

DOI: [10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201611044](https://doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201611044)

干旱胁迫对马铃薯不同生育时期 生理生化指标的影响*

尹智宇¹, 封永生², 肖关丽^{1**}

(1. 云南农业大学 农学与生物技术学院, 云南 昆明 650201;

2. 云南省元江县农业技术推广站, 云南 元江 650033)

摘要:【目的】探明干旱胁迫对马铃薯不同生育时期生理生化指标的影响。【方法】以云南省主栽的4个马铃薯品种(合作88、丽薯6号、宣薯2号及会-2)为试验材料,在干旱胁迫及对照条件下分别测定分析马铃薯各品种苗期、现蕾期和盛花期的生理生化指标,并对各生理生化指标变幅进行模糊隶属函数分析。【结果】不同生育时期干旱胁迫下,4个马铃薯品种的总叶绿素含量较对照处理(CK)不同差异显著性降低,各马铃薯品种的脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、SOD活性、POD活性、CAT活性及MDA含量的值均较CK不同差异显著性增加;结合各生理生化指标变幅及指标变幅的模糊隶属函数结果分析认为:现蕾期干旱胁迫对合作88的影响最大,苗期干旱胁迫对丽薯6号、宣薯2号及会-2的生长发育影响相对较大,盛花期干旱胁迫对4个马铃薯品种的生长发育影响相对较小。【结论】干旱胁迫对马铃薯生理生化指标的影响因品种和干旱时期不同而异。
关键词: 干旱胁迫; 不同生育时期; 马铃薯; 生理生化指标

中图分类号: S 532.034

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X(2018)01-0026-08

Effect of Drought Stress on the Physiological and Biochemical Indexes of Potato at Different Growth Stages

YIN Zhiyu¹, FENG Yongsheng², XIAO Guanli¹

(1. College of Agronomy and Biotechnology, Yunnan Agricultural University, Kunming 650201, China;

2. Yuanjiang Agricultural Technology Extension Station, Yuanjiang 650033, China)

Abstract: [Purpose] In order to find out the effects of drought stress on physiological and biochemical indexes of potato during different growth stages. [Methods] Four staple potato cultivars (Hezuo88, Lishu6, Xuanshu2 and Hui-2) planted in Yunnan Province were used as the experimental materials, the physiological and biochemical indexes of four potato varieties at seedling stage, squaring stage, full-bloom stage were measured and analyzed, fuzzy membership function analysis was carried out on the variation of physiological and biochemical indexes. [Result] Under drought stress at different growth stages, the total chlorophyll contents of four potato varieties were different significantly lower than that of control (CK), and the proline content, soluble protein content, SOD activity, POD activity, CAT activity and MDA content were different significantly higher than those of CK.

收稿日期: 2016-11-24

修回日期: 2017-03-17

网络出版时间: 2018-03-02

*基金项目: 云南省教育厅重大专项(ZD2015006)。

作者简介: 尹智宇(1992—),女,辽宁东港人,在读硕士研究生,主要从事马铃薯抗旱生理研究。

E-mail: 455683638@qq.com

**通信作者 Corresponding author: 肖关丽(1972—),女,云南昭通人,博士,教授,硕士生导师,主要从事作物栽培生理研究。E-mail: glxiao9@163.com

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201611044](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201611044)

Based on the change ranges and fuzzy membership function value of all physiological and biochemical indexes, squaring stage drought stress had a great impact on Hezuo88, seedling stage drought stress had the largest impact on the other varieties, while drought stress showed the minimal impact at full-bloom stage. [Conclusion] The effects of drought stress on physiological and biochemical indexes of potato were different, depending on the varieties and drought period.

Keywords: drought stress; different growth stage; potato; physiological and biochemical index

马铃薯栽培分布广, 种植马铃薯的国家多达 150 多个^[1], 中国马铃薯产业有着巨大的生产潜力与市场发展空间^[2]。云南省降水量稀少, 蒸发量大, 春季干旱频发, 干旱是制约马铃薯产业发展的重要因子^[3]。马铃薯植株在生长发育中离不开水的支持^[4], 马铃薯对干旱的抵御和适应是一个复杂的过程^[5], 生理生化指标的研究最为直观, 能够从物质能量代谢、渗透调节、保护酶系统等内在反应了解马铃薯各品种对干旱胁迫的响应。

