) Tuber formation		块茎膨大期(U/g·FW) Tuber bulking	
	对照 CK	干旱 Drought	对照 CK	干旱 Drought	对照 CK	干旱 Drought
V7	462.67 a	492.67 a	493.00 b	512.33 a	323.67 b	446.00 a
Innovator	460.33 a	512.33 a	485.67 b	538.33 a	332.67 b	448.50 a
中薯28号 Zhongshu 28	374.67 b	444.67 a	438.00 b	479.33 a	265.33 b	424.00 a
中薯9号 Zhongshu 9	460.33 a	469.67 a	508.67 a	493.33 b	418.33 a	432.50 a
大西洋 Atlantic	455.33 a	477.33 a	507.67 a	478.00 b	374.00 a	292.50 b
内农薯1号 Neinongshu 1	363.67 b	422.33 a	419.33 b	432.33 a	372.33 a	365.50 a
冀张薯12号 Jizhangshu 12	387.67 a	396.00 a	464.33 a	434.00 b	405.00 a	300.00 b
中薯19号 Zhongshu 19	420.67 b	474.67 a	510.67 a	514.00 a	414.67 a	343.50 b
华颂7号 Huasong 7	427.67 b	502.67 a	506.00 b	522.67 a	366.33 b	421.50 a
华颂56 Huasong 56	423.67 b	494.67 a	470.33 b	527.00 a	333.67 b	388.50 a
华颂58 Huasong 58	388.67 a	441.33 a	432.00 b	515.00 a	335.00 b	395.17 a
希森6号 Xisen 6	466.67 b	547.33 a	485.00 b	565.33 a	334.00 a	354.83 a
中薯18号 Zhongshu 18	422.67 a	447.67 a	480.67 a	477.67 a	421.67 a	356.00 b
中薯27号 Zhongshu 27	452.00 a	453.67 a	488.67 a	485.67 a	428.33 a	312.17 b
中薯31号 Zhongshu 31	376.00 a	367.33 a	452.67 a	423.67 b	463.67 a	359.00 b
内农薯2号 Neinongshu 2	481.67 a	449.33 a	555.00 a	504.00 b	515.00 a	373.50 b
华颂34 Huasong 34	317.00 a	328.00 a	377.00 b	455.00 a	464.47 a	372.00 b
中薯668号 Zhongshu 668	399.33 a	389.67 a	471.67 a	465.33 b	716.67 a	365.67 b

注：处理和对照平均值后标有不同小写字母表示差异在0.05水平显著。下同。

Note: Treatment and control means followed with different lowercase letters indicate that the difference is significant at the level of 0.05. The same below.

表 4 干旱胁迫下 18 个品种超氧化物歧化酶(SOD)活性的比较

Table 4 Comparison of superoxide dismutase activity in leaves of 18 varieties under drought stress

品种 Variety	苗期 (U/g·FW) Seedling		块茎形成期 (U/g·FW) Tuber formation		块茎膨大期 (U/g·FW) Tuber bulking	
	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱
	CK	Drought	CK	Drought	CK	Drought
V7	644.78 a	479.98 b	732.53 b	840.48 a	432.15 b	578.43 a
Innovator	666.52 b	724.41 a	844.20 a	888.87 a	633.15 b	825.22 a
中薯 28 号 Zhongshu 28	779.43 a	635.76 b	797.30 a	806.23 a	672.23 b	783.90 a
中薯 9 号 Zhongshu 9	426.57 b	673.72 a	818.14 a	842.71 a	750.40 b	810.70 a
大西洋 Atlantic	677.44 a	571.07 a	720.62 b	772.73 a	700.15 b	795.07 a
内农薯 1 号 Neinongshu 1	585.13 a	450.80 b	729.56 a	738.49 a	621.98 a	632.03 a
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	640.97 a	434.67 b	680.42 b	744.44 a	677.82 a	647.67 b
中薯 19 号 Zhongshu 19	664.04 a	493.98 b	721.37 a	755.61 a	673.35 b	741.47 a
华颂 7 号 Huasong 7	720.12 a	518.13 b	801.02 a	791.34 a	734.77 a	739.23 a
华颂 56 Huasong 56	716.16 a	175.70 b	846.43 a	863.55 a	670.00 b	780.55 a
华颂 58 Huasong 58	849.41 a	611.19 b	846.43 b	935.02 a	763.80 a	710.20 b
希森 6 号 Xisen 6	619.38 a	512.18 a	664.04 b	751.89 a	688.98 b	731.42 a
中薯 18 号 Zhongshu 18	597.46 a	438.14 b	754.12 a	728.81 a	726.95 a	713.55 a
中薯 27 号 Zhongshu 27	511.43 a	491.33 a	690.10 a	741.47 a	696.80 a	635.38 b
中薯 31 号 Zhongshu 31	765.12 b	926.83 a	801.02 a	809.21 a	696.80 b	758.22 a
内农薯 2 号 Neinongshu 2	278.42 a	240.93 a	690.10 a	663.30 a	680.05 a	608.58 b
华颂 34 Huasong 34	650.64 a	467.18 b	774.22 a	752.63 a	718.02 a	655.48 b
中薯 668 号 Zhongshu 668	498.03 a	513.67 a	740.72 b	818.89 a	693.45 b	711.32 a

表 5 干旱胁迫下 18 个品种丙二醛(MDA)含量的方差分析

Table 5 Analysis of variance for malondialdehyde content in leaves of 18 varieties under drought stress

