甘薯对干旱胁迫响应的生理诊断研究

李思平[1], 杨硕[1], 李欢[1,*], 刘庆[1], 辛国胜[2]
[1]青岛农业大学资源与环境学院, 青岛266109
[2]烟台市农业科学研究院, 山东烟台265500

摘要: 甘薯(*Ipomoea batatas*)生长过程中常受季节性干旱的胁迫。本试验采用砂培试验法, 在甘薯定植70 d后添加不同浓度的聚乙二醇(PEG-6000)营养液, 模拟轻度、中度和重度干旱胁迫。通过连续3 d的动态生理生化指标监测, 探索生长中期基于甘薯地上部生理指标的干旱诊断。结果表明: 干旱胁迫24~72 h过程中, 胁迫48 h后甘薯地上部的生理指标对干旱的响应程度更为明显。对干旱胁迫48 h的生理指标与PEG浓度水势进行相关性分析得出, 叶片相对含水量、丙二醛(MDA)含量、F_v/F_m和净光合速率(P_n)均与不同程度干旱胁迫存在显著相关关系, 其中'烟薯25'相关系数分别为0.93、0.98、−0.98、0.96。甘薯生理指标与地上部鲜重的逐步回归分析与通径分析表明, 叶片相对含水量和F_v/F_m是影响甘薯地上部生物量的关键指标(R_1=0.987、R_2= 0.998), 其中'商薯19'的直接作用系数分别为2.30、1.52。综上所述, 通过对干旱胁迫后甘薯关键生理指标的诊断, 可为指导甘薯季节性干旱的旱后灌溉提供理论依据。

关键词: 甘薯; 干旱胁迫; 叶绿素荧光参数; 干旱诊断

我国是世界上最大的甘薯(*Ipomoea batatas*)生产国, 甘薯作为重要的粮食作物和工业原料, 对我国粮食安全和能源安全起着至关重要的作用(吴银亮等2017)。甘薯对生长环境的适应性较强, 但其生产力仍受到各种非生物胁迫的限制(陈传信等2019)。在农业生产中, 土壤水分亏缺是严重的非生物胁迫之一(Van Heerden等2008)。甘薯在世界大部分地区都作为一种雨养作物被广泛种植, 但其生长季节中经常受到降雨量不均的影响(Gajanayake等2016)。我国北方甘薯种植区多为干旱半干旱地区, 在甘薯生长中期, 由于季节性干旱导致的土壤水分亏缺严重影响了甘薯生长和薯块膨大, 限制了产量的形成(李长志等2016)。干旱导致的减产已成为我国甘薯生产中亟待解决的重要问题。充足的土壤水分对于保持甘薯叶片舒展、促进薯块膨大以及加快同化物生成与运输具有重要意义(孙哲等2016; 王庆美等2005)。甘薯生长季节中雨量较少时, 通过及时灌溉保证充足的土壤水分对维持作物生长发育至关重要。

水是维持植物正常生理活动和膜转运过程必不可少的物质条件(李强等2010; 王星等2017), 土壤水分亏缺导致作物生长受阻、产量下降, 其主要原因是植物生理功能发生改变(Chartzoulakis等1993)。诊断作物受旱的指标可分为土壤指标、气象指标和植物指标(康绍忠等1996), 因为土壤类型和土层结构的复杂多样, 气象的变化多端均会给胁迫诊断带来极大的障碍, 所以从植物本身生理特性入手成为胁迫诊断的重要方法(安东升2011)。干旱影响了植物的光合、呼吸、转运、离子吸收、养分代谢等一系列生理生化作用, 并且水分胁迫对植物各种生理指标的影响常随干旱严重程度和持续时间而变化(李仪曼等2019; Agüera等1997)。因此, 利用生理指标的变化诊断植物是否受到干旱胁迫具有重要意义。

前人曾采用气孔计测定气孔传导力以及用红外测温仪测定叶片温度等方法来诊断作物干旱, 但其他环境因子会影响测定的准确性(王宏等1989)。因此, 针对甘薯中期干旱胁迫的快速准确的诊断指标的确定有待于进一步研究。本研究选用长蔓鲜食型品种'烟薯25'和中长蔓淀粉型品种'商薯19'作为研究对象, 采用砂培法进行盆栽试验, 于生长中期通过浇灌不同浓度的聚乙二醇(PEG-6000)模拟正常水分及轻度、中度和重度干旱胁

收稿 2019-09-16 **修定** 2019-11-18
资助 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-10-B10)。
* 通讯作者(lihuancomcomcom@163.com)。

迫, 找出不同程度干旱胁迫与植物生理指标的内在关系, 实现甘薯生长中期基于生理响应的干旱诊断研究, 为指导甘薯生产的旱后灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验选用粒径2~3 mm石英砂, 盐酸浸泡2 d后用蒸馏水清洗3次, 加入少量珍珠岩混合均匀装入塑料桶(直径35 cm, 高30 cm)进行砂培试验。供试甘薯[*Ipomoea batatas* (L.) Lam]品种为长蔓鲜食型‘烟薯25’和中长蔓淀粉型‘商薯19’, 选取长势相同的甘薯幼苗, 每盆定植1株。试验于2019年5月10日在青岛农业大学日光温室进行, 各处理定期均以Hoagland 营养液浇灌, 统一水分管理。于薯苗移栽后第70天进行干旱处理, 设4个水分梯度(Michel等1973): 正常: Hoagland营养液; 轻度干旱: 5% PEG的Hoagland营养液(Ψ=−0.50 MPa); 中度干旱: 10% PEG的Hoagland营养液(Ψ=−1.48 MPa); 重度干旱: 15% PEG的Hoagland营养液(Ψ=−2.95 MPa)。4次重复, 完全随机排列。分别于干旱胁迫后24、48、72 h取样, 测定生理指标后收获, 测定生物量。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 甘薯叶片含水量的测定

剪取甘薯叶片用分析天平称取鲜重。将叶片浸入水中, 6小时后取出, 用吸水纸吸干表面水分称重, 重复操作, 直到两次称重的结果相等, 最后的结果即为饱和鲜重。而后将叶片装入纸袋中, 烘箱100~105°C杀青10 min, 而后70~80°C烘干至恒重, 取出称取干重。含水量计算公式为: 叶片含水率(%)=(鲜重−干重)/(鲜重)×100; 叶片相对含水率(%)=(鲜重−干重)/(饱和鲜重−干重)×100。

