

DOI: 10.3724/SP.J.1006.2022.14031

研究简报

不同抗旱性甘薯品种叶片生理性状差异及抗旱指标筛选

张海燕¹ 解备涛¹ 姜常松² 冯向阳³ 张巧⁴ 董顺旭¹ 汪宝卿¹
张立明⁵ 秦桢¹ 段文学^{1,*}

¹ 山东省农业科学院作物研究所 / 农业农村部黄淮海薯类科学观测实验站 / 特色作物山东省工程实验室, 山东济南 250100; ² 海阳市农业技术推广中心, 山东海阳 265100; ³ 昌乐县农业农村局, 山东昌乐 262400; ⁴ 高唐县农业农村局, 山东高唐 252800; ⁵ 山东省农业科学院, 山东济南 250100

摘要: 在人工控水条件下, 以 15 个甘薯品种为试验材料, 设置正常灌水和干旱胁迫 2 个土壤水分处理, 研究了干旱胁迫条件下不同甘薯品种叶片生理特性的差异。结果表明, 干旱胁迫条件下, 叶面积系数均不同程度下降, 反映了品种抗旱性的差异。通过抗旱系数聚类分析, 将 15 个甘薯品种分为 3 个抗旱类型, 抗旱品种: 济薯 21、济薯 25、济徐 23、济薯 15、烟薯 25; 中等抗旱品种: 徐薯 18、济薯 26、北京 553、济紫薯 2 号、济薯 18; 不抗旱品种: 郑薯 20、济紫薯 3 号、济薯 22、济紫薯 1 号、凌紫。叶面积系数与抗旱系数的相关性分析表明, 干旱胁迫条件下抗旱性强的甘薯品种可维持较高的叶面积系数; 而正常灌水条件下的叶面积系数不能反映甘薯品种抗旱性。干旱胁迫导致功能叶叶绿素含量和相对含水量下降, 叶片相对电导率升高。干旱胁迫条件下, 功能叶叶绿素含量和相对含水量与甘薯品种的抗旱性呈显著正相关关系, 而功能叶相对电导率则与甘薯品种抗旱性呈显著的负相关关系。因此, 叶面积系数以及功能叶叶绿素含量、相对含水量和相对电导率等指标可作为甘薯品种抗旱性鉴定的评价指标。

关键词: 甘薯; 抗旱性; 生理特性; 抗旱指标

Screening of leaf physiological characteristics and drought-tolerant indexes of sweetpotato cultivars with drought resistance

ZHANG Hai-Yan¹, XIE Bei-Tao¹, JIANG Chang-Song², FENG Xiang-Yang³, ZHANG Qiao⁴, DONG Shun-Xu¹, WANG Bao-Qing¹, ZHANG Li-Ming⁵, QIN Zhen¹, and DUAN Wen-Xue^{1,*}

¹ Crop Research Institute of Shandong Academy of Agricultural Sciences / Scientific Observation and Experimental Station of Tubers and Root Crops in Huang-Huai-Hai Region, Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Shandong Engineering Laboratory of Featured Crops, Jinan 250100, Shandong, China; ² Agricultural Technology Extension Center of Haiyang, Haiyang 265100, Shandong, China; ³ Agricultural and Rural Bureau of Changle, Changle 262400, Shandong, China; ⁴ Agricultural and Rural Bureau of Gaotang, Gaotang 252800, Shandong, China; ⁵ Shandong Academy of Agricultural Sciences, Jinan 250100, Shandong, China

Abstract: Field experiments were conducted under a rain proof shelter using 15 sweetpotato cultivars with well-watered and drought stress treatments. Leaf physiological characteristics of different sweetpotato cultivars under drought stress were studied. The results showed that the leaf area index of all varieties decreased in different degrees under drought stress, which evaluating the difference of drought tolerance in varieties. Cluster analysis of drought resistance coefficient revealed that 15 sweetpotato cultivars were classified into three drought resistant types. The drought-tolerant cultivars were Jishu 21, Jishu 25, Jixu 23, Jishu 15, and Yanshu 25. The moderate drought-tolerant cultivars were Xushu 18, Jishu 26, Beijing 553, Jizishu 2, and Jishu 18. The drought-sensitive cultivars were Zhengshu 20, Jizishu 3, Jishu 22, Jizishu 1, and Ayamaraski. The correlation analysis between

本研究由国家重点研发计划项目(2020YFD1000800, 2020YFD1000804), 山东省薯类产业技术体系项目(SDAIT-16-09), 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019ZZ022), 山东省重点研发项目(2019GNC106080)和山东省良种工程项目(2020LZGC004)资助。

This study was supported by the National Key Research and Development Program of China (2020YFD1000800, 2020YFD1000804), the Shandong Province Tubers and Root Crops Research System (SDAIT-16-09), the Major Agricultural Application Technological Innovation Project in Shandong Province (SD2019ZZ022), the Shandong Provincial Key Research and Development Program (2019GNC106080), and the Shandong Provincial Improved Seed Project (2020LZGC004).

* 通信作者(Corresponding author): 段文学, E-mail: duanwenxue2010@163.com

第一作者联系方式: E-mail: zhang_haiyan02@163.com

Received (收稿日期): 2021-02-19; Accepted (接受日期): 2021-04-26; Published online (网络出版日期): 2021-06-15.

URL: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20210615.1409.010.html>

leaf area index and drought resistance coefficient demonstrated that the drought-tolerant cultivars could maintain higher leaf area index under drought stress, while the leaf area index under well-watered could not reflect the drought resistance. Drought stress resulted in the decline of chlorophyll content, the relative water content of functional leaves, and the increase of relative electrical conductivity of functional leaves. Under drought stress, the chlorophyll content and relative water content of functional leaves were significantly positively correlated with drought resistance in different cultivars, while the relative electrical conductivity of functional leaves was significantly negatively correlated with the drought resistance of sweetpotato varieties. In summary, leaf area index, chlorophyll content, relative water content, and relative electrical conductivity of functional leaves could be used as comprehensive evaluation indexes for identifying drought resistance of sweetpotato cultivars.

Keywords: sweetpotato; drought resistant; physiological characteristics; drought-tolerant indicators

我国甘薯种植面积仅次于小麦、玉米、水稻等大宗作物,是保证粮食安全的底线作物、工业用途广泛的原料作物和具有特殊价值的保健作物,但作为抗旱作物,其抗旱栽培技术被忽视,导致潜在的生产能力因土壤水分亏缺而不能正常发挥。我国70%以上的甘薯分布在旱作地区,季节性干旱限制了甘薯产量的提高,干旱胁迫引起甘薯减产幅度在25%以上^[1]。旱作地区水资源的匮乏导致以灌溉途径提高甘薯产量受到限制,因此,选育抗旱品种成为提高旱地甘薯产量最有效的技术途径。开展种质资源抗旱性鉴定研究可为育种者提供适应性强、抗旱性好的优异种质,促进甘薯抗旱品种选育及新品系高效鉴定,对我国旱作地区甘薯产量稳步提高具有重要意义。

抗旱性是受多基因控制的复杂数量性状,作物之间抗旱指标存在差异,是多个抗旱性状的综合反映^[2-3],因此,作物抗旱性鉴定需要将形态性状、生理生化、产量等指标相结合,对各个时期的抗旱性进行综合评价^[4]。甘薯抗旱性不仅与基因型^[5-6]、生育期^[7-8]、形态性状以及生理生化反应^[8-10]有关,还受干旱胁迫程度、时期和持续时间等的影响^[7-8],是基因型与环境互作的结果。甘薯对干旱胁迫的适应主要有避旱、御旱和耐旱3种机制,通过植株形态、气孔开闭、酶保护系统、激素调控等方式进行调控^[1,11]。近年来,关于甘薯抗旱性研究比较广泛,已筛选出与抗旱性有关的生理生化指标,如脯氨酸、丙二醛(MDA)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等^[8-10]。已有研究认为,应用单一性状指标鉴定甘薯抗旱性局限性很大,为准确地评价甘薯品种的抗旱性,在对各抗旱指标及其与品种抗旱性关系进行研究的基础上,采用抗旱系数法、聚类分析法、隶属函数法对品种抗旱适应性进行了综合评价研究^[12-14]。刘恩良等^[15]、周志林等^[16]利用大田自然干旱鉴定法在甘薯品种抗旱指标筛选、抗旱适应性的形态指标和生理指标等方面对部分甘薯品种进行了抗旱性鉴定评价,明确了渗透调节能力、抗氧化酶活性与抗旱性的关系,提出了利用抗旱指数法进行甘薯抗旱鉴定评价,但是该方法局限性很大,需要建立高效的室内辅助抗旱鉴定评价体系,且不宜大批量试验材料或者育种后代材料等的初步筛选。因此,为更全面准确地评价甘薯品种的抗旱性,本研究在人工控水条件下,对生产中种植面积较大的淀粉型、鲜食型和