项目 Item	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking
处理 (nmol/g·FW) Treatment (T)			
对照 CK	37.64 b	47.23 a	47.15 b
干旱 Drought	43.85 a	37.93 b	58.36 a
变异来源 (F 值) Source of variation (F value)			
品种 Variety (V)	270.24**	44.35**	71.19**
处理 Treatment (T)	489.09**	430.14**	541.14**
品种 × 处理 V × T	45.91**	43.70**	38.33**

随着干旱胁迫时间的延长,MDA 含量总体呈上升趋势,但不同品种的变化趋势不同(表 6)。随着生育期的推进,在干旱胁迫下,‘V7’‘Innovator’‘中薯 28 号’‘大西洋’‘冀张薯 12 号’‘中薯 27 号’‘中薯 31 号’‘内农薯 2 号’‘华颂 34’和‘中薯 668 号’

的 MDA 含量呈先下降后上升的变化趋势,即这 10 个品种叶片的 MDA 含量均在块茎形成期降到最低值;‘中薯 9 号’‘内农薯 1 号’‘中薯 19 号’‘华颂 7 号’‘华颂 56’‘华颂 58’‘希森 6 号’和‘中薯 18 号’的 MDA 含量呈一直上升的变化趋势,这 8 个品种叶

片的MDA含量最小值均在苗期。

2.1.3 干旱胁迫对18个品种可溶性糖含量的影响

不同时期叶片可溶性糖含量在处理、品种及品种与处理互作效应均极显著(表7)。

随着干旱胁迫时间的延长,可溶性糖含量总体呈上升趋势,但不同品种的变化趋势也明显不

同(表8)。随着胁迫时间的延长,‘冀张薯12号’‘华颂56’‘中薯27号’‘中薯31号’‘内农薯2号’‘中薯668号’的可溶性糖含量呈先上升后下降的变化趋势,可溶性糖含量在块茎形成期达到最大值;其他12个品种的可溶性糖含量呈上升的变化趋势,可溶性糖含量在块茎膨大期达到最大值。

表6 干旱胁迫下18个品种丙二醛(MDA)含量的比较

Table 6 Comparison of malondialdehyde content in leaves of 18 varieties under drought stress

品种 Variety	苗期(nmol/g·FW) Seedling		块茎形成期(nmol/g·FW) Tuber formation		块茎膨大期(nmol/g·FW) Tuber bulking	
	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱
	CK	Drought	CK	Drought	CK	Drought
V7	65.67 b	77.74 a	69.42 a	44.01 b	51.68 b	58.90 a
Innovator	44.23 b	49.14 a	51.90 a	44.45 b	44.12 b	59.23 a
中薯28号 Zhongshu 28	40.78 b	53.11 a	54.09 a	31.31 b	43.80 b	57.59 a
中薯9号 Zhongshu 9	38.43 b	42.31 a	44.01 b	45.11 a	41.49 b	53.65 a
大西洋 Atlantic	30.47 b	45.13 a	40.95 a	43.36 a	41.17 a	44.12 a
内农薯1号 Neinongshu 1	17.38 b	24.73 a	22.12 b	36.57 a	52.99 a	49.71 a
冀张薯12号 Jizhangshu 12	32.86 b	56.06 a	58.47 a	34.38 b	45.76 b	57.26 a
中薯19号 Zhongshu 19	26.16 b	34.15 a	33.72 b	37.88 a	46.75 a	49.05 a
华颂7号 Huasong 7	40.71 a	35.56 b	47.08 a	39.42 b	53.98 b	61.20 a
华颂56 Huasong 56	34.72 b	42.93 a	37.01 b	50.58 a	56.27 a	53.98 b
华颂58 Huasong 58	43.63 a	34.50 b	49.49 a	37.01 b	42.81 b	52.01 a
希森6号 Xisen 6	44.01 a	40.03 b	52.12 a	41.17 b	49.38 b	63.18 a
中薯18号 Zhongshu 18	45.11 a	38.65 b	61.75 a	39.42 b	55.62 b	112.45 a
中薯27号 Zhongshu 27	33.82 b	43.27 a	46.64 a	19.93 b	46.42 b	54.96 a
中薯31号 Zhongshu 31	34.38 b	42.48 a	45.99 a	37.45 b	46.09 b	59.56 a
内农薯2号 Neinongshu 2	30.66 b	42.41 a	44.67 a	32.41 b	42.15 b	56.93 a
华颂34 Huasong 34	41.62 a	43.91 a	47.96 a	35.47 b	44.45 b	52.66 a
中薯668号 Zhongshu 668	33.49 b	41.06 a	42.70 a	32.85 b	43.79 b	53.98 a

表7 干旱胁迫下18个品种可溶性糖含量的方差分析

Table 7 Analysis of variance for soluble sugar content in leaves of 18 varieties under drought stress

项目 Item	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking
处理(μg/g·FW) Treatment (T)			
对照 CK	8 255.19 b	9 805.43 b	11 029.81 b
干旱 Drought	8 856.52 a	10 588.68 a	14 204.31 a
变异来源(F值)Source of variation (F value)			
品种 Variety (V)	46.50**	45.42**	906.44**
处理 Treatment (T)	69.50**	76.53**	3 373.76**
品种×处理 V×T	39.86**	66.34**	534.26**

表 8 干旱胁迫下 18 个品种可溶性糖含量的比较

Table 8 Comparison of soluble sugar content in leaves of 18 varieties under drought stress