目前, 关于干旱胁迫对马铃薯生理生化研究有很多, 但都不能为云南省旱地马铃薯生产提供全面准确的理论指导。一方面, 干旱胁迫下, 马铃薯生理生化指标间矛盾较多, 缺乏统一的抗旱鉴定标准, 另一方面, 单一生理指标研究干旱胁迫对马铃薯某个生育时期的影响不足以为云南马铃薯生产提供有效指导。在马铃薯生长发育过程中, 不同生育时期对水分的需求量不同, 不同品种于不同生育时期对干旱的响应也不同, 任何一个时期的干旱胁迫都会影响马铃薯的品质与产量, 因此有必要研究不同生育时期干旱胁迫对马铃薯相关生理指标的变化。目前, 抗艳红等^[6]已报道不同生育时期干旱胁迫对马铃薯生理生化指标的影响, 但测定的生理生化指标过少。

针对云南省的干旱现实, 采用云南省主栽的 4 个马铃薯品种 (合作 88、丽薯 6 号、宣薯 2 号及会-2) 以盆栽控水的方式, 比较各品种在苗期、现蕾期及盛花期各生理生化指标的变幅规律, 旨在找出马铃薯品种受干旱胁迫对生理生化影响最大的生育时期, 为旱地马铃薯栽培管理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

以 4 个云南省主栽马铃薯品种合作 88、丽

薯 6 号、宣薯 2 号和会-2 为试验材料, 均由云南省曲靖市农业科学院提供。

1.2 试验地点及试验设计

本试验于 2016 年 3—7 月在云南农业大学后山温室大棚内进行, 海拔 1 930 m, 供试土壤为酸性红壤风干土, 盆栽控水进行试验, 试验用盆高 27 cm, 上径 39 cm, 下径 20 cm, 每盆装土 10 kg, 施有机肥 (N+P₂O₅+K₂O, 有机质 ≥ 60%, 腐殖 ≥ 25%, pH=5.5~8) 50 g, 复合肥 [m(N):m(P):m(K)=3:1:1] 10 g, 作为基肥与土壤混匀后装盆, 每品种每处理 5 盆, 每盆 2 株。试验设苗期干旱胁迫、现蕾期干旱胁迫和盛花期干旱胁迫 3 个处理, 称重法结合烘干法进行控水, 干旱胁迫处理的持续时间视土壤相对含水量而定, 干旱胁迫的土壤相对含水量为 20%~40% 时开始进行试验。同期以正常浇水作为对照 (CK), 土壤始终保持湿润, 土壤相对含水量保持在 70%~80% 之间。苗期干旱及对照处理的生理生化指标于 4 月 23 日测定, 现蕾期干旱及对照处理的生理生化指标于 5 月 9 日测定, 盛花期干旱及对照处理的生理生化指标于 6 月 16 日测定 (胁迫结束后恢复正常浇水至成熟)。于各测定时间早上 8 点于棚中取各马铃薯品种对照及处理倒 3 及倒 4 叶置于冰盒带入实验室, 测定各品种相关生理生化指标。

1.3 测定方法

叶绿素含量测定采用浸提法^[7], 脯氨酸含量采用酸性茚三酮法测定^[8], 可溶性蛋白含量、超氧化物歧化酶 (SOD)、过氧化物酶 (POD)、过氧化氢酶 (CAT)、丙二醛含量 (MDA) 均使用南京建成生物工程研究所提供的试剂盒测定, 所有生理生化指标均 3 次重复, 结果取平均值。

1.4 数据处理

测定后计算各指标变幅: 变幅 (%)=(处理值-对照值)/对照值×100 (变幅>0 时, 为升幅; 变幅<

0 时,为降幅)。

试验数据先用 Excel 2003 进行整理,再用 SPSS 17.0 对同一马铃薯品种同一生育时期的同一指标进行配对样本 t 检验, $0.01 < P < 0.05$ 则存在显著差异, $P < 0.01$ 则存在极显著差异,并用 SPSS 17.0 对各指标变幅进行方差分析,最后使用模糊隶属函数法^[9]综合分析。

2 结果与分析

2.1 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯叶片叶绿素含量的影响

表 1 显示:苗期干旱胁迫下,合作 88 的总叶绿素含量显著低于 CK,丽薯 6 号与会-2 低于 CK,宣薯 2 号极显著低于 CK。现蕾期干旱胁迫下,合作 88 的总叶绿素含量极显著低于 CK,丽