1.2.2 甘薯叶片叶绿素的测定

SPAD值采用SPAD-502叶绿素测定仪直接测定。

1.2.3 甘薯叶片细胞膜透性的测定

甘薯叶片细胞膜透性用相对电导率表示, 将叶片置于烧杯中, 加入20 mL去离子水, 室温下静置2 h, 用DDS-307 A电导仪测定电导率。再将其置于沸水浴10 min后取出, 测定电导率。相对电导率(%)计算公式为: (处理电导率−去离子水电导率)/(处理煮沸后电导率−去离子水煮沸后电导率)×100。

1.2.4 甘薯叶片丙二醛(MDA)含量、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的测定

MDA含量采用TBA法试剂盒测定; POD和CAT活性均采用紫外分光比色法试剂盒测定。测定所用试剂盒均购于南京建成生物工程研究所。

1.2.5 甘薯叶片光合参数与叶绿素荧光参数的的测定

选取甘薯第4片功能叶, 采用汉莎公司生产的CIRAD-3便携式光合仪, 于上午9:00~11:00测定净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间CO_2浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)与水分利用效率(WUE)。采用由汉莎公司生产的M-PEA叶绿素荧光仪, 暗适应20 min后进行测定叶绿素荧光参数及荧光动力学曲线(O-J-I-P曲线)。

1.3 统计分析

采用SPSS 20.0和Microsoft Office Excel工作表对各指标数据进行统计分析, 并绘制图表。方差分析比较处理间的效应差异, LSR法比较平均数之间的差异显著性。并进行相关性分析和逐步回归分析。

2 实验结果

2.1 不同干旱胁迫对甘薯地上部生物量的影响

由表1可知, 随PEG处理浓度的升高, 干旱胁迫程度加深, 两种甘薯的地上部鲜重有逐渐降低的趋势。其中‘烟薯25’在在重旱胁迫下鲜重较正常处理下降了18.2%, 而‘商薯19’鲜重下降了58.0%, 说明同一干旱水平下, ‘商薯19’的鲜重下降程度较‘烟薯25’高。

2.2 不同干旱胁迫对甘薯叶片含水量和叶绿素SPAD值的影响

由表2可以看出, 随着PEG浓度升高, 甘薯叶片的含水量不断降低。其中重度胁迫24 h的‘烟薯25’和‘商薯19’的含水量分别比正常处理降低了5.0%和7.6%。随着胁迫时间的增长, 重度胁迫72 h的‘商薯19’含水量比胁迫24 h降低了9.7%。说明干旱程度越高、胁迫时间越长, 对甘薯叶片含水量的影响越严重。另外, 干旱胁迫对‘烟薯25’叶片含水量的影响较低, 而对‘商薯19’影响较高。

表1 不同干旱胁迫对甘薯地上部生物量的影响

Table 1 Effect of different drought stress on shoot biomass of sweet potato

PEG处理浓度/%	‘烟薯25’		‘商薯19’	
	鲜重/g·株$^{-1}$	干重/g·株$^{-1}$	鲜重/g·株$^{-1}$	干重/g·株$^{-1}$
0	167.6±5.3^{a}	19.5±1.6^{ab}	144.2±3.1^{a}	11.8±1.2^{a}
5	148.4±4.2^{b}	21.2±1.9^{a}	98.8±6.9^{b}	10.8±0.8^{a}
10	144.3±6.6^{bc}	19.8±1.3^{ab}	77.9±4.0^{c}	12.6±1.2^{a}
15	137.1±2.7^{c}	17.8±1.0^{b}	60.6±7.6^{d}	10.1±1.7^{a}

表中小写字母表示同种甘薯品种同一指标在$P<0.05$水平差异显著。

表2 不同干旱胁迫对甘薯叶片含水量的影响

Table 2 Effect of different drought stress on water content of sweet potato leaves

时间/h	PEG处理浓度/%	‘烟薯25’		‘商薯19’	
		含水量/%	相对含水量/%	含水量/%	相对含水量/%
24	0	85.4±1.3^{a}	83.1±5.1^{a}	86.0±2.7^{a}	87.2±3.2^{a}
	5	84.6±1.2^{ab}	77.7±4.7^{a}	83.9±2.5^{ab}	73.5±4.1^{b}
	10	82.3±1.4^{b}	65.9±4.3^{b}	83.7±1.8^{ab}	72.9±2.8^{b}
	15	81.1±0.8^{b}	60.9±2.8^{c}	79.5±2.8^{b}	54.9±6.7^{c}
48	0	85.4±2.1^{a}	82.7±5.3^{a}	86.0±1.1^{a}	87.2±2.5^{a}
	5	83.6±0.4^{a}	71.9±2.8^{b}	83.1±0.7^{b}	69.4±3.4^{b}
	10	81.6±1.3^{b}	62.6±2.4^{c}	83.6±1.0^{b}	61.9±1.7^{c}
	15	80.3±0.7^{b}	57.6±3.7^{c}	78.0±2.7^{c}	50.2±4.2^{d}
72	0	85.3±0.5^{a}	82.3±4.7^{a}	86.0±2.2^{a}	87.2±4.6^{a}
	5	82.0±0.7^{b}	64.6±3.3^{b}	83.3±1.7^{ab}	70.8±5.4^{b}
	10	80.2±0.3^{c}	57.3±2.6^{c}	83.1±0.5^{b}	69.3±2.2^{b}
	15	79.6±1.4^{c}	55.2±1.1^{c}	71.8±5.1^{c}	36.0±3.8^{c}

表中小写字母表示相同时期同一甘薯品种同一指标在$P<0.05$差异显著, 表3和4同。

随着干旱程度越高、胁迫时间越长, 甘薯叶片相对含水量下降幅度越大, 而且比含水量变化更明显。其中‘烟薯25’与‘商薯19’重度干旱24 h的相对含水量分别比正常处理下降了7.6%和37.1%, 而胁迫72 h后分别比正常处理下降了16.6%和41.3%。