色素型3种类型甘薯品种进行全生育期抗旱性评价,研究干旱胁迫条件下不同甘薯品种叶片生理性状的差异,以期甘薯新品种选育和新品系鉴定提供理论依据,为干旱地区甘薯生产提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

以生产中推广种植的3个类型15个代表性甘薯品种为供试材料(表1)。2012—2013年在山东省农业科学院试验场防雨旱棚内进行,抗旱池(长×宽=6 m×4 m,深为2 m)四周水泥,底部开放。栽插时间分别为2012年6月12日和2013年6月10日,栽插密度为57,145株/hm²,小区面积24 m²,收获时间分别为10月11日和10月9日,生育期均为122 d。试验设正常灌水(土壤相对含水量75%±5%,对照)和干旱胁迫(土壤相对含水量35%±5%)2个处理。采用测墒补灌的方法,保证抗旱池内土壤水分含量保持在目标水分含量范围内。随机区组设计,重复3次。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 抗旱系数 参照张明生等^[17]的方法计算抗旱系数(drought resistance coefficient, DC),DC=干旱胁迫条件下的鲜薯产量/正常灌水条件下的鲜薯产量。抗旱系数≥0.6为抗旱品种,0.4≤抗旱系数<0.6为中等抗旱品种,抗旱系数<0.4为不抗旱品种^[15]。

1.2.2 田间取样方法 栽后40 d(蔓薯并长期)、60 d(蔓薯并长期)、80 d(块根快速膨大期)和100 d(块根快速膨大期),连续选取代表性植株5株,取主茎倒四叶,用于功能叶片叶绿素含量、相对含水量和相对电导率的测定。

1.2.3 叶面积系数 栽后120 d(收获期),田间选取代表性植株5株,测量出所有叶片的长(沿叶脉测量)和宽(最宽处测量),所有叶片长乘以宽之和测算出单株虚叶面积,叶面积系数=单株虚叶面积×0.6×种植密度(株/hm²)/10,000^[18]。

1.2.4 功能叶叶绿素含量 将选取的代表性叶片,蒸馏水冲洗干净后,用吸水纸吸干表面水分。称取待测样品0.5 g左右,充分研磨后转入具塞刻度试管中,加95%乙醇15 mL,封口,闭光保存48 h。以95%乙醇为空白,在波长665 nm、649 nm下测定光密度。 $C_a=13.95D_{665}-6.88D_{649}$; $C_b=24.96D_{649}-7.32D_{665}$ 。式中 D_{649} 和 D_{665} 为待测样

品在波长 649 nm 和 665 nm 的吸光度, Ca、Cb 分别为叶绿素 a 和 b 的浓度。色素含量(mg g⁻¹ FW)=色素的浓度 C (mg L⁻¹)×提取液体积(L)/样品鲜重(g)^[19]。

1.2.5 功能叶相对含水量和相对电导率 将选取的代表性叶片用于测定。采用称重法^[19]测定叶片相对含水量, 分别称取鲜重(Wf)、饱和重(Wt)和干重(Wd), 叶片相对含水量 (leaf relative water content, LWC, %)=(Wf-Wd)/(Wt-Wd)×100。

表 1 试验材料名称、类型及选育单位
Table 1 Cultivars, breeding units, and types of experimental materials

序号 No.	品种名称 Cultivar name	选育单位 Breeding unit	品种类型 Types
1	徐薯 18 Xushu 18	中国江苏徐州甘薯研究中心 Xuzhou Sweetpotato Research Center, China	淀粉型 High-starch
2	济薯 15 Jishu 15	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
3	济薯 21 Jishu 21	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
4	济徐 23 Jixu 23	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
5	济薯 25 Jishu 25	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
6	北京 553 Beijing 553	中国原华北农业科学研究所 North Institute of Agricultural Sciences, China	鲜食型 Table-used
7	郑薯 20 Zhengshu 20	中国河南省农业科学院粮食作物研究所 Crop Research Institute of HAAS, China	
8	烟薯 25 Yanshu 25	中国烟台市农业科学研究院 Yantai Academy of Agricultural Sciences, China	
9	济薯 22 Jishu 22	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
10	济薯 26 Jishu 26	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
11	凌紫 Ayamaraski	日本品种 Japanese Genotype	色素型 Rich in pigment
12	济薯 18 Jishu 18	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
13	济紫薯 1 号 Jizishu 1	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
14	济紫薯 2 号 Jizishu 2	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	
15	济紫薯 3 号 Jizishu 3	中国山东省农业科学院作物研究所 Crop Research Institute of SAAS, China	

SAAS: Shandong Academy of Agricultural Sciences; HAAS: Henan Academy of Agricultural Sciences.

采用浸泡法^[20]测定叶片相对电导率, 将叶片剪成长条, 置于 10 mL 去离子水的刻度试管中, 室温下浸泡处理 12 h, 测定浸提液电导率(R1), 沸水浴加热 30 min 后, 再次测定浸提液电导率(R2), 相对电导率=R1/R2×100%。

1.2.6 相对值(relative value, RV) RV=干旱胁迫条件下的指标值/正常灌水条件下的指标值。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2010 对数据进行分析并作图, 采用 DPS v8.01 版数据处理系统进行方差分析、差异显著性检验和聚类分析。本试验采用 2 年数据, 方差分析结果表明, 各指标及其与年份间的互作不显著, 试验结果趋势基本一致, 因此, 均采用 2 年的平均值进行分析。

2 结果与分析

2.1 不同甘薯品种的叶面积系数及其与抗旱系数的相关性

由表 2 可知, 各品种在干旱胁迫条件下, 叶面积系数均不同程度下降, 反映了品种抗旱性的差异, 按照抗旱系数对 15 个甘薯品种进行抗旱性分级, 抗旱品种: 济薯 21、济薯 25、济徐 23、济薯 15、烟薯 25; 中等抗旱品种: 徐薯 18、济薯 26、北京 553、济紫薯 2 号、济薯 18; 不抗旱品种: 郑薯 20、济紫薯 3 号、济薯 22 号、济紫薯 1 号、

凌紫。对叶面积系数与抗旱系数进行相关性分析表明, 正常灌水条件下, 叶面积系数与品种抗旱性相关性不显著; 干旱胁迫条件下, 叶面积系数与品种抗旱性呈显著的正相关。说明干旱胁迫条件下, 抗旱性强的甘薯品种可维持较高的叶面积系数; 而正常灌水条件下的叶面积系数不能反映甘薯品种抗旱性。

2.2 干旱胁迫对不同甘薯品种功能叶生理特性的影响

2.2.1 功能叶叶绿素含量 15 个参试品种的功能叶叶绿素含量变化趋势基本一致, 从栽后 60 d 开始, 叶绿素含量呈下降的趋势, 所有品种栽后 100 d 的叶绿素含量均低于栽后 60 d。干旱胁迫导致叶绿素含量下降, 所有品种干旱胁迫处理的叶绿素含量均低于对照, 品种间降幅不同, 表现为抗旱性强的品种叶绿素含量降幅小, 抗旱性弱的品种降幅大。各生育期叶绿素含量降幅不同, 叶绿素含量相对值随着生育进程逐渐降低, 栽后 60 d 在 0.51~0.76 之间, 栽后 100 d 在 0.42~0.67 之间(表 3)。从不同品种类型叶绿素含量相对值来看, 淀粉型、鲜食型和色素型 3 种类型间叶绿素含量相对值无特异性差异, 叶绿素含量相对值高的品种中既有淀粉型品种, 又有鲜食型品种和色素型品种。说明干旱胁迫导致甘薯功能叶的叶绿素含量降低, 品种间降幅不同反映了抗旱性的差异, 抗旱性强的品种可在干旱胁迫条件下保持较高的功能叶叶绿素含量。

表 2 不同甘薯品种的叶面积系数及其与抗旱系数的相关性分析

Table 2 Leaf area index of different sweetpotato cultivars and its correlation coefficients with drought resistance coefficient