薯 6 号、宣薯 2 号及会-2 显著低于 CK。盛花期干旱胁迫下,合作 88、会-2 的总叶绿素含量显著低于 CK,丽薯 6 号低于 CK,宣薯 2 号极显著低于 CK。苗期丽薯 6 号的总叶绿素含量变幅显著高于宣薯 2 号,合作 88 次之,会-2 最小;现蕾期合作 88 与宣薯 2 号的总叶绿素含量变幅显著高于宣薯 2 号,会-2 最小;盛花期宣薯 2 号的总叶绿素含量变幅显著高于合作 88 与宣薯 2 号,会-2,说明各生育时期干旱胁迫下,会-2 叶内能够维持较高的叶绿素含量。不同生育时期干旱胁迫下,现蕾期合作 88 的总叶绿素含量降幅显著高于盛花期,苗期最小;丽薯 6 号与会-2 不同生育时期的总叶绿素含量变幅差异不显著;宣薯 2 号盛花期总叶绿素含量降幅显著高于现蕾期,苗期降幅最小。

表 1 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯总叶绿素含量变化情况
Tab. 1 Changes of total chlorophyll content under drought stress at different growth stages of potato

总叶绿素含量/(mg·g ⁻¹) total chlorophyll content								
胁迫时期 stress stage	干旱胁迫 drought stress				对照 CK			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	1.02 A/a	0.90 A/a	0.97 A/a	1.02 A/c	1.34 A/b	1.48 A/a	1.32 A/c	1.15 A/c
现蕾期 squaring stage	1.15 B/a	1.11 B/a	1.35 AB/a	1.98 A/a	2.40 A/a	2.14 A/a	2.17 A/b	2.43 A/a
盛花期 full-bloom stage	1.48 A/a	1.46 A/a	1.35 A/a	1.59 A/b	2.27 AB/a	1.96 B/b	2.57 A/a	1.99 B/b
胁迫时期 stress stage	变幅/% change range				P 概率 P probability			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	-24.32 B/b	-37.46 C/a	-26.45 BC/b	-10.70 A/a	0.035	0.063	0.004	0.079
现蕾期 squaring stage	-52.24 B/a	-49.72 B/a	-38.03 AB/ab	-18.14 A/a	0.006	0.015	0.026	0.028
盛花期 full-bloom stage	-35.24 AB/ab	-25.92 AB/a	-47.40 B/a	-19.74 A/a	0.019	0.110	0.006	0.042

注:大写字母表示该指标在干旱、对照或变幅中的不同品种 0.05 水平的差异显著性,数据后标的小写字母表示该指标在不同生育时期 0.05 水平的差异显著性;下同。
Note: Capital letters following data in the table denote different variety in significant of difference at level 0.05 under drought, contrast and amplitude, lowercase letters following data in the table denote statistically significant difference at level 0.05 at different growth stages; the same as below.

2.2 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯叶片脯氨酸含量的影响

表 2 显示:苗期干旱胁迫下,合作 88 的脯氨酸含量高于 CK,丽薯 6 号、宣薯 2 号及会-2 极显著高于 CK。现蕾期干旱胁迫下,合作 88、宣薯 2 号及会-2 的脯氨酸含量显著高于 CK,丽薯 6 号显著高于 CK。盛花期干旱胁迫下,合作 88 与丽薯 6 号的脯氨酸含量显著高于 CK,宣薯 2 号与会-2 极显著高于 CK。苗期 4 个马铃薯品

种脯氨酸含量变幅差异不显著;现蕾期宣薯 2 号与会-2 脯氨酸含量变幅显著高于丽薯 6 号,合作 88 的变幅最小;盛花期会-2 的脯氨酸含量变幅显著高于宣薯 2 号,合作 88 次之,丽薯 6 号最小。不同生育时期干旱胁迫下,合作 88 的脯氨酸含量变幅差异不显著,丽薯 6 号现蕾期的脯氨酸含量变幅显著高于苗期与盛花期,宣薯 2 号现蕾期的脯氨酸含量变幅显著高于盛花期,苗期最小,现蕾期与盛花期的会-2 脯氨酸含量变幅显著

表 2 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯叶片脯氨酸含量的变化情况
Tab. 2 Changes of proline content under drought stress at different growth stages of potato

胁迫时期 stress stage	脯氨酸含量/($\mu\text{g}\cdot\text{mL}^{-1}$) proline content							
	干旱胁迫 drought stress				对照 CK			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	0.17 A/b	0.15 A/b	0.16 A/c	0.16 A/b	0.14 A/b	0.13 AB/c	0.14 AB/b	0.13 B/c
现蕾期 squaring stage	0.21 C/a	0.24 BC/a	0.29 A/a	0.30 AB/a	0.16 A/a	0.16 A/a	0.17 A/a	0.18 A/a
盛花期 full-bloom stage	0.18 B/ab	0.18 B/b	0.19 B/b	0.26 A/a	0.15 A/ab	0.15 A/b	0.15 A/b	0.15 A/b
胁迫时期 stress stage	变幅/% change range				P 概率 P probability			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	19.05 A/a	12.63 A/b	19.41 A/c	20.51 A/b	0.057	0.038	0.015	0.015
现蕾期 squaring stage	29.11 C/a	46.69 B/a	72.21 A/a	75.86 A/a	0.005	0.024	0.001	0.005
盛花期 full-bloom stage	22.70 BC/a	20.32 C/b	31.90 B/b	79.37 A/a	0.010	0.035	0.005	0.006