由表3可以看出, 适度干旱可以促进甘薯叶片叶绿素SPAD的提高, 但干旱程度过高或胁迫时间过长, 都会导致SPAD值下降, 且干旱胁迫对‘烟薯25’的SPAD值的影响较‘商薯19’更小。不同干旱程度对甘薯叶绿素SPAD值的影响不明显, 随着PEG浓度升高, 甘薯SPAD值有先升高后降低的趋势。

2.3 干旱胁迫对甘薯叶片细胞膜透性的影响

随着PEG浓度升高和胁迫时间增长, 甘薯叶片的细胞膜透性持续增加。其中重度干旱下‘商薯19’的细胞膜透性分别在24、48、72 h比正常处理升高了1.9、2.8和4.7倍。说明干旱胁迫可以导致甘薯叶片细胞膜结构受损, 且随着干旱程度升高或胁迫时间加长, 均会使叶片的膜结构受损加重。另外, 干旱胁迫对‘烟薯25’叶片细胞膜透性的影响较‘商薯19’更小, 说明‘烟薯25’叶片膜结构抵御干旱的能力更强(图1)。

2.4 干旱胁迫对甘薯叶片MDA含量、POD及CAT活性的影响

随着PEG浓度升高, 甘薯叶片中MDA含量不断升高。其中‘烟薯25’在5%、10%、15%PEG浓度胁迫24 h的MDA含量分别比正常处理升高了1.7、2.2和3.6倍, 可以看出重度干旱胁迫对甘薯叶片MDA含量影响最大。随着时间增长, 各处理MDA含量也不断升高(表4)。

表3 不同干旱胁迫对甘薯叶绿素SPAD的影响

Table 3 Effect of different drought stress on chlorophyll SPAD of sweet potato

品种	PEG处理浓度/%	SPAD值		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	48.7±1.3[b]	48.8±0.6[b]	48.9±1.9[ab]
	5	51.2±0.9[a]	50.7±0.9[ab]	50.9±1.7[a]
	10	52.1±1.6[a]	51.5±0.8[a]	49.1±1.8[ab]
	15	49.4±0.7[b]	49.2±1.0[b]	46.3±1.6[b]
‘商薯19’	0	48.8±1.1[ab]	50.3±1.2[a]	50.4±1.0[a]
	5	50.6±0.9[a]	50.9±0.8[a]	50.1±1.0[a]
	10	47.7±1.0[b]	47.4±1.4[b]	46.6±1.4[b]
	15	47.7±0.6[b]	45.7±1.0[b]	42.6±1.8[c]

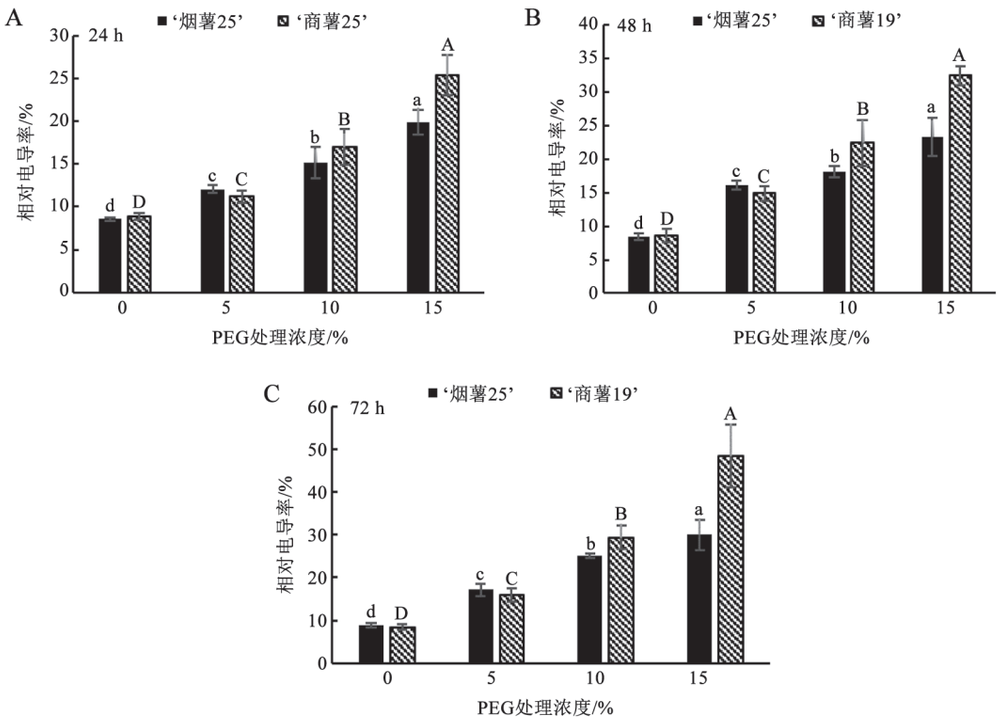

图1 不同干旱胁迫对甘薯叶片相对电导率的影响

Fig.1 Effect of different drought stress on the relative conductivity of sweet potato leaves

图柱上方小写字母表示‘烟薯25’各时期不同PEG浓度处理在$P<0.05$差异显著, 大写字母表示‘商薯19’各时期不同PEG浓度处理在$P<0.05$差异显著。图2~4同。

随着PEG浓度升高, 甘薯叶片中POD活性不断升高。随着胁迫时间增长, 两种甘薯叶片POD活性均开始升高, 48 h之后, ‘商薯19’各干旱处理开始下降, ‘烟薯25’虽无明显下降, 但升高趋势基本减缓。对比两种甘薯品种POD活性发现, 干旱胁迫24 h时‘商薯19’略高于‘烟薯25’, 但72 h后‘烟薯25’高于‘商薯19’(表5)。

随着PEG浓度升高, 甘薯叶片中CAT活性不断升高。随着胁迫时间增长, ‘烟薯25’中旱和重旱处理CAT活性开始下降, 至72 h下降为最低。而‘商薯

表4 不同干旱胁迫对甘薯叶片MDA含量的影响

Table 4 Effect of different drought stress on MDA content in sweet potato leaves

品种	PEG处理浓度/%	MDA含量/nmol·mg^{-1} (蛋白)		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	0.86±0.09^{c}	0.89±0.12^{d}	0.85±0.07^{c}
	5	2.30±0.18^{b}	1.29±0.17^{c}	2.11±0.18^{b}
	10	2.78±0.39^{b}	2.55±0.19^{b}	2.26±0.24^{b}
	15	3.94±0.46^{a}	3.79±0.48^{a}	3.11±0.26^{a}
‘商薯19’	0	0.83±0.08^{c}	0.89±0.08^{c}	0.83±0.13^{c}
	5	2.13±0.23^{b}	2.24±0.15^{b}	1.19±0.24^{b}
	10	2.66±0.16^{a}	2.83±0.36^{ab}	1.44±0.16^{b}
	15	2.91±0.35^{a}	3.04±0.26^{a}	2.80±0.36^{a}