品种 Cultivar	抗旱系数 DC		叶面积系数 LAI			
	2012	2013	2012		2013	
			对照 Control	干旱 Drought	对照 Control	干旱 Drought
济薯 21 Jishu 21	0.71 a	0.73 a	3.67 d	2.54 cd	3.46 h	2.23 de
济薯 25 Jishu 25	0.70 a	0.68 b	6.52 b	3.89 ab	6.19 cd	3.56 b
济徐 23 Jixu 23	0.69 ab	0.65 c	6.31 bc	3.57 b	5.97 d	3.94 a
济薯 15 Jishu 15	0.67 bc	0.63 d	3.96 d	2.35 cde	3.74 fg	2.03 ef
烟薯 25 Yanshu 25	0.65 c	0.63 cd	6.89 ab	4.24 a	6.52 b	3.88 a
徐薯 18 Xushu 18	0.55 ef	0.57 e	5.73 c	2.87 c	5.42 e	2.55 c
济薯 26 Jishu 26	0.58 d	0.54 ef	7.28 a	3.64 b	7.20 a	3.37 b
北京 553 Beijing 553	0.57 de	0.53 fg	3.61 d	1.82 defg	3.39 h	1.79 g
济紫薯 2 号 Jizishu 2	0.51 f	0.53 g	3.33 de	1.69 fgh	3.10 i	1.56 h
济薯 18 Jishu 18	0.49 g	0.51 ef	3.47 de	1.69 fgh	3.11 i	1.63 gh
郑薯 20 Zhengshu 20	0.39 h	0.36 h	3.71 d	1.41 gh	3.50 gh	1.19 i
济紫薯 3 号 Jizishu 3	0.37 hi	0.38 h	6.91 ab	2.72 c	6.58 bc	2.19 d
济薯 22 Jishu 22	0.38 h	0.35 hi	4.06 d	1.72 efgh	3.83 f	1.59 h
济紫薯 1 号 Jizishu 1	0.34 i	0.35 i	6.76 ab	2.27 cdef	6.41 bc	2.03 f
凌紫 Ayamarakski	0.35 i	0.33 i	2.87 e	1.13 h	2.69 j	1.01 j
相关系数 Correlation coefficient	—	—	0.17	0.65*	0.17	0.68**

数据为 3 次重复的平均值。同列数据后不同小写字母表示处理间差异达到 0.05 显著水平。*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著。

DC: drought resistance coefficient; LAI: leaf area index. Data are the means of three replicates. Values followed by different lowercase letter within a column are significantly different at the 0.05 probability level among treatments. * and ** indicate significantly different at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

表 3 干旱胁迫对甘薯功能叶叶绿素含量的影响

Table 3 Effects of drought stress on chlorophyll content of functional leaves in sweetpotato (mg g^{-1} FW)

年份 Year	品种 Cultivar	栽后 60 d 60 DAP			栽后 100 d 100 DAP		
		对照 Control	干旱 Drought	相对值 RV	对照 Control	干旱 Drought	相对值 RV
2012	济薯 21 Jishu 21	2.84 ab	2.16 a	0.76 a	1.65 c	1.11 a	0.67 a
	济徐 23 Jixu 23	2.90 a	2.18 a	0.75 a	1.72 bc	1.09 a	0.63 ab
	济薯 25 Jishu 25	2.68 b	1.84 b	0.68 ab	1.68 c	1.02 a	0.61 bc
	凌紫 Ayamarakski	2.71 ab	1.75 b	0.65 b	1.75 bc	0.78 c	0.45 ij
	济薯 15 Jishu 15	2.20 c	1.38 d	0.63 bc	1.49 d	0.88 b	0.59 bc
	北京 553 Beijing 553	2.59 bc	1.64 bc	0.63 bc	1.85 b	1.05 a	0.57 cd
	济紫薯 1 号 Jizishu 1	2.01 c	1.23 e	0.61 bc	1.23 e	0.67 d	0.54 def
	郑薯 20 Zhengshu 20	2.03 c	1.24 e	0.61 bc	1.67 c	0.85 b	0.51 ef
	济薯 26 Jishu 26	2.89 a	1.73 b	0.60 bc	1.96 ab	1.02 a	0.52 efgh
	济紫薯 3 号 Jizishu 3	2.65 b	1.55 c	0.58 cd	1.97 ab	1.09 a	0.55 cde
	徐薯 18 Xushu 18	2.83 ab	1.64 bc	0.58 cd	2.25 a	1.12 a	0.50 fgh
	烟薯 25 Yanshu 25	2.60 b	1.51 c	0.58 cd	2.24 a	1.07 a	0.48 hi
	济薯 18 Jishu 18	2.19 c	1.18 e	0.54 d	1.79 bc	0.88 b	0.49 gi
	济薯 22 Jishu 22	2.54 b	1.37 d	0.54 d	1.82 b	0.87 b	0.48 hi
	济紫薯 2 号 Jizishu 2	2.82 ab	1.54 c	0.54 d	1.80 b	0.78 c	0.43 j

(续表 3)

年份 Year	品种 Cultivar	栽后 60 d 60 DAP			栽后 100 d 100 DAP		
		对照	干旱	相对值	对照	干旱	相对值
		Control	Drought	RV	Control	Drought	RV
2013	济薯 21 Jishu 21	2.45 bc	1.77 a	0.72 a	1.55 cde	1.03 a	0.67 a
	济薯 25 Jishu 25	2.29 bc	1.56 c	0.68 ab	1.58 cd	1.03 a	0.65 ab
	济徐 23 Jixu 23	2.51 ab	1.69 b	0.67 bc	1.62 cd	0.99 a	0.61 b
	烟薯 25 Yanshu 25	2.21 bc	1.45 d	0.66 bc	1.94 ab	1.05 a	0.54 cd
	济薯 18 Jishu 18	1.96 cd	1.23 f	0.63 cd	1.23 fg	0.69 b	0.56 c
	济紫薯 1 号 Jizishu 1	2.98 a	1.76 a	0.59 de	0.96 hij	0.49 c	0.51 def
	济紫薯 2 号 Jizishu 2	2.29 bc	1.34 e	0.58 e	0.83 j	0.45 c	0.54 cd
	济紫薯 3 号 Jizishu 3	2.12 bcd	1.22 f	0.58 e	1.74 bc	0.92 a	0.53 cde
	济薯 22 Jishu 22	1.67 d	0.97 g	0.58 e	0.89 ij	0.47 c	0.53 cde
	济薯 15 Jishu 15	2.21 bc	1.29 f	0.58 e	1.19 fgh	0.58 bc	0.49 efg
	北京 553 Beijing 553	2.20 bcd	1.25 f	0.57 e	1.49 de	0.69 b	0.46 gh
	济薯 26 Jishu 26	2.46 bc	1.38 e	0.56 ef	1.99 a	0.95 a	0.48 fg
	凌紫 Ayamaraski	2.18 bcd	1.22 f	0.56 ef	1.05 ghi	0.48 c	0.46 gh
	郑薯 20 Zhengshu 20	2.42 bc	1.27 f	0.52 f	1.37 ef	0.58 bc	0.42 h
	徐薯 18 Xushu 18	2.44 bc	1.25 f	0.51 f	2.15 a	1.02 a	0.48 fg

数据为 3 次重复的平均值。同列数据后不同小写字母表示同一年份处理间差异达到 0.05 显著水平。
RV: relative value; DAP: days after planting. Data are shown in mean of three replicates. Values followed by different lowercase letter within a column are significantly different at the 0.05 probability level among treatments in the same year.

2.2.2 功能叶相对含水量 表 4 可见, 15 个甘薯品种的功能叶相对含水量变化趋势基本一致, 从栽后 60 d 开始, 功能叶相对含水量呈下降的趋势, 所有品种栽后 100 d 的功能叶相对含水量均低于栽后 60 d。干旱胁迫导致功能叶相对含水量下降, 所有品种干旱胁迫处理的功能叶相对含水量均低于对照, 品种间降幅不同, 表现为抗旱性强的品种功能叶相对含水量降幅小, 抗旱性弱的品种降幅大。各生育期功能叶相对含水量降幅不同, 功能叶相对含水量相

对值随着生育进程逐渐降低, 栽后 60 d 在 0.56~0.81 之间, 栽后 100 d 在 0.48~0.71 之间(表 3)。从不同品种类型功能叶相对含水量相对值来看, 淀粉型、鲜食型和色素型 3 种类型间相对含水量相对值无特异性差异, 相对含水量相对值高的品种中既有淀粉型品种, 又有鲜食型品种和色素型品种。说明干旱胁迫导致甘薯功能叶相对含水量降低, 品种间降幅不同反映了抗旱性的差异, 抗旱性强的品种可在干旱胁迫条件下保持较高的功能叶相对含水量, 相对值较高。

表 4 干旱胁迫对甘薯功能叶相对含水量的影响
Table 4 Effects of drought stress on relative water content of functional leaves in sweetpotato (%)