品种 Variety	苗期(μg/g·FW) Seedling		块茎形成期(μg/g·FW) Tuber formation		块茎膨大期(μg/g·FW) Tuber bulking	
	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱
	CK	Drought	CK	Drought	CK	Drought
V7	8 873.99 b	10 460.70 a	11 562.33 a	11 558.27 b	8 116.53 b	14 485.09 a
Innovator	8 182.93 b	9 518.97 a	8 794.85 b	11 159.89 a	10 691.06 b	13 082.66 a
中薯 28 号 Zhongshu 28	7 974.25 b	10 724.93 a	10 350.95 a	11 348.24 a	18 976.96 b	26 158.54 a
中薯 9 号 Zhongshu 9	8 531.44 a	8 739.84 a	9 986.45 a	10 528.46 a	10 162.60 b	21 490.51 a
大西洋 Atlantic	8 739.84 a	7 615.18 b	10 487.80 a	8 417.34 b	6 490.51 b	12 140.92 a
内农薯 1 号 Neinongshu 1	7 159.89 a	7 669.38 a	8 854.74 b	10 413.28 a	12 262.87 b	19 004.07 a
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	9 857.72 b	10 602.98 a	11 144.99 b	12 413.28 a	17 879.40 a	6 558.27 b
中薯 19 号 Zhongshu 19	9 844.17 a	10 264.23 a	10 670.73 a	10 968.83 a	10 243.90 b	16 253.39 a
华颂 7 号 Huasong 7	9 071.81 a	6 476.96 b	9 546.07 a	6 551.49 b	9 742.55 b	13 590.79 a
华颂 56 Huasong 56	7 876.42 a	8 150.41 a	9 871.27 a	9 342.82 b	8 970.19 a	7 818.43 b
华颂 58 Huasong 58	7 596.21 a	6 991.87 a	9 180.22 a	7 365.85 b	15 914.63 a	14 688.35 b
希森 6 号 Xisen 6	7 940.38 a	7 107.05 b	9 844.17 a	8 082.66 b	12 229.00 b	15 210.03 a
中薯 18 号 Zhongshu 18	9 769.65 a	9 559.62 a	11 686.99 a	9 670.73 b	8 624.66 b	13 753.39 a
中薯 27 号 Zhongshu 27	7 649.05 a	7 886.18 a	9 119.24 b	15 512.20 a	7 615.18 b	14 986.45 a
中薯 31 号 Zhongshu 31	6 734.42 a	6 876.69 a	8 501.36 a	8 855.01 a	5 975.61 b	6 382.11 a
内农薯 2 号 Neinongshu 2	7 994.58 a	8 353.66 a	9 214.09 b	11 212.74 a	14 390.24 a	8 692.41 b
华颂 34 Huasong 34	8 529.81 a	9 288.62 a	10 196.48 a	10 027.10 a	11 056.91 b	16 361.79 a
中薯 668 号 Zhongshu 668	6 266.94 b	13 130.08 a	7 485.09 b	17 168.02 a	9 193.77 b	15 020.33 a

2.1.4 干旱胁迫对 18 个品种脯氨酸(Pro)含量的影响

不同时期叶片 Pro 含量在处理、品种及品种与处理互作效应均极显著(表 9)。随着干旱胁迫时间的延长, 18 个品种的 Pro 含量变化趋势不同(表 10)。只有‘内农薯 2 号’的 Pro 含量随胁迫时间

的延长呈一直上升的变化趋势, 在块茎膨大期达到顶峰; ‘Innovator’、‘中薯 28 号’、‘大西洋’、‘内农薯 1 号’、‘华颂 58’和‘中薯 27 号’的 Pro 含量随胁迫时间延长呈现先下降后上升的变化趋势; 其他 11 个品种的 Pro 含量呈现先上升后下降的变化趋势, Pro 含量在块茎形成期达到最大值。

表 9 干旱胁迫下 18 个品种脯氨酸(Pro)含量的方差分析

Table 9 Analysis of variance for proline content in leaves of 18 varieties under drought stress

项目 Item	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking
处理(μg/g·FW) Treatment (T)			
对照 CK	19.50 b	24.61 b	17.24 b
干旱 Drought	26.47 a	27.86 a	28.02 a
变异来源(F 值) Source of variation (F value)			
品种 Variety (V)	89.14**	75.04**	5 264.12**
处理 Treatment (T)	274.41**	139.50**	32 068.61**
品种 × 处理(V × T)	104.64**	24.16**	3 159.05**

表 10 干旱胁迫下18个品种脯氨酸(Pro)含量的比较

Table 10 Comparison of proline content in leaves of 18 varieties under drought stress