表5 不同干旱胁迫对甘薯叶片POD活性的影响

Table 5 Effect of different drought stress on activity of POD in sweet potato leaves

品种	PEG处理浓度/%	POD活性/U·mg^{-1} (蛋白)		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	23.78±2.59^{c}	24.02±1.70^{c}	25.86±2.42^{b}
	5	30.19±3.16^{b}	41.54±2.19^{b}	49.01±3.26^{a}
	10	36.17±3.89^{b}	48.77±4.89^{ab}	54.51±3.44^{a}
	15	43.95±2.46^{a}	52.16±5.46^{a}	51.36±2.83^{a}
‘商薯19’	0	27.46±1.78^{c}	26.78±1.26^{c}	22.38±1.41^{c}
	5	36.79±2.34^{b}	37.96±3.34^{b}	35.62±2.36^{b}
	10	44.19±3.63^{a}	45.68±5.63^{ab}	47.35±3.46^{a}
	15	49.26±5.36^{a}	56.67±6.36^{a}	40.99±5.08^{a}

19’各干旱处理CAT活性先升高后降低。对比两种甘薯品种CAT活性发现，干旱初期‘烟薯25’较高，但72 h后则‘商薯19’较高(表6)。

2.5 干旱胁迫对甘薯叶片光合参数的影响

随着PEG浓度的升高，甘薯叶片净光合速率(P_n)与气孔导度(G_s)逐渐下降，胞间CO_2浓度(C_i)不断升高。说明随着干旱程度的加深，甘薯的光合作用不断减弱，其中重度干旱下降最多，‘烟薯25’在重旱条件下净光合速率(P_n)与气孔导度(G_s)较正常处理下降了59.2%和84.2%，胞间CO_2浓度(C_i)升

表6 不同干旱胁迫对甘薯叶片CAT活性的影响

Table 6 Effect of different drought stress on activity of CAT in sweet potato leaves

品种	PEG处理浓度/%	CAT活性/U·mg^{-1} (蛋白)		
		24 h	48 h	72 h
‘烟薯25’	0	9.77±0.39^{d}	9.31±0.70^{b}	10.67±0.42^{b}
	5	13.87±0.16^{c}	12.67±1.18^{a}	13.02±0.65^{a}
	10	14.74±0.49^{b}	13.12±0.88^{a}	12.66±1.69^{a}
	15	16.11±0.66^{a}	14.11±1.26^{a}	13.42±1.57^{a}
‘商薯19’	0	10.21±0.52^{d}	10.10±0.56^{c}	10.38±1.38^{b}
	5	12.25±0.34^{c}	14.22±0.64^{b}	12.93±1.47^{ab}
	10	13.12±0.33^{b}	13.73±1.03^{b}	13.62±1.19^{a}
	15	14.55±0.76^{a}	16.12±0.86^{a}	14.95±1.02^{a}

高了77.5%, 而‘商薯19’的光合指标的下降幅度高于‘烟薯25’(图2)。

干旱条件下甘薯叶片气孔导度(G_s)减小, 气孔关闭也致使蒸腾速率(T_r)不断降低。蒸腾拉力的减弱导致甘薯根系很难汲取到水分。本研究中, 高旱条件严重影响了甘薯的WUE。其中, 重度干旱下‘商薯19’的WUE较正常处理下降了79.5%, ‘烟薯25’WUE仅下降了38.2%, 说明‘烟薯25’抗旱性高于‘商薯19’。

2.6 干旱胁迫对甘薯叶片叶绿素荧光生理特性的影响

由表7可知, 随着PEG浓度的升高, 甘薯的最大光化学效率(F_v/F_m)不断降低, 反应中心的性能指数(PI_{abs})不断下降。其中, 重度干旱下72 h的‘烟薯25’ F_v/F_m与PI_{abs}分别比正常下降了16.9%和85.5%。另外, 随着干旱程度加深, F_0及单位反应中心的的吸收光能(ABS/RC)有增长趋势, 单位叶面积吸收的光能(ABS/CSm)与各处理间电子传递能量占总吸收光能的比例(ETo/ABS)均有下降趋势, 但差异