高于苗期。

2.3 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯叶片可溶性蛋白含量的影响

表 3 显示: 苗期干旱胁迫下, 合作 88 与宣薯 2 号的可溶性蛋白含量显著高于 CK, 丽薯 6 号与会-2 极显著高于 CK。现蕾期干旱胁迫下, 合作 88、丽薯 6 号的可溶性蛋白含量高于 CK, 宣薯 2 号与会-2 显著高于 CK。盛花期干旱胁迫下, 合作 88、丽薯 6 号与会-2 的可溶性蛋白含量高于 CK, 宣薯 2 号显著高于 CK。3 个生育时期干旱胁迫下, 4 个马铃薯品种可溶性蛋白含量变幅差异均不显著, 苗期与现蕾期干旱胁迫对

会-2 的影响较大, 分别较 CK 增加了 255.62% 和 27.95%, 盛花期干旱胁迫对宣薯 2 号影响较大, 较 CK 增加 24.89%。不同生育时期干旱胁迫下, 4 个马铃薯品种苗期可溶性蛋白含量变幅均显著高于现蕾期与盛花期, 说明干旱胁迫对马铃薯苗期可溶性蛋白含量的影响最大。

2.4 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯叶片 SOD 活性的影响

表 4 显示: 苗期干旱胁迫下, 合作 88 的 SOD 活性显著高于 CK, 丽薯 6 号、宣薯 2 号及会-2 的 SOD 活性均极显著高于 CK。现蕾期干旱胁迫下, 合作 88 与宣薯 2 号的 SOD 活性高于

表 3 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯叶片可溶性蛋白含量的变化情况
Tab. 3 Changes of soluble protein content under drought stress at different growth stages of potato

胁迫时期 stress stage	可溶性蛋白含量/($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$) soluble protein content							
	干旱胁迫 drought stress				对照 CK			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	63.92 A/a	49.00 AB/a	40.59 B/b	47.92 AB/a	24.60 A/a	18.34 A/b	12.55 A/c	13.59 A/b
现蕾期 squaring stage	50.32 A/ab	46.21 A/a	54.56 A/a	50.77 A/a	41.93 A/a	41.25 A/a	48.25 A/a	40.01 A/a
盛花期 full-bloom stage	37.98 A/b	33.39 B/b	38.42 A/b	36.97 A/b	35.06 A/a	30.16 A/ab	30.86 A/b	33.17 A/a
胁迫时期 stress stage	变幅/% change range				P 概率 P probability			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	199.94 A/a	177.47 A/a	224.85 A/a	255.62 A/a	0.015	0.003	0.015	0.001
现蕾期 squaring stage	20.66 A/b	12.48 A/b	13.04 A/b	27.95 A/b	0.140	0.114	0.029	0.046
盛花期 full-bloom stage	8.56 A/b	12.88 A/b	24.89 A/b	11.90 A/b	0.100	0.291	0.021	0.075

表 4 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯叶片 SOD 活性的变化情况
Tab. 4 Changes of SOD activity under drought stress at different growth stages of potato

胁迫时期 stress stage	SOD 活性 /(U·mg ⁻¹) SOD activity							
	干旱胁迫 drought stress				对照 CK			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	4.35 A/a	3.94 A/a	4.19 AB/a	2.76 B/a	1.75 B/ab	1.15 B/b	1.04 A/b	0.58 C/b
现蕾期 squaring stage	0.22 B/c	0.31 B/c	0.33 B/c	0.71 A/c	0.15 A/b	0.24 A/c	0.17 A/c	0.27 A/b
盛花期 full-bloom stage	1.97 A/b	2.40 A/b	2.60 A/b	1.93 A/b	1.71 A/a	2.14 A/a	2.16 A/a	1.45 A/a
胁迫时期 stress stage	变幅/% change range				P 概率 P probability			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
	苗期 seedling stage	320.98 AB/a	265.01 B/a	127.11 C/a	390.56 A/a	0.011	0.009	0.002
现蕾期 squaring stage	45.81 BC/b	27.64 C/b	92.98 B/ab	165.38 A/b	0.093	0.037	0.144	0.012
盛花期 full-bloom stage	16.12 AB/b	11.52 B/b	20.13 AB/b	34.08 A/c	0.009	0.097	0.065	0.002