品种 Variety	苗期($\mu\text{g/g}\cdot\text{FW}$) Seedling		块茎形成期($\mu\text{g/g}\cdot\text{FW}$) Tuber formation		块茎膨大期($\mu\text{g/g}\cdot\text{FW}$) Tuber bulking	
	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱
	CK	Drought	CK	Drought	CK	Drought
V7	19.29 a	21.46 a	22.85 b	26.12 a	9.72 b	22.45 a
Innovator	16.98 b	54.42 a	17.22 b	23.12 a	12.69 b	55.62 a
中薯28号 Zhongshu 28	16.66 b	66.78 a	22.02 b	34.02 a	24.60 b	71.05 a
中薯9号 Zhongshu 9	14.08 a	16.75 a	19.15 a	23.47 a	10.55 b	18.09 a
大西洋 Atlantic	32.49 a	32.72 a	24.65 b	27.69 a	16.15 b	35.75 a
内农薯1号 Neinongshu 1	17.95 b	30.74 a	17.59 b	19.02 a	29.44 b	35.40 a
冀张薯12号 Jizhangshu 12	10.80 b	17.35 a	25.52 a	23.08 a	11.93 b	19.34 a
中薯19号 Zhongshu 19	14.12 a	14.12 a	27.05 a	29.12 a	10.34 b	14.70 a
华颂7号 Huasong 7	54.51 a	16.11 b	35.84 b	37.48 a	29.03 a	16.71 b
华颂56 Huasong 56	12.92 a	16.98 a	27.60 b	33.74 a	16.29 b	18.80 a
华颂58 Huasong 58	17.35 a	41.72 a	17.84 b	29.08 a	23.42 b	43.43 a
希森6号 Xisen 6	15.09 b	18.37 a	23.77 a	24.92 a	16.57 b	19.34 a
中薯18号 Zhongshu 18	18.88 a	15.09 a	29.72 b	41.22 a	15.12 a	13.18 a
中薯27号 Zhongshu 27	14.73 a	29.95 a	38.77 a	26.54 b	20.45 b	31.18 a
中薯31号 Zhongshu 31	19.34 a	18.18 a	29.26 a	27.09 a	11.59 b	19.13 a
内农薯2号 Neinongshu 2	20.40 a	20.54 a	21.37 a	23.26 a	17.40 b	24.05 a
华颂34 Huasong 34	19.94 a	22.15 a	19.99 b	27.55 a	13.94 b	23.70 a
中薯668号 Zhongshu 668	15.51 b	22.98 a	22.71 a	24.88 a	21.07 b	23.22 a

2.1.5 干旱胁迫对18个品种SPAD值的影响

不同时期品种和处理对18个马铃薯品种的叶片SPAD值均有极显著影响,品种和处理互作效应仅在块茎膨大期显著(表11)。

随着生育期的不断推进,对照处理下18个马

铃薯品种的叶片SPAD值总体呈下降的趋势;随着生育期的推进,在干旱胁迫下,18个马铃薯品种的叶片SPAD值整体呈现下降的趋势,而且干旱处理下的叶片SPAD值普遍低于对照,但也有个别品种的SPAD值在某个时期有所不同(表12)。

表 11 干旱胁迫下18个品种SPAD值的方差分析

Table 11 Analysis of variance for SPAD value in leaves of 18 varieties under drought stress

项目 Item	苗期 Seedling	块茎形成期 Tuber formation	块茎膨大期 Tuber bulking
处理 Treatment (T)			
对照 CK	48.39 a	44.31 a	40.18 a
干旱 Drought	44.64 b	41.44 b	35.13 b
变异来源 (F 值) Source of variation (F value)			
品种 Variety (V)	5.24**	11.76**	10.01**
处理 Treatment (T)	53.27**	55.19**	95.81**
品种 × 处理 V × T	1.17	1.59	2.05*

表 12 干旱胁迫下 18 个品种 SPAD 值的比较
Table 12 Comparison of SPAD value in leaves of 18 varieties under drought stress

品种 Variety	苗期 Seedling		块茎形成期 Tuber formation		块茎膨大期 Tuber bulking	
	对照	干旱	对照	干旱	对照	干旱
	CK	Drought	CK	Drought	CK	Drought
V7	47.0 a	46.7 a	44.8 a	40.7 b	44.2 a	39.1 a
Innovator	50.1 a	44.6 a	46.3 a	44.9 a	35.6 a	34.2 a
中薯 28 号 Zhongshu 28	49.4 a	44.7 b	42.9 a	41.3 b	41.8 a	36.2 a
中薯 9 号 Zhongshu 9	41.4 a	38.3 a	38.0 a	35.7 b	36.3 a	33.0 a
大西洋 Atlantic	45.7 a	45.3 a	43.0 a	41.4 a	38.3 a	29.3 b
内农薯 1 号 Neinongshu 1	50.1 a	44.2 a	41.2 a	36.2 a	35.4 a	29.2 b
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	45.2 a	41.7 b	44.2 a	39.5 a	41.2 a	30.3 b
中薯 19 号 Zhongshu 19	47.4 a	41.8 a	45.0 a	40.1 b	39.4 a	38.0 a
华颂 7 号 Huasong 7	51.3 a	48.9 a	48.4 a	46.5 a	46.1 a	39.3 a
华颂 56 Huasong 56	50.5 a	44.4 b	41.3 a	39.7 a	40.2 a	31.5 b
华颂 58 Huasong 58	46.0 a	44.4 a	43.6 a	42.5 a	38.6 a	39.0 a
希森 6 号 Xisen 6	51.5 a	46.1 a	46.3 a	45.9 a	43.4 a	36.8 b
中薯 18 号 Zhongshu 18	48.4 a	44.1 b	44.6 a	45.0 a	44.8 a	39.7 b
中薯 27 号 Zhongshu 27	47.7 a	45.3 a	44.4 a	43.4 a	41.7 a	36.2 b
中薯 31 号 Zhongshu 31	51.9 a	45.8 a	50.2 a	43.6 b	44.9 a	41.1 b
内农薯 2 号 Neinongshu 2	48.3 a	41.0 b	42.1 a	36.7 a	40.4 a	32.2 b
华颂 34 Huasong 34	49.2 a	45.4 b	45.0 a	41.8 b	33.4 a	31.2 a
中薯 668 号 Zhongshu 668	49.9 a	51.0 a	46.3 a	40.8 b	37.1 a	35.6 a