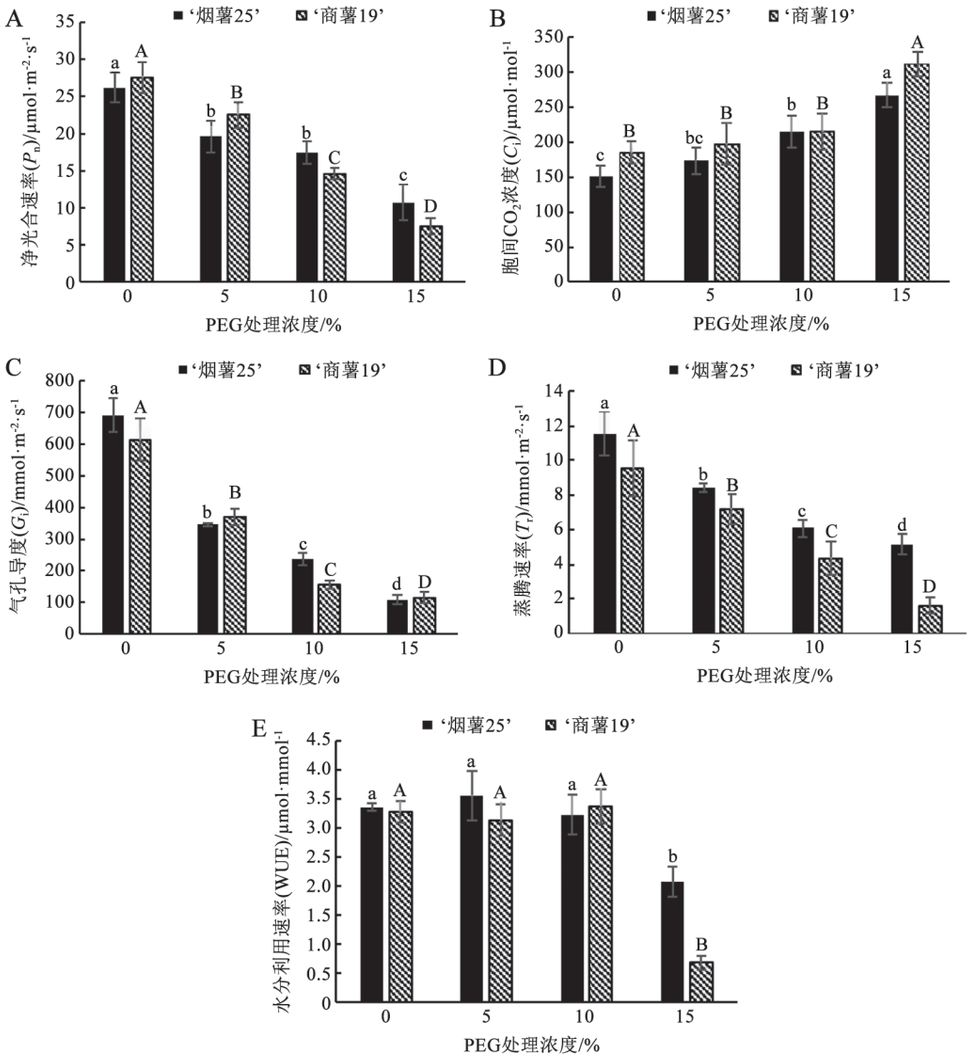

图2 不同干旱胁迫48 h对甘薯光合参数的影响

Fig.2 Effect of different drought stress on photosynthetic parameters of sweet potato for 48 h

表7 不同干旱胁迫对甘薯叶片荧光参数的影响

Table 7 Effect of different drought stress on the fluorescence parameters of sweet potato leaves

品种	时间/h	PEG处理浓度/%	F_0	F_v/F_m	PI_{abs}	ABS/RC	ABS/CSm	ETo/ABS
‘烟薯25’	24	0	3 855.5±287.8^{a}	0.84±0.01^{a}	17.39±2.73^{a}	0.99±0.19^{a}	23 064.0±1 754.7^{a}	0.64±0.01^{a}
		5	3 933.5±309.0^{a}	0.82±0.01^{b}	16.89±3.45^{a}	0.90±0.07^{a}	19 826.5±823.8^{b}	0.63±0.03^{a}
		10	3 958.5±173.2^{a}	0.81±0.01^{bc}	15.20±2.53^{a}	1.04±0.10^{a}	21 619.0±29.7^{a}	0.63±0.05^{a}
		15	3 990.5±154.9^{a}	0.79±0.02^{c}	12.50±2.32^{b}	1.08±0.05^{a}	20 940.5±989.2^{ab}	0.60±0.06^{a}
	48	0	4 884.5±381.4^{b}	0.83±0.01^{a}	15.42±2.36^{a}	1.25±0.18^{b}	23 581.0±1 043.7^{a}	0.53±0.07^{a}
		5	4 724.5±285.7^{b}	0.79±0.01^{b}	7.91±1.86^{b}	1.39±0.07^{b}	20 710.5±358.9^{b}	0.58±0.05^{a}
		10	5 776.0±364.4^{a}	0.75±0.01^{c}	4.82±0.68^{c}	1.37±0.11^{b}	22 658.5±1 346.7^{ab}	0.52±0.04^{a}
		15	5 549.5±132.5^{a}	0.71±0.02^{d}	4.19±0.68^{c}	1.81±0.34^{a}	20 522.5±1 844.5^{b}	0.52±0.02^{a}
	72	0	4 625.5±157.8^{b}	0.83±0.01^{a}	14.39±2.63^{a}	0.99±0.04^{c}	23 857.0±954.2^{a}	0.63±0.02^{a}
		5	4 863.0±284.3^{b}	0.79±0.01^{b}	5.14±1.52^{b}	1.39±0.33^{b}	22 640.5±2 100.8^{a}	0.46±0.08^{b}
		10	4 977.0±347.9^{b}	0.77±0.01^{c}	4.50±0.67^{b}	1.37±0.21^{b}	21 803.0±1 084.7^{a}	0.48±0.09^{b}
		15	5 828.5±542.4^{a}	0.69±0.01^{d}	2.08±0.36^{c}	1.98±0.15^{a}	18 966.5±884.6^{b}	0.42±0.06^{b}
‘商薯19’	24	0	3 754.5±71.4^{b}	0.83±0.01^{a}	15.40±2.35^{a}	0.90±0.01^{b}	22 662.0±1 253.0^{b}	0.61±0.02^{a}
		5	3 955.0±247.7^{b}	0.81±0.01^{a}	17.80±1.75^{a}	0.82±0.02^{c}	22 791.0±1 583.7^{b}	0.62±0.02^{a}
		10	4 468.2±326.1^{a}	0.79±0.01^{b}	12.60±0.68^{b}	1.05±0.04^{a}	26 208.0±1 633.5^{a}	0.61±0.04^{a}
		15	4 526.0±36.8^{a}	0.77±0.01^{b}	5.66±2.38^{c}	1.00±0.06^{a}	19 963.0±393.2^{c}	0.47±0.05^{b}
	48	0	3 628.5±258.3^{b}	0.82±0.01^{a}	14.30±0.85^{a}	0.95±0.02^{c}	22 577.0±476.0^{a}	0.64±0.03^{a}
		5	4 576.0±482.2^{a}	0.78±0.01^{b}	5.70±1.04^{b}	1.13±0.11^{b}	20 614.5±1 538.0^{b}	0.50±0.01^{b}
		10	5 076.5±303.3^{a}	0.75±0.02^{c}	3.78±0.98^{bc}	1.38±0.05^{a}	20 690.0±461.0^{b}	0.47±0.03^{c}
		15	5 307.0±437.0^{a}	0.70±0.02^{d}	2.49±1.22^{c}	1.25±0.14^{ab}	19 907.0±1 587.3^{b}	0.35±0.02^{d}
	72	0	3 799.5±148.6^{b}	0.82±0.01^{a}	14.1±1.77^{a}	0.93±0.03^{c}	22 336.0±1 756.7^{a}	0.63±0.01^{a}
		5	4 498.0±520.3^{a}	0.79±0.01^{b}	6.94±1.23^{b}	1.28±0.09^{b}	22 410.0±1 533.3^{a}	0.55±0.02^{b}
		10	4 918.0±488.3^{a}	0.77±0.01^{b}	5.53±1.10^{b}	1.25±0.01^{b}	21 119.0±1 395.8^{a}	0.52±0.03^{b}
		15	5 043.5±197.3^{a}	0.73±0.02^{c}	2.03±0.56^{c}	1.77±0.17^{a}	19 026.5±733.3^{b}	0.41±0.03^{c}