CK, 丽薯 6 号及会-2 显著高于 CK。盛花期干旱胁迫下, 合作 88 与会-2 的 SOD 活性显著高于 CK, 丽薯 6 号、宣薯 2 号高于 CK。苗期会-2 的 SOD 变幅显著高于合作 88, 丽薯 6 号次之, 宣薯 2 号最小; 现蕾期会-2 的 SOD 变幅显著高于宣薯 2 号, 合作 88 次之, 丽薯 6 号最小; 盛花期会-2 的 SOD 变幅显著高于宣薯 2 号与合作 88, 丽薯 6 号最小, 说明在不同生育时期干旱胁迫下, 会-2 对抗和阻断因氧自由基对细胞造成的伤害的能力最强。不同生育时期干旱胁迫下, 苗期 4 个马铃薯品种的 SOD 变幅均显著高于现蕾

期与盛花期, 说明干旱胁迫对苗期马铃薯 SOD 活性的影响最大。

2.5 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯叶片 POD 活性的影响

表 5 显示: 苗期干旱胁迫下, 合作 88 的 POD 活性显著高于 CK, 丽薯 6 号高于 CK, 宣薯 2 号及会-2 极显著高于 CK。现蕾期干旱胁迫下, 4 个马铃薯品种的 POD 活性均高于 CK。盛花期干旱胁迫下, 合作 88、丽薯 6 号的 POD 活性显著高于 CK, 宣薯 2 号与会-2 的 POD 活性极显著高于 CK。苗期、现蕾期会-2 的 POD 变幅显

表 5 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯叶片 POD 活性的变化情况
Tab. 5 Changes of POD activity under drought stress at different growth stages of potato

胁迫时期 stress stage	POD 活性 /(U·mg ⁻¹) POD activity							
	干旱胁迫 drought stress				对照 CK			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	2.28 B/b	2.61 B/a	4.84 A/a	5.64 A/a	1.23 B/c	1.50 B/b	1.61 A/a	2.06 B/b
现蕾期 squaring stage	2.23 A/b	2.02 A/a	1.91 A/b	2.52 A/b	2.04 A/b	1.84 A/b	1.71 A/a	1.91 A/a
盛花期 full-bloom stage	3.19 A/a	3.18 A/a	2.94 B/b	2.66 AB/b	2.54 B/a	2.94 A/a	2.12 C/a	2.00 C/a
胁迫时期 stress stage	变幅/% change range				P 概率 P probability			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
	苗期 seedling stage	84.19 B/a	71.76 B/a	135.86 B/a	250.99 A/a	0.020	0.224	0.003
现蕾期 squaring stage	10.44 B/b	9.44 B/a	11.75 B/c	31.49 A/b	0.166	0.050	0.074	0.097
盛花期 full-bloom stage	25.82 B/b	8.13 C/a	25.63 B/b	46.80 A/b	0.021	0.015	0.002	0.001

著高于其他 3 个品种, 盛花期会-2 的 POD 变幅显著高于合作 88 与宣薯 2 号, 丽薯 6 号最小, 说明各生育时期干旱胁迫下, 会-2 减轻细胞遭受膜脂氧化的能力最强。不同生育时期干旱胁迫下, 苗期合作 88 与会-2 的 POD 变幅显著高于现蕾期、盛花期合作 88 与会-2 的 POD 变幅, 3 个生育时期丽薯 6 号的 POD 变幅差异不显著, 苗期宣薯 2 号的 POD 变幅显著高于盛花期, 现蕾期最小, 说明干旱胁迫对苗期 POD 活性的影响最大。

2.6 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯叶片 CAT 活性的影响

表 6 显示: 苗期干旱胁迫下, 合作 88、宣薯 2 号及会-2 的 CAT 活性高于 CK, 丽薯 6 号的 CAT 活性极显著高于 CK。现蕾期干旱胁迫

下, 合作 88、丽薯 6 号及宣薯 2 号的 CAT 活性均显著高于 CK, 会-2 的 CAT 活性高于 CK。盛花期干旱胁迫下, 合作 88 的 CAT 活性显著高于 CK, 丽薯 6 号及会-2 的 CAT 活性高于 CK, 宣薯 2 号的 CAT 活性极显著高于 CK。苗期丽薯 6 号 CAT 变幅最大, 合作 88 次之, 宣薯 2 号再次, 会-2 最小; 现蕾期丽薯 6 号的 CAT 变幅显著高于合作 88, 宣薯 2 号次之, 会-2 再次; 盛花期丽薯 6 号的 CAT 变幅显著高于合作 88 与宣薯 2 号, 会-2 最小, 说明各生育时期干旱胁迫下, 丽薯 6 号平衡活性氧的产生与消除能力最低, 会-2 能力最强。不同生育时期干旱胁迫下, 苗期 4 个马铃薯品种的 CAT 变幅均显著高于盛花期, 说明干旱胁迫对苗期马铃薯的 CAT 活性的影响最大, 盛花期次之, 对现蕾期影响最小。