年份 Year	品种 Cultivar	栽后 60 d 60 DAP			栽后 100 d 100 DAP		
		对照	干旱	相对值	对照	干旱	相对值
		Control	Drought	RV	Control	Drought	RV
2012	济徐 23 Jixu 23	86.66 b	69.84 a	0.81 a	82.01 bcd	55.40 b	0.68 abc
	郑薯 20 Zhengshu 20	83.14 ef	64.23 bc	0.77 b	79.72 ef	48.33 de	0.61 def
	济薯 15 Jishu 15	83.72 de	62.58 bc	0.75 b	79.87 ef	51.98 cd	0.65 bcd
	济薯 21 Jishu 21	84.19 cde	62.52 bc	0.74 bc	80.76 cde	55.75 b	0.69 abc
	济薯 25 Jishu 25	89.22 a	65.50 ab	0.73 b	84.50 a	59.85 a	0.71 a
	济紫薯 2 号 Jizishu 2	81.20 fg	59.56 bcd	0.73 bcd	78.40 f	50.38 cd	0.64 cd
	济薯 26 Jishu 26	89.20 a	62.35 bc	0.70 cde	81.69 bcd	53.14 bc	0.65 bcd
	烟薯 25 Yanshu 25	85.25 bcd	58.94 cde	0.69 def	82.66 abc	45.95 ef	0.56 fgh
	徐薯 18 Xushu 18	82.40 ef	54.57 ef	0.66 efg	79.17 ef	48.33 de	0.61 def
	济紫薯 3 号 Jizishu 3	85.94 bc	56.95 de	0.66 efg	80.61 de	49.52 cd	0.61 def
	北京 553 Beijing 553	80.36 g	52.53 f	0.65 fg	78.33 f	48.94 de	0.62 de
	济薯 18 Jishu 18	78.33 h	50.78 f	0.65 fg	74.57 g	43.02 f	0.58 efg
	济薯 22 Jishu 22	80.77 g	51.26 f	0.63 gh	80.10 ef	51.55 cd	0.64 cd
	济紫薯 1 号 Jizishu 1	87.01 b	54.95 def	0.63 gh	83.46 ab	43.45 f	0.52 h
	凌紫 Ayamaraski	85.86 bc	50.66 f	0.59 h	80.92 cde	44.83 ef	0.55 gh
	济徐 23 Jixu 23	85.57 bc	66.39 abc	0.78 a	81.13 ab	54.02 c	0.67 b
	烟薯 25 Yanshu 25	86.56 ab	66.98 ab	0.77 a	73.56 f	44.98 e	0.61 de

(续表 4)

年份 Year	品种 Cultivar	栽后 60 d 60 DAP			栽后 100 d 100 DAP		
		对照	干旱	相对值	对照	干旱	相对值
		Control	Drought	RV	Control	Drought	RV
2013	济薯 26 Jishu 26	88.52 a	68.54 a	0.77 a	80.68 bc	53.40 c	0.66 bc
	济薯 18 Jishu 18	87.38 a	67.23 ab	0.77 a	82.69 a	51.21 d	0.62 cd
	济薯 22 Jishu 22	79.68 e	60.26 d	0.76 a	75.14 e	45.51 e	0.61 de
	济薯 21 Jishu 21	85.91 bc	65.17 bc	0.76 a	81.62 ab	58.54 a	0.72 a
	济薯 25 Jishu 25	87.19 a	64.50 c	0.74 a	83.02 a	56.50 b	0.68 ab
	济薯 15 Jishu 15	79.18 e	52.76 f	0.67 b	73.72 f	45.80 e	0.62 cd
	济紫薯 3 号 Jizishu 3	84.43 c	55.54 e	0.66 b	79.69 c	45.55 e	0.57 ef
	徐薯 18 Xushu 18	83.99 c	55.72 e	0.66 b	80.68 bc	49.57 d	0.61 de
	济紫薯 2 号 Jizishu 2	74.23 f	48.58 g	0.65 b	71.40 g	39.76 f	0.56 fg
	郑薯 20 Zhengshu 20	81.35 d	52.34 f	0.64 bc	77.18 d	44.45 e	0.58 def
	北京 553 Beijing 553	79.64 e	51.29 f	0.64 bc	72.33 fg	37.39 g	0.52 gh
	济紫薯 1 号 Jizishu 1	77.57 e	46.49 gh	0.60 cd	73.89 f	40.04 f	0.54 fg
	凌紫 Ayamaraski	81.57 d	45.60 h	0.56 d	74.92 ef	35.89 h	0.48 h

数据为 3 次重复的平均值。同列数据后不同小写字母表示同一年份处理间差异达到 0.05 显著水平。

RV: relative value; DAP: days after planting. Data are shown in mean of three replicates. Values followed by different lowercase letter within a column are significantly different at the 0.05 probability level among treatments in the same year.

2.2.3 功能叶相对电导率 由表 5 可知, 15 个甘薯品种的功能叶相对电导率变化趋势基本一致, 正常灌水条件下功能叶相对电导率各生育期变化不显著, 干旱胁迫处理的功能叶相对电导率从栽后 60 d 开始呈增加的趋势, 所有品种干旱胁迫处理的功能叶相对电导率栽后 100 d 均高于栽后 60 d。干旱胁迫导致功能叶相对电导率增加, 所有品种干旱胁迫处理的功能叶相对电导率均高于对照, 品种间增幅不同, 表现为抗旱性强的品种功能叶相对电导率增幅小, 抗旱性弱的品种增幅大, 说明抗旱性强的品

种在干旱胁迫条件下叶片受伤害程度小, 功能叶相对电导率增加幅度小。各生育期功能叶相对电导率增幅不同, 功能叶相对电导率相对值随着生育进程逐渐升高, 栽后 60 d 在 1.56~1.90 之间, 栽后 100 d 在 2.21~2.64 之间(表 3)。从不同品种类型功能叶相对电导率相对值来看, 淀粉型、鲜食型和色素型 3 种类型间相对电导率相对值无特异性差异, 相对电导率相对值高的品种中既有淀粉型品种, 又有鲜食型品种和色素型品种, 说明甘薯品种抗旱性差异与基因型显著相关, 但与品种类型无显著相关性。

表 5 干旱胁迫对甘薯功能叶相对电导率的影响

Table 5 Effects of drought stress on relative electrical conductivity of functional leaves in sweetpotato (%)

年份 Year	品种 Cultivar	栽后 60 d 60 DAP			栽后 100 d 100 DAP		
		对照	干旱	相对值	对照	干旱	相对值
		Control	Drought	RV	Control	Drought	RV
2012	济薯 21 Jishu 21	22.85 c	35.69 f	1.56 g	22.48 c	49.80 h	2.22 ij
	济薯 25 Jishu 25	23.76 abc	37.56 d	1.58 fg	22.91 bc	51.76 g	2.26 ghi
	济紫薯 2 号 Jizishu 2	22.89 cd	36.45 ef	1.59 fg	22.98 bc	50.89 g	2.21 j
	济薯 15 Jishu 15	24.67 a	39.78 c	1.61 fg	23.98 a	54.89 f	2.29 g
	济紫薯 3 号 Jizishu 3	22.46 de	36.78 de	1.64 efg	22.78 bc	50.79 g	2.23 hij
	烟薯 25 Yanshu 25	22.48 de	36.78 de	1.64 efg	22.15 c	50.41 h	2.28 g
	济徐 23 Jixu 23	21.78 ef	36.59 def	1.68 def	21.45 d	48.73 i	2.27 gh
	北京 553 Beijing 553	21.32 f	36.45 ef	1.71 cde	20.67 e	49.29 hi	2.38 f
	郑薯 20 Zhengshu 20	23.47 bc	41.12 c	1.75 bcd	23.08 abc	56.15 e	2.43 e
	济紫薯 1 号 Jizishu 1	24.23 ab	43.04 b	1.78 abc	23.33 abc	60.15 ab	2.58 b
	济薯 26 Jishu 26	24.31 ab	43.18 b	1.78 abc	23.99 a	58.87 cd	2.45 de
	徐薯 18 Xushu 18	23.89 ab	42.76 b	1.79 abc	23.57 ab	58.45 d	2.48 d
	凌紫 Ayamaraski	23.65 bc	43.46 b	1.84 ab	22.93 bc	60.57 a	2.64 a
	济薯 22 Jishu 22	23.31 bcd	42.87 b	1.84 ab	23.40 ac	58.31 d	2.49 cd
	济薯 18 Jishu 18	23.89 ab	44.54 a	1.86 a	23.50 ab	59.57 bc	2.53 c
	济薯 15 Jishu 15	26.12 a	41.23 c	1.58 f	25.43 a	56.34 e	2.22 c
	济薯 21 Jishu 21	21.35 e	34.34 f	1.61 f	21.33 e	48.45 h	2.27 c
	济紫薯 2 号 Jizishu 2	22.35 cd	35.91 e	1.61 f	22.44 d	50.35 fg	2.24 c
	烟薯 25 Yanshu 25	23.21 c	37.51 d	1.62 f	22.88 cd	51.14 f	2.24 c