不明显, 说明干旱程度越深, 甘薯叶片的PSII损伤越严重。随着胁迫时间的增长, ABS/RC明显升高, ETo/ABS显著减小, 甘薯的F_v/F_m与PI_{abs}下降幅度加大, 其中重度干旱24 h至72 h, ‘烟薯25’的F_v/F_m由0.79下降为0.69, PI_{abs}下降了83.4%。说明干旱胁迫时间越长, 甘薯叶片的PSII受损越严重。

叶绿素荧光动力学曲线一定程度上能反映干旱胁迫对叶片PSII功能的影响。从图3可以看出, 随着PEG浓度的升高, 两种甘薯品种的最大吸收值F_m (P值)均会降低。与正常相比, 15% PEG重度干旱处理的降低幅度最大。表明干旱胁迫程度越高, PSII反应中心受损越严重。不同程度干旱胁迫对两种甘薯的影响趋势基本相同。

2.7 甘薯生理指标与地上部生物量的回归分析及与不同浓度PEG水势相关性分析

分别以两个甘薯品种干旱胁迫48 h的相对含水量(X_1)、相对电导率(X_2)、MDA含量(X_3)、SPAD值(X_4)、净光合速率P_n (X_5)、气孔导度G_s (X_6)、F_v/F_m (X_7)、PI_{abs} (X_8)为自变量, 甘薯地上部鲜重作为因变量(Y)进行逐步回归分析, 分析得‘烟薯25’的回归关系为$Y_1=-38.52+131.10X_1-0.82X_2-4.18X_3-0.80X_4+0.65X_5+0.06X_6+339.6X_7+0.39X_8$ ($R_1=0.987$, $F_1=262.35$, $P_1=0.01$), ‘商薯19’的回归关系为$Y_2=738.85+532.65X_1-2.57X_2-10.26X_3-1.86X_4+1.95X_5+0.12X_6+1\,038.30X_7+7.27X_8$ ($R_2=0.998$, $F_2=923.46$, $P_2=0.001$)。为进一步明确逐步回归分析的各项指标对干旱的响应程度, 本研究进行了通径分析(表8)。逐步回归与通径分析表明, 叶片相对含水量和F_v/F_m是影响甘薯地上部生物量的关键指标, 对干旱胁迫响应较为敏感。

根据Michel等人研究的公式计算, 25°C条件下, 5%、10%、15%的PEG-6000溶液的水势(Ψ)分

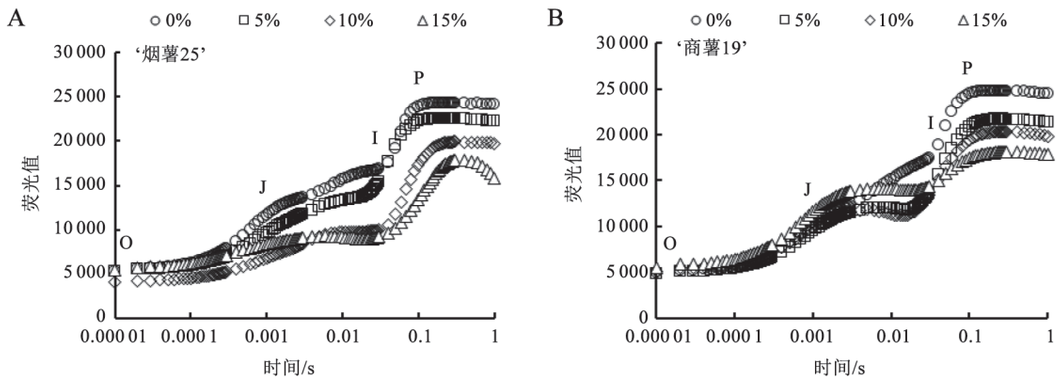

图3 不同干旱胁迫48 h对甘薯叶绿素荧光动力学曲线的影响

Fig.3 Effect of different drought stress on the chlorophyll fluorescence kinetics curve of sweet potato for 48 h

表8 干旱胁迫48 h甘薯生理指标对甘薯地上部鲜重作用的直接通径系数

Table 8 Direct path coefficient of the physiological index of sweet potato for 48 h under drought stress on the fresh weight of sweet potato

作用因子	直接效应							
	相对含水量	相对电导率	MDA含量	SPAD	净光合速率	气孔导度	F_v/F_m	PI_{abs}
‘烟薯25’	1.27	–0.40	–0.43	–0.11	0.33	0.86	1.38	0.17
‘商薯19’	2.30	–0.74	–0.28	–0.10	0.48	0.75	1.52	0.38

别为: −0.50 MPa、−1.48 MPa和−2.95 MPa, 正常处理水势近似看作0 MPa。选取两种甘薯的相对含水量、F_v/F_m、MDA含量、净光合速率(P_n)分别与不同浓度PEG水势Ψ进行相关性分析。由表8可知, PEG水势与两个甘薯品种干旱胁迫48 h的相对含水量、F_v/F_m、净光合速率(P_n)显著相关, 并与‘烟薯25’的MDA含量呈显著负相关(R=−0.98**)。说明叶片相对含水量、F_v/F_m等生理指标均对干旱胁迫有明显响应, 可以作为甘薯干旱诊断的重要生理指标。两个甘薯品种的各生理指标与PEG浓度水势Ψ的线性拟合模型见图4。

3 讨论

3.1 干旱胁迫对甘薯叶片含水量、细胞膜透性与活性氧代谢的影响

水分是活细胞的必要组成和代谢活动的重要物质, 抗旱性强的植物叶片结构更有利于减少水分损失, 因此叶片的保水力直接体现了植物的抗旱能力(刘颖慧等2006)。在小麦、树种等研究中均表明叶片相对含水量与植物抗旱性呈正相关(李德全等1990; 冯慧芳等2009)。本研究中, 随着干旱程度升高和胁迫时间增长, 甘薯叶片相对含水量持续下