表 6 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯叶片 CAT 活性的变化情况

Tab. 6 Changes of CAT activity under drought stress at different growth stages of potato

胁迫时期 stress stage	CAT 活性 / (U·mg ⁻¹) CAT activity							
	干旱胁迫 drought stress				对照 CK			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	2.48 A/a	2.51 A/a	1.58 A/a	1.55 A/a	0.38 A/b	0.43 A/b	0.36 A/b	0.41 A/b
现蕾期 squaring stage	1.24 B/a	1.52 A/b	1.05 C/ab	0.97 C/ab	1.03 A/a	0.98 AB/a	0.91 C/a	0.94 BC/a
盛花期 full-bloom stage	0.48 A/a	0.57 A/c	0.22 A/c	0.30 A/c	0.27 A/b	0.27 A/b	0.14 A/c	0.27 A/b
胁迫时期 stress stage	变幅/% change range				P 概率 P probability			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	361.82 A/a	500.83 A/a	328.79 A/a	276.46 A/a	0.130	0.006	0.062	0.064
现蕾期 squaring stage	20.74 B/b	54.22 A/b	14.58 BC/b	3.23 C/b	0.017	0.013	0.029	0.095
盛花期 full-bloom stage	78.43 B/ab	114.39 A/b	59.63 B/b	9.60 C/b	0.015	0.112	0.005	0.094

2.7 不同生育时期干旱胁迫对马铃薯叶片 MDA 含量的影响

表 7 显示: 苗期干旱胁迫下, 合作 88、宣薯 2 号及会-2 的 MDA 含量均显著高于 CK, 丽薯 6 号的 MDA 含量高于 CK。现蕾期干旱胁迫下, 合作 88、宣薯 2 号及会-2 的 MDA 含量高于 CK, 丽薯 6 号的 MDA 含量显著高于 CK。盛花期干旱胁迫下, 合作 88、宣薯 2 号及会-2 的 MDA 含量显著高于 CK, 丽薯 6 号的 MDA 含量高于 CK。苗期丽薯 6 号 MDA 含量变幅显著高于合作 88 与宣薯 2 号, 会-2 最小; 现蕾期丽薯 6 号 MDA 含量变幅显著高于合作 88, 宣薯 2 号

MDA 含量变幅高于会-2; 盛花期合作 88 的 MDA 含量变幅高于丽薯 6 号, 宣薯 2 号次之, 会-2 再次, 说明各生育时期干旱胁迫下, 会-2 的膜脂过氧化水平较低。不同生育时期干旱胁迫下, 4 个马铃薯品种的 MDA 变幅差异均不显著, 但苗期合作 88、丽薯 6 号及宣薯 2 号的 MDA 变幅均大于现蕾期与盛花期, 现蕾期会-2 的 MDA 变幅大于苗期与盛花期。

2.8 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯相关指标变幅的模糊函数隶属值

为避免单一指标鉴定的局限性, 对 4 个马铃薯品种的各生理生化指标变幅进行模糊隶属函数

表 7 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯叶片 MDA 含量的变化情况
Tab. 7 Changes of MDA content under drought stress at different growth stages of potato

胁迫时期 stress stage	丙二醛含量/(nmol·mg ⁻¹) MDA content							
	干旱胁迫 drought stress				对照 CK			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	0.23 A/a	0.37 A/a	0.34 A/a	0.30 A/a	0.12 B/a	0.16 AB/a	0.23 AB/a	0.25 A/a
现蕾期 squaring stage	0.10 B/b	0.33 A/a	0.09 B/b	0.06 B/b	0.06 B/a	0.17 A/a	0.06 B/a	0.05 B/b
盛花期 full-bloom stage	0.17 A/ab	0.27 A/a	0.27 A/ab	0.30 A/a	0.10 A/a	0.18 A/a	0.20 A/a	0.25 A/a
胁迫时期 stress stage	变幅/% change range				P 概率 P probability			
	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
	苗期 seedling stage	92.94 AB/a	119.92 A/a	45.62 AB/a	22.91 B/a	0.045	0.213	0.045
现蕾期 squaring stage	61.90 AB/a	97.69 A/a	39.05 B/a	37.50 B/a	0.093	0.035	0.073	0.130
盛花期 full-bloom stage	72.22 A/a	62.73 A/a	41.43 A/a	20.22 A/a	0.020	0.098	0.011	0.013