(续表 5)

年份 Year	品种 Cultivar	栽后 60 d 60 DAP			栽后 100 d 100 DAP		
		对照	干旱	相对值	对照	干旱	相对值
		Control	Drought	RV	Control	Drought	RV
2013	济薯 25 Jishu 25	21.81 de	35.61 e	1.63 ef	20.96 ef	49.81 g	2.38 b
	济紫薯 3 号 Jizishu 3	21.68 de	36.00 de	1.66 def	22.00 de	50.01 g	2.27 c
	郑薯 20 Zhengshu 20	24.60 b	42.25 b	1.72 cde	24.21 b	57.28 de	2.37 b
	北京 553 Beijing 553	20.78 e	35.91 e	1.73 cd	20.13 fg	48.75 h	2.42 b
	济徐 23 Jixu 23	19.75 f	34.56 f	1.75 bcd	19.42 g	46.70 i	2.40 b
	徐薯 18 Xushu 18	25.12 b	43.99 a	1.75 bcd	24.80 ab	59.68 b	2.41 b
	济薯 26 Jishu 26	24.89 b	43.76 a	1.76 bc	24.57 ab	59.45 bc	2.42 b
	凌紫 Ayamaraski	24.54 b	44.35 a	1.81 abc	23.82 bc	61.46 a	2.58 a
	济紫薯 1 号 Jizishu 1	22.78 cd	41.69 bc	1.83 ab	22.31 de	58.80 bc	2.64 a
	济薯 22 Jishu 22	22.38 cd	41.94 bc	1.87 a	22.47 d	57.38 d	2.55 a
	济薯 18 Jishu 18	22.92 c	43.57 a	1.90 a	22.53 d	58.60 c	2.60 a

数据为 3 次重复的平均值。同列数据后不同小写字母表示同一年份处理间差异达到 0.05 显著水平。
RV: relative value; DAP: days after planting. Data are shown in mean of three replicates. Values followed by different lowercase letter within a column are significantly different at the 0.05 probability level among treatments in the same year.

2.3 功能叶生理性状与甘薯品种抗旱性的相关性

从表 6 可以看出,在正常灌水条件下,甘薯功能叶的叶绿素含量、相对含水量和相对电导率与品种抗旱系数的相关性未达显著水平。说明正常灌水条件下,甘薯功能叶的生理性状指标均不能用于评价品种抗旱性的强弱。干旱胁迫条件下,甘薯功能叶的叶绿素含量和相对含水量与品种抗旱系数呈显著的正相关,而功能叶相对电导率与品种抗旱系数呈显著的负相关。说明干旱胁迫条件下甘薯功能叶的叶绿素含量、相对含水量和相对电导率等生理性状可以反映品种抗旱性的强弱,可用于甘薯品种抗旱性鉴定和评价。

2.4 抗旱系数及各指标相对值聚类分析

采用最长距离法对抗旱系数及各指标相对值进行聚类分析,其中抗旱系数聚类分析(图 1),将 15 个品种分为 3 类,济薯 21、济薯 25、济徐 23、济薯 15、烟薯 25 为第 1 类,属于抗旱品种;徐薯 18、济薯 26、北京 553、济紫薯 2 号、济薯 18 为第 2 类,属于中等抗旱品种;郑薯 20、济薯 22、济紫薯 3 号、济紫薯 1 号、凌紫为第 3 类,属于不抗旱品种。功能叶叶绿素含量相对值聚类分析(图 2),将 15 个品种分为 3 类,济薯 21、济徐 23、济薯 25 为第 1 类,属于抗旱品种;烟薯 25、济薯 15、北京 553、济紫薯 1 号、济薯 18、济紫薯 3 号为第 2 类,属于中等抗旱品种;凌紫、济薯 26、济薯 22、郑薯 20、济紫薯 2 号、徐薯 18 为第 3 类,属于不抗旱品种。功能叶相对含水量相对值聚类分析(图 3),将 15 个品种分为 3 类,济徐 23、济薯 21、济薯 25 为第 1 类,属于抗旱品种;济薯 26、济薯 15、济薯 22、烟薯 25、济薯 18、郑薯 20、济紫薯 2 号为第 2 类,属于中等抗旱品种;徐薯 18、济紫薯 3 号、北京 553、济紫薯 1 号、凌紫为第 3 类,属于不抗旱品种。功能叶相对电导率相对值聚类分析(图 4),将 15 个品种分为 3 类,济薯 21、济薯 15、济紫薯 2 号、济紫薯 3 号、烟薯 25、济薯 25 为第 1 类,属于抗旱品种;济徐 23、北京 553、郑

薯 20、济薯 26、济紫薯 1 号为第 2 类,属于中等抗旱品种;凌紫、济薯 22、济薯 18 为第 3 类,属于不抗旱品种。通过聚类分析,功能叶叶绿素含量、相对含水量和相对电导率对 15 个甘薯品种的抗旱性分类与抗旱系数的基本吻合,因此,3 个生理性状指标均可作为甘薯品种抗旱性鉴定的评价指标。

3 讨论

3.1 甘薯品种抗旱性差异鉴定

作物抗旱适应性是受多基因控制的复杂性状,是多个抗旱性状的综合反映,抗旱性鉴定需要根据不同作物的生长发育规律,结合形态、生理生化、产量等指标的抗旱性进行综合评价^[4]。在抗旱性鉴定和抗旱指标筛选方面,前人已进行了大量研究,并提出了综合抗旱系数^[21]、隶属性函数值^[22]、聚类分析^[23]、主成分分析^[24]、灰色关联度^[25]和广义遗传力分析方法^[26]等抗旱性鉴定方法,以及产量性状、生长发育、形态学和生理生化等抗旱鉴定指标^[2-3]。但是,不同作物对干旱胁迫的响应机制不同,作物之间抗旱指标也存在差异^[2-3],国内外研究者从群体、个体、器官、细胞、亚细胞以及分子水平上针对作物的抗旱适应性进行了深入研究,提出了指标选择、评价方法以及抗旱性分级等抗旱性综合评价方法^[27-29],而根据产量表现来判定作物品种抗旱性是抗旱性鉴定的传统方法^[21],抗旱系数是抗旱性筛选的重要指标^[30-33]。在甘薯抗旱性鉴定方面,前人进行了大量研究,采用室内 PEG 模拟连续干旱法以及大田自然干旱法对部分甘薯品种进行了抗旱性鉴定和评价^[16,34-35],鉴定指标有农艺性状、生理生化和产量指标等,通过研究已筛选获得了产量和抗旱性双高的种质资源,并获得了根系持水力、薯苗质量和含水量、根系活力和渗透调节能力等抗旱性筛选的重要指标^[16,34]。甘薯品种抗旱性存在遗传性差异,为进一步明确不同类型甘薯品种抗旱性差异,本研究以 15 个不同类型甘薯品种为研

表 6 功能叶生理性状与抗旱系数的相关分析
Table 6 Correlation analysis of physiological characteristics of functional leaves and drought resistance coefficient

年份 Year	生育期 Growth stage	功能叶叶绿素含量 Chlorophyll content of functional leaves		功能叶相对含水量 Relative water content of functional leaves		功能叶相对电导率 Relative electrical conductivity of functional leaves	
		对照 Control	干旱 Drought	对照 Control	干旱 Drought	对照 Control	干旱 Drought
2012	40 DAP	0.45	0.61*	0.27	0.58*	-0.15	-0.52*
	60 DAP	0.42	0.61*	0.20	0.62*	-0.17	-0.55*
	80 DAP	0.41	0.58*	0.05	0.73**	-0.29	-0.63*
	100 DAP	0.15	0.62*	0.19	0.65**	-0.26	-0.59*
2013	40 DAP	0.30	0.52*	0.41	0.62*	-0.18	-0.47
	60 DAP	0.10	0.47	0.43	0.60*	-0.19	-0.51
	80 DAP	0.49	0.72**	0.37	0.63*	-0.25	-0.59*
	100 DAP	0.46	0.66**	0.31	0.64*	-0.24	-0.56*

DAP: 栽植后天数。*和**分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平显著。
DAP: days after planting. * and ** indicate significantly different at $P < 0.05$ and $P < 0.01$, respectively.