表9 不同PEG浓度水势与胁迫48 h甘薯生理指标的相关性

Table 9 Correlation between osmotic potential of different PEG concentrations and physiological indexes of sweet potato for 48 h

品种	水势	相关系数			
		相对含水量	F_v/F_m	MDA含量	净光合速率(P_n)
‘烟薯25’	Ψ	0.93*	0.98**	–0.98**	0.96**
‘商薯19’		0.91*	0.98**	–0.84	0.99**

**和*分别表示在0.01和0.05水平上显著相关。

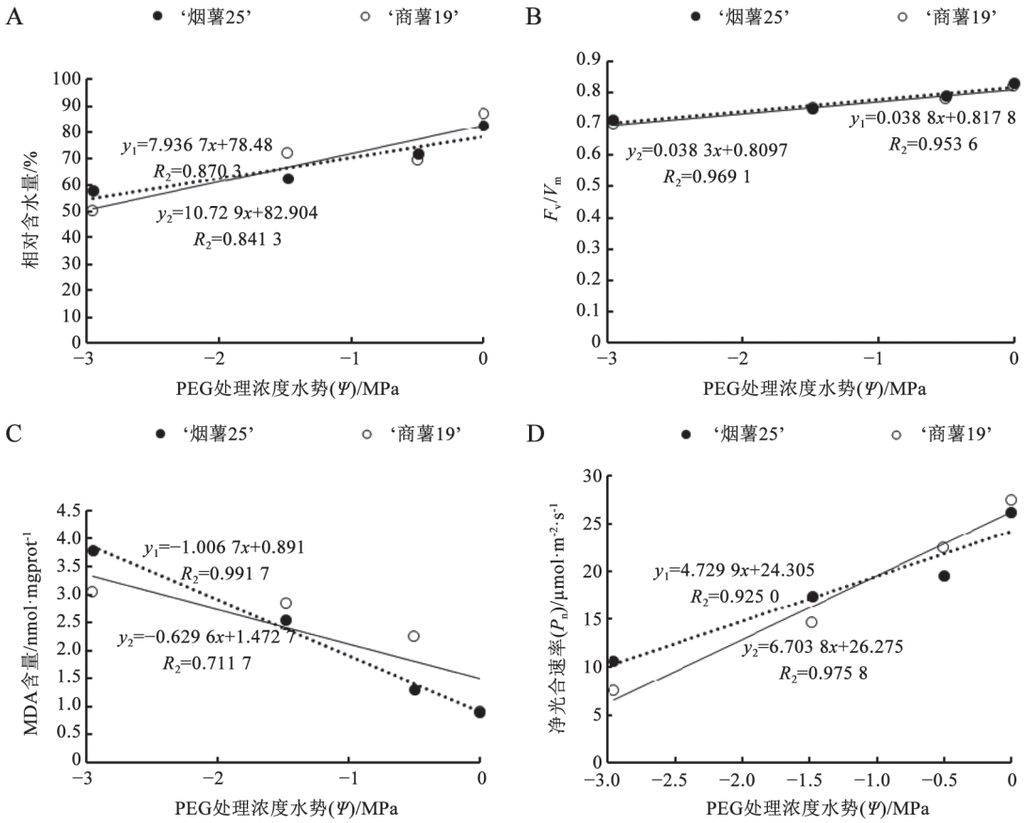

图4 不同PEG浓度水势与胁迫48 h甘薯生理指标拟合结果

Fig.4 Fitting results of different PEG concentration osmotic potential and physiological index of sweet potato for 48 h

y_1和y_2分别表示‘烟薯25’号和‘商薯19’号的拟合方程。

降。其中重度干旱24 h的‘烟薯25’与‘商薯19’相对含水量分别比正常处理下降了7.6%和37.1%。植物在受到干旱胁迫时组织电解质外渗量增加是胁迫导致的细胞膜透性增加的结果, 所以用相对电导率表示叶片的细胞膜透性可以反映植物叶片膜结构的损伤程度(Demidchik等2014; 解卫海等2015)。有研究发现(史普想等2016), 干旱胁迫下花生幼苗叶片的细胞膜透性增加, 膜系统受到破坏。与之相似, 本试验条件下, 随着干旱程度升高和胁迫时间增长, 甘薯叶片的细胞膜透性不断增加。其中重度干旱24、48、72 h下, ‘商薯19’细胞膜透性分别在比正常处理升高了1.9、2.8和4.7倍。其中, ‘烟薯25’叶片保水能力较高, 膜结构更完整, 抗旱性较强。

正常情况下植物细胞内氧自由基的产生与清除处于一种动态平衡, 一旦植物受到胁迫, 平衡遭到破坏, 会导致细胞氧自由基的活性增高(梁新华等2006)。MDA是一种高活性脂膜过氧化物, 能通过影响膜蛋白从而影响活性氧代谢系统的平衡(袁琳等2005)。而POD和CAT作为细胞保护酶, 可在逆境胁迫时过度表达, 清除活性氧, 增强细胞防卫能力(何冰等1997)。本研究中, 随着干旱程度加深, 甘薯叶片中MDA含量、POD及CAT活性均不断升高。随着胁迫时间的增长, ‘烟薯25’各干旱处理的MDA含量和CAT活性逐渐下降, POD活性缓慢升高; 而‘商薯19’的MDA含量和POD、CAT活性均先升高后降低。

3.2 干旱胁迫对甘薯光合参数和荧光生理特性的影响

光合作用是作物生长和产量形成的重要代谢过程,是植物生长发育的物质和能量的主要来源

(王军等2017)。干旱胁迫会导致叶片气孔关闭以降低蒸腾速率, 但气孔闭合在减少水分散失的同时, 也减少了CO_2的进入, 从而使光合速率不断下降(安玉艳等2012)。除气孔限制外, 干旱条件下甘薯叶片的光合器官结构受到严重破坏, 而此时叶片光合主要受叶绿体对光的吸收能力和对CO_2的固定能力影响(龚秋等2015)。张海燕等(张海燕等2018)研究发现, 甘薯薯蔓并长期处于干旱条件下, 净光合速率较正常下降了18.7%。本研究中也得到了证实, 随着干旱程度加深, 甘薯的气孔导度与光合速率均不断降低, 重度干旱下‘烟薯25’的净光合速率(P_n)与气孔导度(G_s)较正常处理下降了59.2%和84.2%, 胞间CO_2浓度(C_i)升高了77.5%。