2.2 18 个马铃薯品种生理指标的隶属函数值及抗旱性评价

2.2.1 苗期生理指标的隶属函数值及抗旱性评价

综合分析发现, 各指标间存在较大差异, 且不同指标与抗旱性之间无一致性, 单一指标无法完全反映抗旱性的强弱。在干旱胁迫条件下, 不同马铃薯品种 POD 活性平均为 450.63 U/g·FW, 变异系数为 12.14%, POD 活性以‘希森 6 号’最高, 为 547.33 U/g·FW, ‘华颂 34’最低, 为 328.00 U/g·FW。MDA 含量平均为 43.85 nmol/g·FW, 变异系数为 25.37%, 其中以‘V7’最高, 为 77.74 nmol/g·FW, ‘内农薯 1 号’最低, 为 24.73 nmol/g·FW。可溶性糖含量平均为 8 856.52 μg/g·FW, 变异系数为 19.61%, ‘中薯 668 号’含量最高, 为 13 130.08 μg/g·FW, ‘华颂 7 号’含量最低, 为 6 476.96 μg/g·FW。Pro

含量平均为 26.47 μg/g·FW, 变异系数为 54.90%, 其中‘中薯 28 号’含量最高, 为 66.78 μg/g·FW, ‘中薯 19 号’含量最低, 为 14.12 μg/g·FW。SOD 活性平均为 519.98 U/g·FW, 变异系数为 32.20%, ‘中薯 31 号’的 SOD 活性最高, 为 926.83 U/g·FW, 最低的是‘华颂 56’, 为 175.69 U/g·FW。SPAD 值平均为 44.64, 变异系数为 6.41%, 其中以‘中薯 668 号’最高, 为 50.97, ‘中薯 9 号’最低, 为 38.27。

采用隶属函数法对 18 个马铃薯品种苗期的抗旱性进行综合评价, 18 个品种苗期的综合抗旱性由强到弱依次为‘Innovator’‘中薯 28 号’‘中薯 9 号’‘中薯 19 号’‘华颂 58’‘大西洋’‘内农薯 1 号’‘希森 6 号’‘中薯 27 号’‘中薯 668 号’‘中薯 18 号’‘内农薯 2 号’‘中薯 31 号’‘V7’‘冀张薯 12 号’‘华颂 7 号’‘华颂 56’‘华颂 34’(表 13)。

表 13 18个品种苗期抗旱性分析
Table 13 Analysis of drought resistance for 18 varieties at seedling stage

品种 Variety	过氧化物酶活性 (U/g·FW) POD activity	丙二醛含量 (nmol/g·FW) MDA content	可溶性糖含量 (μg/g·FW) Soluble sugar content	脯氨酸含量 (μg/g·FW) Proline content	超氧化物歧化 酶活性 (U/g·FW) SOD activity	SPAD 值 SPAD value	平均隶属函数值 Average membership function value	位次 Ranking
V7	492.67	77.74	10 460.70	21.46	479.98	46.67	0.380 2	14
Innovator	512.33	49.14	9 518.97	54.42	724.41	44.57	0.639 5	1
中薯28号 Zhongshu 28	444.67	53.11	10 724.93	66.78	635.76	44.67	0.623 9	2
中薯9号 Zhongshu 9	469.67	42.31	8 739.84	16.75	673.72	38.27	0.561 2	3
大西洋 Atlantic	477.33	45.13	7 615.18	32.72	571.07	45.27	0.480 7	6
内农薯1号 Neinongshu 1	422.33	24.73	7 669.38	30.74	450.80	44.23	0.455 4	7
冀张薯12号 Jizhangshu 12	396.00	56.06	10 602.98	17.35	434.67	41.67	0.375 9	15
中薯19号 Zhongshu 19	474.67	34.16	10 264.23	14.12	493.98	41.80	0.519 5	4
华颂7号 Huasong 7	502.67	35.56	6 476.96	16.11	518.13	48.93	0.374 3	16
华颂56 Huasong 56	494.67	42.93	8 150.41	16.98	175.69	44.40	0.373 2	17
华颂58 Huasong 58	441.33	34.50	6 991.87	41.72	611.19	44.40	0.505 1	5
希森6号 Xisen 6	547.33	40.03	7 107.05	18.37	512.18	46.07	0.453 4	8
中薯18号 Zhongshu 18	447.67	38.65	9 559.62	15.09	438.14	44.10	0.427 7	11
中薯27号 Zhongshu 27	453.67	43.27	7 886.18	29.95	491.33	45.30	0.433 7	9
中薯31号 Zhongshu 31	367.33	42.48	6 876.69	18.18	926.83	45.80	0.398 1	13
内农薯2号 Neinongshu 2	449.33	39.95	8 353.66	20.54	240.93	40.97	0.412 1	12
华颂34 Huasong 34	328.00	47.24	9 288.62	22.15	467.18	45.43	0.314 2	18
中薯668号 Zhongshu 668	389.67	42.39	13 130.08	22.98	513.67	50.97	0.427 7	10
平均 Average	450.63	43.85	8 856.52	26.47	519.98	44.64	0.453 1	
变异系数(%) CV	12.14	25.37	19.61	54.90	32.20	6.41		

2.2.2 块茎形成期生理指标的隶属函数值及抗旱性评价

在干旱胁迫条件下,不同马铃薯品种 POD 活性平均为 490.33 U/g·FW, 变异系数为 7.88%, POD 活性以‘希森6号’最高,为 565.33 U/g·FW, ‘中薯31号’最低,为 423.67 U/g·FW。MDA 含量平均为 37.93 nmol/g·FW, 变异系数为 17.87%, 其