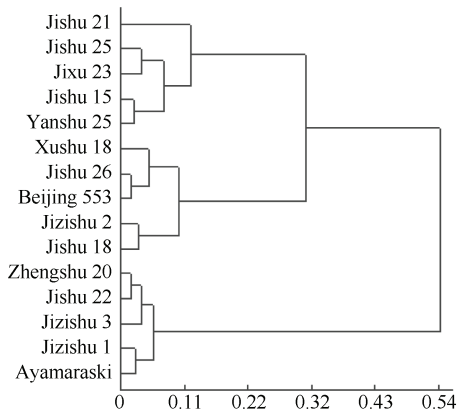


图 1 15 个甘薯品种抗旱系数聚类分析图
Fig. 1 Dendrogram of drought resistance coefficient in 15 sweetpotato cultivars

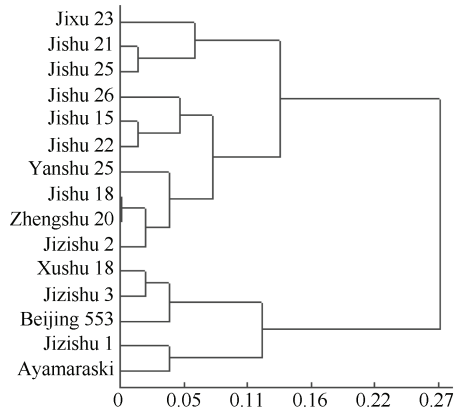


图 3 15 个甘薯品种功能叶相对含水量相对值聚类分析图
Fig. 3 Dendrogram of relative value of relative water content of functional leaves in 15 sweetpotato cultivars

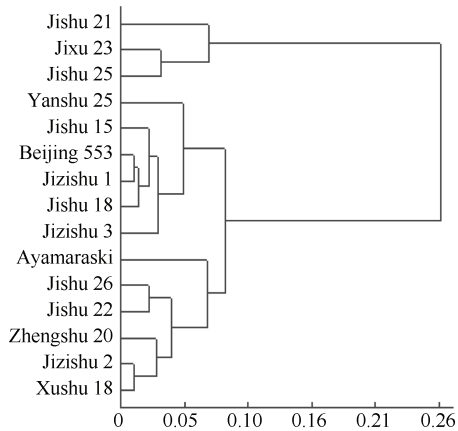


图 2 15 个甘薯品种功能叶叶绿素含量相对值聚类分析图
Fig. 2 Dendrogram of relative value of chlorophyll content of functional leaves in 15 sweetpotato cultivars

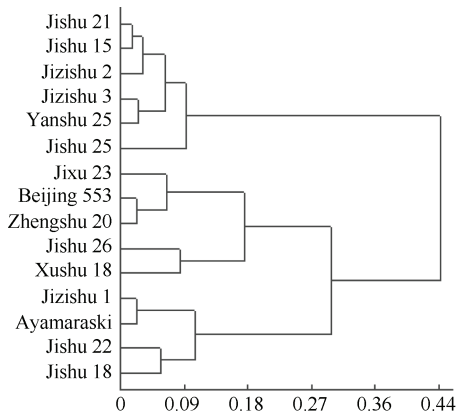


图 4 15 个甘薯品种功能叶相对电导率相对值聚类分析图
Fig. 4 Dendrogram of relative value of relative electrical conductivity of functional leaves in 15 sweetpotato cultivars

研究对象,在人工控水条件下,通过连续 2 年全生育期干旱胁迫鉴定试验,对 3 种类型甘薯品种进行了抗旱性综合评价,2 年试验结果趋势基本一致,抗旱性差异与基因型显著相关,但与品种类型无显著相关性。按照抗旱系数聚类分析结果,将 15 个甘薯品种分为 3 个抗旱类型,抗旱品种为济薯 21、济薯 25、济徐 23、济薯 15、烟薯 25;中等抗旱品种为徐薯 18、济薯 26、北京 553、济紫薯 2 号、济薯 18;不抗旱品种为郑薯 20、济紫薯 3 号、济薯 22 号、济紫薯 1 号、凌紫。前人在甘薯品种抗旱性筛选研究中采用的室内 PEG 模拟连续干旱法只能对甘薯苗期进行干旱胁迫分析^[10,34],而大田自然干旱法受降雨量的影响,只能对部分生育期进行分析^[15-16],本研究通过全生育期人工控水,系统分析了不同甘薯品种对干旱胁迫的响应,所得的结果能较好地反映出品种抗旱性的差异,不但为甘薯生产中提供了抗旱性好的品种,而且为甘薯全生育期水分管理提供了理论依据和技术参考。

3.2 甘薯品种叶片生理特性与抗旱性的关系

干旱胁迫对不同作物甚至不同基因型造成的影响差异很大,同一作物或者同一基因型通常存在几种机制共同决定其抗旱性^[36],因此研究作物的抗旱机制对鉴定品种抗旱性具有重要意义。干旱胁迫条件下,作物在生理代谢方面产生一系列的适应性反应^[38],甘薯虽然耐旱,但也存在水分敏感期,不同生育时期表现的敏感程度有差异^[1,37],苗期干旱胁迫影响发根缓苗,中期干旱胁迫限制茎叶生长和干物质积累,后期干旱胁迫则限制块根膨大^[7]。干旱胁迫条件下,甘薯叶片会产生一系列变化抵御干旱胁迫^[39],叶片厚度^[6]和叶片相对含水量^[40]均下降,水分胁迫程度越重,叶片相对含水量下降幅度越大,植株保水能力越差,细胞伸长生长受抑制,从而抑制了植物的生长发育^[41]。基因型不同,叶片结构和表面蜡质层厚度不同,叶片相对含水量下降幅度也不同,不抗旱品种下降幅度大于抗旱品种^[40]。干旱胁迫降低了甘薯总叶数^[42],单株叶面积和叶绿素含量降低,单株光合生产能力下降^[43],从而导致生物量下降^[11],干旱胁迫时间越早,下降的幅度越大,前期干旱胁迫生物量降低 50%,后期干旱胁迫生物量降低 10%^[7]。前人研究认为,农艺性状和生理指标均可用于抗旱性鉴定,但是仅用单一指标或某一生育期的指标,均不能综合评价品种的抗旱性。在农艺性状方面,淀粉型、鲜食型和色素型甘薯品种在抗旱指标方面无特异性差别,均表现出抗旱性强的甘薯品种农艺性状相对值高,3 种类型甘薯品种的农艺性状与产量抗旱系数呈显著正相关,叶片数、蔓长、相对茎叶重、比叶面积和叶面积系数等与品种抗旱性呈显著的正相关,反映了甘薯品种抗旱性的差异,均可作为甘薯品种抗旱性评价的指标^[5,13]。为获得更多更精确的抗旱性鉴定指标,提高抗旱性鉴定的准确性,本研究在全生育期连续干旱胁迫条件下,对 15 个不同类型甘薯品种的叶片生理性状进行了分析,认为抗旱性越强的甘薯品种在干旱胁迫条件下叶面积系数

下降幅度越小,叶片受伤害程度越小,功能叶叶绿素含量和相对含水量下降的幅度越小,功能叶相对电导率升高的幅度越小,这与前人的研究结果一致^[40-43]。较高的叶面积系数、叶绿素含量和叶片相对含水量,有利于抗旱品种在干旱胁迫条件下维持较高的甘薯地上部生物量,可使茎叶生长在干旱复水后尽快恢复,降低减产幅度。干旱胁迫条件下的叶面积系数、功能叶叶绿素含量、相对含水量和叶片相对电导率等指标均与抗旱系数呈显著的相关关系,通过 3 个生理指标聚类分析对 15 个甘薯品种进行的抗旱性分类与抗旱系数聚类分析结果也基本吻合,因此,叶面积系数以及功能叶叶绿素含量、相对含水量和相对电导率等指标可作为甘薯品种抗旱性鉴定的评价指标。