法进行综合、客观的分析。

合作 88 现蕾期的模糊隶属函数加权平均值最大，其他 3 个品种于苗期最大；现蕾期丽薯 6 号的模糊隶属函数加权平均值最小，盛花期合作 88、宣薯 2 号及会-2 的模糊隶属函数加权平均值最小。说明现蕾期干旱胁迫对合作 88 的生长发育影响最大，对丽薯 6 号的生长发育影响最小，苗期干旱胁迫对丽薯 6 号、宣薯 2 号及会-2 的影响最大，盛花期干旱胁迫对合作 88、宣薯 2 号及会-2 的影响最小(表 8)。

表 8 不同生育时期干旱胁迫下马铃薯相关指标变幅的模糊函数隶属值
Tab. 8 Fuzzy subordinative function value of potato-related index range under drought stress at different growth stages

生育时期 growth stage	合作 88 Hezuo88	丽薯 6 号 Lishu6	宣薯 2 号 Xuanshu2	会-2 Hui-2
苗期 seedling stage	0.47	0.46	0.55	0.60
现蕾期 squaring stage	0.51	0.40	0.55	0.58
盛花期 full-bloom stage	0.44	0.41	0.50	0.52

3 讨论

各生育时期干旱胁迫下，碳同化过程受阻，活性氧过量累积，SOD 酶清除细胞内多余的活性氧而较 CK 增加，POD 酶增加以保护膜脂不受损，是防止活性氧损害马铃薯植株细胞的重要的保护酶，POD 酶的增加与叶绿素的降解有关^[10]，

干旱抑制叶绿素的合成，甚至使已经合成的叶绿素分解^[11]，因此，总叶绿素含量较 CK 降低。不同生育时期干旱胁迫下，H₂O₂ 积累，CAT 活性增加以分解过量过氧化氢对马铃薯植株的损害，并将过氧化氢作为信号诱导叶绿体内的抗氧化系统^[12]。质膜受到活性氧和 H₂O₂ 的攻击，膜脂过氧化产物 MDA 含量较 CK 增加^[13]。脯氨酸和可溶性蛋白都是植物体内重要的渗透调节物质，各生育时期干旱胁迫下，脯氨酸维持细胞水势而增加，并诱导某些调控蛋白的表达，降低渗透势，可溶性蛋白含量增加^[14]。不同生育时期干旱胁迫下，马铃薯通过改变自身生理生化水平来适应和抵御干旱环境，不同品种表现不同的调节能力和生理生化水平，因此，4 个马铃薯品种的总叶绿素含量较 CK 不同差异显著性降低，脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性及 MDA 含量的值均较 CK 不同差异显著性增加，与前人研究结果基本一致^[15-17]。

本研究认为：总叶绿素含量及 MDA 含量变幅越小，脯氨酸含量、可溶性蛋白含量、SOD 活性、POD 活性及 CAT 活性变幅越大，马铃薯品种的抗旱性越强，反之，品种抗旱性越弱。不同马铃薯品种于不同生育时期对干旱的响应不同，这与生育时期和不同马铃薯品种生理特性密切相关，仅凭生理生化指标变幅难以准确评价对马铃薯生长发育影响最大的时期，因此综合各生理生化指标变幅及模糊隶属函数综合评价，认为现蕾

期干旱胁迫对合作 88 影响最大, 苗期干旱胁迫对其他 3 个品种影响相对较大, 盛花期干旱胁迫对 4 个马铃薯品种的生长发育影响相对较小。抗艳红等^[6]研究不同生育时期干旱胁迫对生理生化的影响, 认为盛花期干旱胁迫对马铃薯生理生化指标的影响较大, 而研究不同生育时期干旱胁迫对马铃薯产量及品质的影响, 认为现蕾期干旱胁迫对马铃薯块茎形成和产量影响最大^[18], 本试验结果与前人研究结果不一致。