中以‘华颂56’最高,为 50.58 nmol/g·FW, ‘中薯27号’最低,为 19.93 nmol/g·FW。可溶性糖含量平均为 10 588.68 μg/g·FW, 变异系数为 24.74%, ‘中薯668号’含量最高,为 17 168.02 μg/g·FW, ‘华颂7号’含量最低,为 6 551.49 μg/g·FW。Pro 含量平均为 27.86 μg/g·FW, 变异系数为 20.11%, 其中‘中薯18号’含量最高,为 41.22 μg/g·FW,

‘内农薯 1 号’含量最低，为 19.02 $\mu\text{g/g}\cdot\text{FW}$ 。SOD 活性平均为 791.43 $\text{U/g}\cdot\text{FW}$ ，变异系数为 8.35%，‘华颂 58’的 SOD 活性最高，为 935.02 $\text{U/g}\cdot\text{FW}$ ，最低的是‘内农薯 2 号’，为 663.30 $\text{U/g}\cdot\text{FW}$ 。SPAD 值平均为 41.44，变异系数为 7.67%，其中以‘华颂 7 号’最高，为 46.47，‘中薯 9 号’最低，为 35.70。

通过隶属函数法对 18 个马铃薯品种块茎形成期的抗旱性进行评价可知，18 个品种块茎形成期的综合抗旱性由强到弱依次为‘中薯 668 号’‘中薯 28 号’‘中薯 27 号’‘华颂 56’‘中薯 9 号’‘中薯 19 号’‘华颂 58’‘Innovator’‘内农薯 2 号’‘中薯 18 号’‘V7’‘华颂 7 号’‘冀张薯 12 号’‘华颂 34’‘内农薯 1 号’‘希森 6 号’‘中薯 31 号’‘大西洋’(表 14)。

表 14 18 个品种块茎形成期抗旱性分析
Table 14 Analysis of drought resistance for 18 varieties at tuber formation stage

品种 Variety	过氧化物酶活性 ($\text{U/g}\cdot\text{FW}$) POD activity	丙二醛含量 ($\text{nmol/g}\cdot\text{FW}$) MDA content	可溶性糖含量 ($\mu\text{g/g}\cdot\text{FW}$) Soluble sugar content	脯氨酸含量 ($\mu\text{g/g}\cdot\text{FW}$) Proline content	超氧化物歧化 酶活性 ($\text{U/g}\cdot\text{FW}$) SOD activity	SPAD 值 SPAD value	平均隶属函数值 Average membership function value	位次 Ranking
V7	512.33	44.01	11 558.27	26.12	840.48	40.67	0.412 9	11
Innovator	538.33	44.45	11 159.89	23.12	888.87	44.93	0.461 8	8
中薯 28 号 Zhongshu 28	479.33	31.31	11 348.24	34.02	806.23	41.33	0.543 2	2
中薯 9 号 Zhongshu 9	493.33	45.11	10 528.46	23.47	842.71	35.70	0.488 7	5
大西洋 Atlantic	478.00	43.36	8 417.34	27.69	772.73	41.43	0.317 9	18
内农薯 1 号 Neinongshu 1	432.33	36.57	10 413.28	19.02	738.49	36.20	0.361 5	15
冀张薯 12 号 Jizhangshu 12	434.00	34.38	12 413.28	23.08	744.44	39.53	0.390 1	13
中薯 19 号 Zhongshu 19	514.00	37.88	10 968.83	29.12	755.61	40.13	0.486 8	6
华颂 7 号 Huasong 7	522.67	39.42	6 551.49	37.48	791.34	46.47	0.410 4	12
华颂 56 Huasong 56	527.00	50.58	9 342.82	33.74	863.55	39.73	0.515 5	4
华颂 58 Huasong 58	515.00	37.01	7 365.85	29.08	935.02	42.50	0.466 3	7
希森 6 号 Xisen 6	565.33	41.17	8 082.66	24.92	751.89	45.90	0.360 5	16
中薯 18 号 Zhongshu 18	480.67	39.42	9 670.73	41.22	728.81	45.00	0.414 5	10
中薯 27 号 Zhongshu 27	485.67	19.93	15 512.20	26.54	741.47	43.43	0.541 5	3
中薯 31 号 Zhongshu 31	423.67	37.45	8 855.01	27.09	809.21	43.57	0.320 9	17
内农薯 2 号 Neinongshu 2	504.00	32.41	11 212.74	23.26	663.30	36.70	0.449 6	9
华颂 34 Huasong 34	455.00	35.47	10 027.10	27.55	752.63	41.80	0.375 9	14
中薯 668 号 Zhongshu 668	465.33	32.85	17 168.02	24.88	818.89	40.83	0.558 3	1
平均值 Average	490.33	37.93	10 588.68	27.86	791.43	41.44	0.437 6	
变异系数(%)CV	7.88	17.87	24.74	20.11	8.35	7.67		

2.2.3 块茎膨大期生理指标的隶属函数值及抗旱性评价

在干旱胁迫条件下,不同马铃薯品种POD活性平均为375.05 U/g·FW,变异系数为12.52%,POD活性以‘Innovator’最高,为448.50 U/g·FW,‘大西洋’最低,为292.50 U/g·FW。MDA含量平均为58.36 nmol/g·FW,变异系数为24.49%,其中以‘中薯18号’最高,为112.45 nmol/g·FW,‘大西洋’最低,为44.12 nmol/g·FW。可溶性糖含量平均为14 204.31 μ g/g·FW,变异系数为35.30%,‘中薯28号’含量最高,为26 158.54 μ g/g·FW,‘中薯31号’含量最低,为6 382.11 μ g/g·FW。Pro含量平均为28.02 μ g/g·FW,变异系数为54.87%,其中‘中薯28号’含量最高,为71.05 μ g/g·FW,