References

- [1] 张海燕,段文学,解备涛,董顺旭,汪宝卿,史春余,张立明. 不同时期干旱胁迫对甘薯内源激素的影响及其与块根产量的关系. 作物学报, 2018, 44: 126-136.
Zhang H Y, Duan W X, Xie B T, Dong S X, Wang B Q, Shi C Y, Zhang L M. Effects of drought stress at different growth stages on endogenous hormones and its relationship with storage root yield in sweetpotato. *Acta Agron Sin*, 2018, 44: 126-136 (in Chinese with English abstract).
- [2] 黎裕. 作物抗旱鉴定方法与指标. 干旱地区农业研究, 1993, 11(1): 91-99.
Li Y. The identification method and index for crop drought resistance. *Agric Res Arid Area*, 1993, 11(1): 91-99 (in Chinese with English abstract).
- [3] Paleg L G, Aspinall D. The physiology and biochemistry of drought resistance in plants. *Crop Prot*, 1981, 2: 380-381.
- [4] 张木清,陈如凯. 作物抗旱分子生理与遗传改良. 北京: 科学出版社, 2005. pp 22-23.
Zhang M Q, Chen R K. Drought Resistant Molecular Physiology and Genetic Improvement of Crops. Beijing: Science Press, 2005. pp 22-23 (in Chinese).
- [5] 张海燕,解备涛,汪宝卿,董顺旭,段文学,张立明. 不同甘薯品种抗旱性评价及耐旱指标筛选. 作物学报, 2019, 45: 419-430.
Zhang H Y, Xie B T, Wang B Q, Dong S X, Duan W X, Zhang L M. Evaluation of drought tolerance and screening for drought-tolerant indicators in sweetpotato cultivars. *Acta Agron Sin*, 2019, 45: 419-430 (in Chinese with English abstract).
- [6] 李欢,陈雷,王晨静,赵习武,陆国权. 4 个观赏甘薯品种的抗旱性比较. 浙江农业学报, 2015, 27: 1945-1952.
Li H, Chen L, Wang C J, Zhao X W, Lu G Q. Evaluation of the drought tolerance of four ornamental sweetpotato cultivars. *Acta Agric Zhejiang*, 2015, 27: 1945-1952 (in Chinese with English abstract).
- [7] 李长志,李欢,刘庆,史衍玺. 不同生长时期干旱胁迫甘薯根系生长及荧光生理的特性比较. 植物营养与肥料学报, 2016, 22: 511-517.
Li C Z, Li H, Liu Q, Shi Y X. Comparison of root development and fluorescent physiological characteristics of sweet

- potato exposure to drought stress in different growth stages. *J Plant Nutr Fert*, 2016, 22: 511–517 (in Chinese with English abstract).
- [8] 张海燕, 解备涛, 汪宝卿, 董顺旭, 段文学, 张立明. 不同时期干旱胁迫对甘薯生长和抗氧化能力的影响. *中国农业科学*, 2020, 53: 1126–1139.
- Zhang H Y, Xie B T, Wang B Q, Dong S X, Duan W X, Zhang L M. Effects of drought treatments at different growth stages on growth and the activity of antioxidant enzymes in sweetpotato. *Sci Agric Sin*, 2020, 53: 1126–1139 (in Chinese with English abstract).
- [9] 储凤丽, 刘亚军, 王文静, 胡启国, 杨爱梅. 干旱胁迫对甘薯活性氧代谢、渗透调节物质、SPAD 及叶绿素荧光特性的影响. *中国农学通报*, 2019, 35(26): 29–34.
- Chu F L, Liu Y J, Wang W J, Hu Q G, Yang A M. Effects of drought stress on active oxygen metabolism, osmotic regulators, SPAD and chlorophyll fluorescence characteristics of sweet potato. *Chin Agric Sci Bull*, 2019, 35(26): 29–34 (in Chinese with English abstract).
- [10] 曹清河, 李雪花, 戴习彬, 唐君, 周志林, 赵冬兰, 张安. PEG-6000 模拟干旱胁迫对甘薯近缘野生种 *Ipomoea trifida* (Kunth) G. Don 幼苗生理生化指标的影响. *西南农业学报*, 2016, 29: 2536–2541.
- Cao Q H, Li X H, Dai X B, Tang J, Zhou Z L, Zhao D L, Zhang A. Effects of drought simulated by PEG-6000 on seedling physiological and biochemical indexes of wild sweetpotato relative *Ipomoea trifida* (Kunth) G. Don. *Southwest Chin J Agric Sci*, 2016, 29: 2536–2541 (in Chinese with English abstract).
- [11] 张海燕, 解备涛, 段文学, 董顺旭, 汪宝卿, 张立明, 史春余. 不同时期干旱胁迫对甘薯光合效率和耗水特性的影响. *应用生态学报*, 2018, 29: 1943–1950.
- Zhang H Y, Xie B T, Duan W X, Dong S X, Wang B Q, Zhang L M, Shi C Y. Effects of drought stress at different growth stages on photosynthetic efficiency and water consumption characteristics in sweet potato. *Chin J Appl Ecol*, 2018, 29: 1943–1950 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张明生, 刘志, 戚金亮, 张丽霞, 杨永华. 甘薯品种抗旱适应性综合评价的方法研究. *热带亚热带植物学报*, 2005, 13: 469–474.
- Zhang M S, Liu Z, Qi J L, Zhang L X, Yang Y H. Methods of comprehensive evaluation for drought resistance in sweet potato cultivars. *J Trop Subtrop Bot*, 2005, 13: 469–474 (in Chinese with English abstract).
- [13] 张明生, 谢波, 戚金亮, 谈锋, 张启堂, 杨永华. 甘薯植株形态、生长势和产量与品种抗旱性的关系. *热带作物学报*, 2006, 27: 39–43.
- Zhang M S, Xie B, Qi J L, Tan F, Zhang Q T, Yang Y H. Relationship of drought resistance of sweet potato with its plant type, growth vigour and yield under water stress. *Chin J Trop Crops*, 2006, 27: 39–43 (in Chinese with English abstract).
- [14] 张明生, 张丽霞, 戚金亮, 谈锋, 杨春贤. 甘薯品种抗旱适应性的主成分分析. *贵州农业科学*, 2006, 34(1): 11–14.
- Zhang M S, Zhang L X, Qi J L, Tan F, Yang C X. Principal component analysis on drought resistant adaptability of sweet potato cultivars. *Guizhou Agric Sci*, 2006, 34(1): 11–14 (in Chinese with English abstract).
- [15] 刘恩良, 曹清河, 唐君, 金平. 甘薯抗旱鉴定及生理响应研究. *新疆农业科学*, 2016, 53: 999–1005.
- Liu E L, Cao Q H, Tang J, Jin P. Studies on drought resistance identification and physiological response of sweet potato. *Xinjiang Agric Sci*, 2016, 53: 999–1005 (in Chinese with English abstract).
- [16] 周志林, 唐君, 金平, 刘恩良, 曹清河, 赵冬兰, 张安. 甘薯抗旱鉴定及旱胁迫对甘薯叶片生理特性的影响. *西南农业学报*, 2016, 29: 1052–1056.
- Zhou Z L, Tang J, Jin P, Liu E L, Cao Q H, Zhao D L, Zhang A. Identification of drought resistance and effect of soil drought on physiological characteristics of sweetpotato. *Southwest Chin J Agric Sci*, 2016, 29: 1052–1056 (in Chinese with English abstract).
- [17] 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. *中国农业科学*, 2001, 34: 260–265.
- Zhang M S, Tan F, Zhang Q T. Physiology indices for rapid identification of sweet potato drought resistance and selection of methods. *Sci Agric Sin*, 2001, 34: 260–265 (in Chinese with English abstract).
- [18] 王留梅, 毛守民, 潘明华, 周利霞. 甘薯叶面积系数田间速测方法初探. *中国农学通报*, 2001, 17(6): 82–90.
- Wang L M, Mao S M, Pan M H, Zhou L X. Field measurement method of leaf area index of sweet potato. *Chin Agric Sci Bull*, 2001, 17(6): 82–90 (in Chinese with English abstract).
- [19] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导(第2版). 广州: 华南理工大学出版社, 2006. pp 64–66.
- Chen J X, Wang X F. Guidance of Plant Physiological Experiment, 2nd edn. Guangzhou: South China University of Technology Publishers, 2006. pp 64–66 (in Chinese).
- [20] 梁鹏, 邢兴华, 周琴, 韩亮亮, 田一丹, 张国正, 邢邯, 江海东. α -萘乙酸对干旱和复水处理下大豆幼苗生长和光合作用的影响. *大豆科学*, 2011, 30: 50–55.
- Liang P, Xing X H, Zhou Q, Han L L, Tian Y D, Zhang G Z, Xing H, Jiang H D. Effect of NAA on growth and photosynthetic characteristic of soybean seedling under drought and re-watering. *Soybean Sci*, 2011, 30: 50–55 (in Chinese with English abstract).
- [21] 刘天鹏, 董孔军, 何继红, 任瑞玉, 张磊, 杨天育. 糜子育成品种芽期抗旱性鉴定与评价研究. *植物遗传资源学报*, 2014, 15: 746–752.
- Liu T P, Dong K J, He J H, Ren R H, Zhang L, Yang T Y. Identification and evaluation on the drought resistance of broomcorn millet bred cultivars at germinating stage. *J Plant Genet Resour*, 2014, 15: 746–752 (in Chinese with English abstract).
- [22] 王贺正, 李艳, 马均, 张荣萍, 李旭毅, 汪仁全. 水稻苗期抗旱性指标的筛选. *作物学报*, 2007, 33: 1523–1529.
- Wang H Z, Li L, Ma J, Zhang R P, Li X Y, Wang R Q. Screening indexes of drought resistance during seedling stage in rice. *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 1523–1529 (in Chinese with English abstract).
- [23] 刘光辉, 陈全家, 吴鹏昊, 曲延英, 高文伟, 杨军善, 杜荣光. 棉花花铃期抗旱性综合评价及指标筛选. *植物遗传资源学报*, 2016, 17: 53–62.
- Liu G H, Chen Q J, Wu P H, Qu Y Y, Gao W W, Yang J S, Du R G. Screening and comprehensive evaluation of drought resistance