马铃薯苗期是保证大旱之年丰产的重要时期, 4 个马铃薯品种于苗期干旱胁迫的 SOD 活性、POD 活性及 CAT 活性变幅均显著高于现蕾期与盛花期的指标变幅, 且苗期丽薯 6 号与会-2 的模糊隶属函数值高于现蕾期与盛花期, 苗期与现蕾期宣薯 2 号的模糊隶属函数值高于盛花期, 说明苗期干旱胁迫对丽薯 6 号、宣薯 2 号及会-2 的影响较大。现蕾期的地上地下部分开始同步生长, 是需水量最大的时期, 也是马铃薯营养生长的关键时期。本试验中, 现蕾期合作 88 的叶绿素含量变幅显著高于苗期与盛花期, 且现蕾期合作 88 的模糊隶属函数值高于苗期与盛花期, 说明现蕾期干旱胁迫对合作 88 的影响较大。盛花期是地上部分生长最旺盛的阶段, 该时期应控制植株旺长, 以保证地下薯块的膨大生长。盛花期干旱胁迫下, 丽薯 6 号总叶绿素含量、POD 活性、MDA 含量, 会-2 可溶性蛋白含量、MDA 含量, 合作 88 可溶性蛋白含量, 以及 4 个马铃薯品种的 SOD 活性均表现较小变幅, 说明盛花期干旱胁迫对马铃薯生长发育影响相对较小。

4 结论

不同生育时期干旱胁迫对马铃薯的影响因品种而异, 综合各生理生化指标变幅及模糊隶属函数综合评价, 认为现蕾期干旱胁迫对合作 88 影响最大, 苗期干旱胁迫对其他 3 个品种的生长发育影响相对较大, 盛花期干旱胁迫对 4 个马铃薯品种的生长发育影响相对较小。

[参考文献]

- [1] 张丽莉, 石瑛, 祁雪, 等. 干旱胁迫对马铃薯叶片超微结构及生理指标的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015(2): 75. DOI: 10.16302/j.cnki.1000-7601.2015.02.012.
- [2] 杨帅, 闵凡祥, 高云飞, 等. 新世纪中国马铃薯产业发展现状及存在问题[J]. 中国马铃薯, 2014(5): 311. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3635.2014.05.012.
- [3] 韦冬萍, 韦剑锋, 吴炫柯, 等. 马铃薯水分需求特性研究进展[J]. 贵州农业科学, 2012, 40(4): 66. DOI: 10.3969/j.issn.1001-3601.2012.04.019.
- [4] 英潘. 干旱胁迫对不同甘蔗品种宿根蔗抗旱生态生理特性及产量品质的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [5] 张明生, 谈锋, 张启堂. 快速鉴定甘薯品种抗旱性的生理指标及方法的筛选[J]. 中国农业科学, 2001, 34(3): 260. DOI: 10.3321/j.issn:0578-1752.2001.03.006.
- [6] 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.
- [7] 汤章城. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [8] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [9] 何雪银, 文仁来, 吴翠荣, 等. 模糊隶属函数法对玉米苗期抗旱性的分析[J]. 西南农业学报, 2008, 21(1): 52. DOI: 10.3969/j.issn.1001-4829.2008.01.012.
- [10] YAMAUCHI N, MINAMIDE T. Chlorophyll degradation by peroxidase in parsley leaves[J]. Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, 1985, 54(2): 265.
- [11] 张明生, 谢波, 谈锋, 等. 甘薯可溶性蛋白、叶绿素及 ATP 含量变化与品种抗旱性关系的研究[J]. 中国农业科学, 2003, 36(1): 13. DOI: 10.3321/j.issn:0578-1752.2003.01.003.
- [12] 尹贇鹏, 孙孟超, 商志伟, 等. 光合菌对干旱胁迫下欧李幼苗膜质和叶绿素荧光特性的影响[J]. 经济林研究, 2011, 29(4): 41. DOI: 10.3969/j.issn.1003-8981.2011.04.008.
- [13] 罗丽兰, 石雷, 姜闯道, 等. 不同温度下新铁炮百合幼苗的光合特性及其保护机制[J]. 园艺学报, 2008, 35(1): 131. DOI: 10.3321/j.issn:0513-353X.2008.01.023.
- [14] 丛雪, 齐华, 孟凡超, 等. 干旱胁迫对玉米叶绿素荧光参数及质膜透性的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(5): 141.
- [15] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3635.2004.04.003.
- [16] 李建武, 王蒂, 雷武生. 干旱胁迫对马铃薯叶片膜保护酶系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2007, 9(3): 100. DOI: 10.3969/j.issn.1002-1302.2007.03.037.
- [17] 田丰, 张永成, 张凤军, 等. 不同品种马铃薯叶片游离脯氨酸含量、水势与抗旱性的研究[J]. 作物杂志, 2009(2): 73. DOI: 10.3969/j.issn.1001-7283.2009.02.020.
- [18] 抗艳红, 赵海超, 龚学臣, 等. 不同生育期干旱胁迫对马铃薯产量及品质的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(30): 16820. DOI: 10.3969/j.issn.0517-6611.2010.30.042.