‘中薯18号’含量最低,为13.18 μ g/g·FW。SOD活性平均为714.36 U/g·FW,变异系数为10.27%,‘Innovator’的SOD活性最高,为825.22 U/g·FW,最低的是‘V7’,为578.44 U/g·FW。SPAD值平均为35.10,变异系数为10.97%,其中以‘中薯31号’最高,为41.07,‘内农薯1号’最低,为29.20。

采用隶属函数法对18个马铃薯品种块茎膨大期的抗旱性进行评价可知,18个品种在块茎膨大期的综合抗旱性由强到弱的顺序依次为‘中薯28号’‘Innovator’‘中薯9号’‘内农薯1号’‘大西洋’‘华颂56’‘华颂34’‘华颂58’‘中薯668号’‘华颂7号’‘中薯19号’‘希森6号’‘内农薯2号’‘V7’‘中薯27号’‘冀张薯12号’‘中薯31号’‘中薯18号’(表15)。

表15 18个品种块茎膨大期抗旱性分析

Table 15 Analysis of drought resistance for 18 varieties at tuber bulking stage

品种 Variety	过氧化物酶活性 (U/g·FW) POD activity	丙二醛含量 (nmol/g·FW) MDA content	可溶性糖含量 (μ g/g·FW) Soluble sugar content	脯氨酸含量 (μ g/g·FW) Proline content	超氧化物歧化 酶活性 (U/g·FW) SOD activity	SPAD值 SPAD value	平均隶属函数值 Average membership function value	位次 Ranking
V7	446.00	58.91	14 485.09	22.45	578.44	39.13	0.416 8	14
Innovator	448.50	59.23	13 082.66	55.62	825.22	34.17	0.738 7	2
中薯28号 Zhongshu 28	424.00	57.59	26 158.54	71.05	783.90	36.20	0.814 8	1
中薯9号 Zhongshu 9	432.50	53.65	21 490.51	18.09	810.70	33.03	0.704 2	3
大西洋 Atlantic	292.50	44.12	12 140.92	35.75	795.07	29.30	0.591 8	5
内农薯1号 Neinongshu 1	365.50	49.71	19 004.07	35.40	632.03	29.20	0.604 3	4
冀张薯12号 Jizhangshu 12	300.00	57.26	6 558.27	19.34	647.67	30.30	0.359 8	16
中薯19号 Zhongshu 19	343.50	49.05	16 253.39	14.70	741.47	38.00	0.449 9	11
华颂7号 Huasong 7	421.50	61.20	13 590.79	16.71	739.23	39.33	0.466 7	10
华颂56 Huasong 56	388.50	53.98	7 818.43	18.02	780.55	31.53	0.541 6	6
华颂58 Huasong 58	395.17	52.01	14 688.35	43.43	710.20	38.83	0.534 6	8
希森6号 Xisen 6	354.83	63.18	15 210.03	19.34	731.42	36.77	0.442 6	12
中薯18号 Zhongshu 18	356.00	112.45	13 753.39	13.18	713.55	39.73	0.239 9	18

续表 15

品种 Variety	过氧化物酶活性 (U/g·FW) POD activity	丙二醛含量 (nmol/g·FW) MDA content	可溶性糖含量 (μg/g·FW) Soluble sugar content	脯氨酸含量 (μg/g·FW) Proline content	超氧化物歧化 酶活性 (U/g·FW) SOD activity	SPAD 值 SPAD value	平均隶属函数值 Average membership function value	位次 Ranking
中薯 27 号 Zhongshu 27	312.17	54.96	14 986.45	31.18	635.38	36.20	0.392 4	15
中薯 31 号 Zhongshu 31	359.00	59.56	6 382.11	19.13	758.22	41.07	0.338 6	17
内农薯 2 号 Neinongshu 2	373.50	56.93	8 692.41	24.05	608.59	32.20	0.417 6	13
华颂 34 Huasong 34	372.00	52.66	16 361.79	23.70	655.48	31.20	0.535 8	7
中薯 668 号 Zhongshu 668	365.67	53.98	15 020.33	23.22	711.32	35.60	0.489 0	9
平均 Average	375.05	58.36	14 204.31	28.02	714.36	35.10	0.504 4	
变异系数(%) CV	12.52	24.49	35.30	54.87	10.27	10.97		

3 讨 论

叶片是植物进行光合作用的主要场所，与环境接触最为密切，因此，通过测定叶片的生理指标并根据其变化情况来判断植物对环境的适应能力是可行的。在植物的抗旱性研究中，抗氧化酶活性、MDA 含量、Pro 含量和可溶性糖含量是重要的评价指标，其中叶片相对含水量、叶绿素质量浓度和 POD 等抗氧化酶活性与抗旱性呈正相关，MDA 含量与抗旱性呈负相关^[14]。叶绿素是植物进行光合作用的重要条件，一定程度上反映植物的抗逆能力。叶绿素的合成受相对含水量的影响，相对含水量下降会导致已形成的叶绿素分解^[15]。本试验发现 18 个马铃薯品种的 POD 活性随干旱胁迫时间的延长呈现出先升高后下降的变化趋势，这与贾琼等^[11]的研究结果一致。16 个马铃薯品种 SOD 活性随干旱胁迫时间的延长呈现出先升高后下降的变化趋势，这与武敏等^[16]的研究结果一致。MDA 含量随干旱胁迫时间的延长呈现上升的变化趋势，这与张明晓等^[17]和单皓等^[18]的研究结果一致。SPAD 值随干旱胁迫时间的延长呈现不断降低的趋势，这与赵媛媛等^[19]的研究结果一致。可溶性糖含量随干旱胁迫时间的延长呈现上升的趋势，这与