- indices of cotton at blossing and boll-forming stages. *J Plant Genet Resour*, 2016, 17: 53–62 (in Chinese with English abstract).
- [24] 冯方剑, 宋敏, 陈全家, 姚正培, 李杨阳, 刘艳, 王兴安, 曲延英. 棉花苗期抗旱相关指标的主成分分析及综合评价. *新疆农业大学学报*, 2011, 34: 211–217.
Feng F J, Song M, Chen Q J, Yao Z P, Li Y Y, Liu Y, Wang X A, Qu Y Y. Analysis and comprehensive evaluation on principal component of relative indices of drought resistance at the seedling stage of cotton. *J Xinjiang Agric Univ*, 2011, 34: 211–217 (in Chinese with English abstract).
- [25] 罗俊杰, 欧巧明, 叶春雷, 王方, 王镛臻, 陈玉梁. 重要胡麻栽培品种的抗旱性综合评价及指标筛选. *作物学报*, 2014, 40: 1259–1273.
Luo J J, Ou Q M, Ye C L, Wang F, Wang Y Z, Chen Y L. Comprehensive valuation of drought resistance and screening of indices of important flax cultivars. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 1259–1273 (in Chinese with English abstract).
- [26] 史加亮, 李凤瑞, 张东楼, 王士立, 田春利, 杨秀凤. 抗虫棉品种(系)主要农艺性状配合力与遗传力分析. *山东农业科学*, 2014, 46(1): 23–26.
Shi J L, Li F R, Zhang D L, Wang S L, Tian C L, Yang X F. Analysis on combining ability and heritability of main agronomic characters of insect resistant cotton varieties (lines). *Shandong Agric Sci*, 2014, 46(1): 23–26 (in Chinese with English abstract).
- [27] Ruiz M C, Domingo R, Torrecillas A, Pérezpastor A. Water stress preconditioning to improve drought resistance in young apricot plants. *Plant Sci*, 2000, 156: 245–251.
- [28] Subbarao G V, Chauhan Y S, Johansen C. Patterns of osmotic adjustment in pigeonpea: its importance as a mechanism of drought resistance. *Eur J Agron*, 2000, 12: 239–249.
- [29] Wang H Y, Huang Y C, Chen S F, Yeh K W. Molecular cloning, characterization and gene expression of a water deficiency and chilling induced proteinase inhibitor I gene family from sweet potato leaves. *Plant Sci*, 2003, 165: 191–203.
- [30] Mardeh A S S, Ahmadi A, Poustini K, Mohammadi V. Evaluation of drought resistance indices under various environmental conditions. *Field Crops Res*, 2006, 98: 222–229.
- [31] 徐蕊, 王启柏, 张春庆, 吴承来. 玉米自交系抗旱性评价指标体系的建立. *中国农业科学*, 2009, 42: 72–84.
Xu R, Wang Q B, Zhang C Q, Wu C L. Drought-resistance evaluation system of maize inbred. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 72–84 (in Chinese with English abstract).
- [32] 胡标林, 余守武, 万勇, 张铮, 邱兵余, 谢建坤. 东乡普通野生稻全生育期抗旱性鉴定. *作物学报*, 2007, 33: 425–432.
Hu B L, Yu S W, Wan Y, Zhang Z, Qiu B Y, Xie J K. Drought resistance identification of Dongxiang common wild rice (*Oryza rufipogon*) in whole growth period. *Acta Agron Sin*, 2007, 33: 425–432 (in Chinese with English abstract).
- [33] 厉广辉, 张昆, 刘凤珍, 刘丹丹, 万勇善. 不同抗旱性花生品种结荚期叶片生理特性. *应用生态学报*, 2014, 25: 1988–1996.
Li G H, Zhang K, Liu F Z, Liu D D, Wan Y S. Leaf physiological traits at pod-setting stage in peanut cultivars with different drought resistance. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25: 1988–1996 (in Chinese with English abstract).
- [34] 袁振, 汪宝卿, 姜瑶, 解备涛, 董顺旭, 张海燕, 段文学, 王庆美, 张立明. 甘薯耐旱性品种苗期筛选及耐旱性指标研究. *山东农业科学*, 2015, 47(3): 22–26.
Yuan Z, Wang B Q, Jiang Y, Xie B T, Dong S X, Zhang H Y, Duan W X, Wang Q M, Zhang L M. Seedling screening of drought resistance varieties of sweetpotato and drought resistance index research. *Shandong Agric Sci*, 2015, 47(3): 22–26 (in Chinese with English abstract).
- [35] 丁成伟, 钮福祥, 郭小丁, 华希新. 甘薯品种资源抗旱性鉴定研究. *河南农业科学*, 1997, 26(10): 3–5.
Ding C W, Niu F X, Guo X D, Hua X X. Identification on the drought resistance in sweet potato genetic resource. *Henan Agric Sci*, 1997, 26(10): 3–5 (in Chinese with English abstract).
- [36] Fukai S, Pantuwan G, Jongdee B, Cooper M. Screening for drought resistance in rainfed lowland rice. *Field Crops Res*, 1999, 64: 61–74.
- [37] Lewthwaite S L, Triggs C M. Sweetpotato cultivar response to prolonged drought. *Agron New Zeal*, 2012, 42: 1–10.
- [38] 杨阳, 申双和, 马绎皓, 王润元, 赵鸿. 干旱对作物生长的影响机制及抗旱技术的研究进展. *科技通报*, 2020, 36(1): 8–15.
Yang Y, Shen S H, Ma Y H, Wang R Y, Zhao H. Advances in the effects of drought on crop growth and research on drought resistance techniques. *Bull Sci Technol*, 2020, 36(1): 8–15 (in Chinese with English abstract).
- [39] Sokoto M B, Sadiq K A. Productivity of sweet potato (*Ipomoea batatas* L.) as influenced by water stress and variety in Sokoto Sudan Savannah, Nigeria. *Int J Plant Soil Sci*, 2016, 12: 1–9.
- [40] 吴巧玉, 何天久, 夏锦慧. 干旱胁迫对甘薯生理特性的影响. *贵州农业科学*, 2013, 41(6): 52–54.
Wu Q Y, He T J, Xia J H. Effects of drought stress on physiological characteristics of sweetpotato. *Guizhou Agric Sci*, 2013, 41(6): 52–54 (in Chinese with English abstract).
- [41] 霍红, 张勇, 陈年来, 李彩霞, 高海宁. 干旱胁迫下五种荒漠灌木苗期的生理响应和抗旱评价. *干旱区资源与环境*, 2010, 25(1): 185–189.
Huo H, Zhang Y, Chen N L, Li C X, Gao H N. Physiological response and evaluation of drought resistance about five desert shrubs under drought stress. *J Arid Land Resour Environ*, 2010, 25(1): 185–189 (in Chinese with English abstract).
- [42] 许育彬, 程雯蔚, 陈越, 华千勇. 不同施肥条件下干旱对甘薯生长发育和光合作用的影响. *西北农业学报*, 2007, 16(2): 59–64.
Xu Y B, Cheng W W, Chen Y, Hua Q Y. Effect of drought on growth and development and photosynthesis of sweet potato under different fertilization conditions. *Acta Agric Boreali-Occident Sin*, 2007, 16(2): 59–64 (in Chinese with English abstract).
- [43] 孙哲, 史春余, 刘桂玲, 高俊杰, 柳洪鹏, 郑建利, 张鹏. 干旱胁迫与正常供水钾肥影响甘薯光合特性及块根产量的差异. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22: 1071–1078.
Sun Z, Shi C Y, Liu G L, Gao J J, Liu H J, Zheng J L, Zhang P. Effect difference of potassium fertilizer on leaf photosynthetic characteristics and storage root yield of sweet potato under drought stress and normal water condition. *J Plant Nutr Fert*, 2016, 22: 1071–1078 (in Chinese with English abstract).