干旱胁迫下马铃薯^[20]和辣椒^[21]中的可溶性糖含量变化一致。

模糊数学中的隶属函数值法不仅能规避主观分析和决策的弊端，而且能整合多主体评价信息并使其得到最优唯一解^[22]。目前，隶属函数分析法在番茄^[23]、辣椒^[24]和紫花苜蓿^[15]等作物研究上均有应用。本试验在干旱胁迫下，测定 18 个马铃薯品种在苗期、块茎形成期和块茎膨大期的 POD 活性、SOD 活性、MDA 含量、Pro 含量、可溶性糖含量和 SPAD 值，对各生理指标进行隶属函数分析。对三个时期的隶属函数值取平均值可知，‘中薯 28 号’和‘中薯 9 号’是相对抗旱的马铃薯品种。

[参 考 文 献]

[1] 李林. 25 份马铃薯种间杂交 F₁ 无性系倍性鉴定与评价 [D]. 张家口: 河北北方学院, 2021.

[2] 张烁. 中国马铃薯种植区划研究 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.

[3] Lizana X C, Avila A, Tolaba A, *et al.* Field responses of potato to increased temperature during tuber bulking: projection for climate change scenarios, at high-yield environments of Southern Chile [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2017, 239(5): 192-201.

- [4] Chaves M M, Maroco J P, Pereira J S. Understanding plant responses to drought from genes to the whole plant [J]. *Functional Plant Biology*, 2003, 30(3): 239–264.
- [5] 徐建飞, 刘杰, 卞春松, 等. 马铃薯资源抗旱性鉴定和筛选 [J]. *中国马铃薯*, 2011, 25(1): 1–6.
- [6] 刘玲玲, 李军, 李长辉, 等. 马铃薯可溶性蛋白、叶绿素及ATP含量变化与品种抗旱性关系的研究 [J]. *中国马铃薯*, 2004, 18(4): 201–204.
- [7] 宋志荣. 马铃薯对旱胁迫的反应 [J]. *中国马铃薯*, 2004, 18(6): 330–332.
- [8] 杜培兵, 杨文静. 马铃薯抗旱品种筛选及鉴定试验 [J]. *中国蔬菜*, 2018(9): 29–34.
- [9] 抗艳红, 龚学臣, 赵海超, 等. 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯生理生化指标的影响 [J]. *中国农学通报*, 2011, 27(15): 97–101.
- [10] 丁玉梅, 马龙海, 周晓罡, 等. 干旱胁迫下马铃薯叶片脯氨酸、丙二醛含量变化及与耐旱性的相关性分析 [J]. *西南农业学报*, 2013, 26(1): 106–110.
- [11] 贾琼, 张冬红, 蒙美莲, 等. PEG6000渗透胁迫对马铃薯生理特性的影响 [J]. *中国马铃薯*, 2009, 23(5): 263–267.
- [12] 郭晓敏. CIP马铃薯种质资源抗旱性筛选及评价 [D]. 张家口: 河北北方学院, 2021.
- [13] 王婷, 海梅荣, 罗海琴, 等. 水分胁迫对马铃薯光合生理特性和产量的影响 [J]. *云南农业大学学报: 自然科学版*, 2010, 25(5): 737–742.
- [14] Ryan M G. Tree responses to drought [J]. *Tree Physiology*, 2011, 31(3): 237–239.
- [15] 姜华, 毕玉芬, 陈连仙, 等. 旱作条件下紫花苜蓿生理特性的研究 [J]. *草地学报*, 2012, 20(6): 1077–1080.
- [16] 武敏, 王松, 康红梅, 等. 2种药用观赏植物的抗旱性比较 [J]. *山西农业科学*, 2021, 49(2): 146–149.
- [17] 张明晓, 于森森, 苗安宁, 等. 4个菊花品种对干旱胁迫的生理响应及抗旱性评价 [J]. *林业与环境科学*, 2023, 39(1): 81–89.
- [18] 单皓, 罗海婧, 张松, 等. 不同抗旱性小豆根系对干旱-复水的生理生态响应 [J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(1): 94–100, 127.
- [19] 赵媛媛, 石瑛, 张丽莉. 马铃薯抗旱种质资源的评价 [J]. *分子植物育种*, 2018, 16(2): 633–642.
- [20] 黄文莉, 马杰, 江敏, 等. 干旱胁迫对马铃薯抗旱生理影响及相关基因的表达 [J]. *分子植物育种*, 2021, 19(21): 7213–7221.
- [21] 谢小玉, 马仲炼, 白鹏, 等. 辣椒开花结果期对干旱胁迫的形态与生理响应 [J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3797–3805.
- [22] 蒋正文, 岳宏伟, 陈娇, 等. 基于隶属函数法的宁夏滴灌玉米灌溉制度研究 [J]. *江苏农业科学*, 2023, 51(7): 190–196.
- [23] 杨进, 严海欧, 张东, 等. 加工番茄农艺性状的主成分分析与综合评价 [J]. *种子*, 2020, 39(12): 80–84.
- [24] 张婷, 郭勤卫, 刘慧琴, 等. 基于隶属函数法的辣椒苗期耐冷性综合评价 [J]. *江西农业学报*, 2020, 32(4): 49–55.