叶绿素荧光参数能从叶片PSII的光能转换和电子传递效率等方面反映干旱胁迫下甘薯叶片对光能的吸收与转换, 其中F_v/F_m是最大光化学效率, 能表征原初反应中心的光能利用率和转化率, 反应中心性能指数(PI_{abs})反映了PSII的整体性能(张善平等2014)。有研究(谌端玉等2016; 孙景宽等2009)认为, F_v/F_m小于0.8说明植物受到胁迫, 且F_v/F_m值随胁迫加深不断减小。本研究与之相似, 胁迫24 h的‘烟薯25’与‘商薯19’仅有重旱处理的F_v/F_m小于0.8, 而胁迫48 h后各干旱处理的F_v/F_m均小于0.8, 说明干旱程度越深, 胁迫时间越长, F_v/F_m下降越多。PI_{abs}也随干旱程度的升高不断下降, 其中重旱72 h下‘烟薯25’的PI_{abs}比正常处理下降了85.5%。有研究认为植物的F_0上升可能是由于植物热耗散保护机制失去作用, 使其反应中心受到不可逆失活(蒲光兰等2005)。植物F_0的增幅越小, 说明干旱胁迫对其反应中心的破坏程度越小, 植物抗旱性越强(綦伟等2006)。本研究中, 两种甘薯的F_0均随干旱加深而升高, 但‘商薯19’的F_0增幅明显高于‘烟薯25’, 说明‘烟薯25’的抗旱性较强。

3.3 干旱胁迫下甘薯生理指标的变化与干旱诊断研究

前人在进行作物的干旱诊断研究时, 将叶绿素荧光指标作为一种常规的诊断技术。有学者通过叶绿素荧光和光谱扫描成像技术对黄瓜的早期干旱进行了诊断研究(Wang等2015)。还有研究发现, ΦNO (非调节性能量耗散)对干旱胁迫敏感且较为稳定(安东升等2015), 可作为甘蔗苗期抗旱性的快速诊断指标。本试验采用光合、荧光与生理特性指标相结合, 通过多元分析选取叶片相对含水量、MDA含量、F_v/F_m和净光合速率(P_n)作为甘薯的干旱诊断指标。

本研究发现, ‘烟薯25’的F_v/F_m在胁迫24 h后均高于0.79, 此时甘薯还未对干旱产生明显响应。另外, 商薯19各干旱处理的CAT、POD、CAT会随时间变化先升高后降低, 于48 h时达到峰值, 所以干旱胁迫下甘薯48 h的生理指标响应更为明显。本试验条件下, 对于长蔓鲜食型甘薯‘烟薯25’, 当相对含水量低于71.9%时, 说明甘薯受到干旱胁迫的影响; 当CAT含量处于1.29~2.55 $nmol\cdot mg^{-1}$ (蛋白), 或F_v/F_m位于0.75~0.79时, 或者P_n处于17.4~19.6 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$时, 说明甘薯受到轻中度干旱胁迫, 需要尽快灌水缓解干旱; 而当CAT含量高于3.79 $nmol\cdot mg^{-1}$ (蛋白), F_v/F_m小于0.71时, 或者P_n小于10.7 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$时, 说明甘薯受到重度干旱, 可能已造成不可逆的损伤。对于中长蔓淀粉型甘薯‘商薯19’来说, 相对含水量处于61.9%~69.4%时, 或F_v/F_m位于0.75~0.78时, 或者P_n处于14.6~22.5 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$时, 说明甘薯受到轻中度干旱胁迫; 而当相对含水量小于50.2%时, 或F_v/F_m小于0.70时, 或者P_n小于7.5 $\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$时, 说明甘薯受到重度干旱胁迫。

参考文献(References)

Agüera F, Villalobos FJ, Orgaz F (1997). Evaluation of sunflower (*Helianthus annuus* L.) genotypes differing in early vigour using a simulation model. Eur J Agron, 7: 109–118

An DS (2011). Chlorophyll fluorescence based water stress dlagnosis for cut lilium grown in greenhouse (dissertation). Nanjing: Nanjing Agricultural University (in Chinese with English abstract) [安东升(2011). 温室切花百合对干旱胁迫响应的叶绿素荧光诊断研究(学位论文). 南京: 南京农业大学]

An DS, Cao J, Huang XH, et al (2015). Application of Lake-model based indices from chlorophyll fluorescence on sugarcane seedling drought resistance study. J Plant Ecol, 39 (4): 398–406 (in Chinese with English abstract) [安东升, 曹娟, 黄小华等(2015). 基于Lake模型的叶绿素荧光参数在甘蔗苗期抗旱性研究中的应用. 植物生态学报, 39 (4): 398–406]

An YY, Liang ZS (2012). Staged strategy of plants in response

to drought stress. Chin J Appl Ecol, 23 (10): 2907–2915 (in Chinese with English abstract) [安玉艳, 梁宗锁(2012). 植物应对干旱胁迫的阶段性策略. 应用生态学报, 23 (10): 2907–2915]

Chartzoulakis K, Noitsakis B, Therios I (1993). Photosynthesis, plant growth and dry matter distribution in kiwifruit as influenced by water deficits. Irrig Sci, 14 (1): 1–5

Chen CX, Tang J, Gao HF, et al (2019). Analysis of drought resistance difference between different varieties of sweet potato. Anhui Agr Sci Bull, 25 (1): 55–56, 78 (in Chinese with English abstract) [陈传信, 唐君, 高海峰等(2019). 不同品种间甘薯抗旱性差异分析. 安徽农学通报, 25 (1): 55–56, 78]

Chen DY, Ou J, Wang LJ, et al (2016). Effects of drought stress on chlorophyll content and fluorescence parameters of *Rhododendron annae* Franch. seedlings inoculated with ERM fungi. South Agr Sci, 47 (7): 1164–1170 (in Chinese with English abstract) [谌端玉, 欧静, 王丽娟等(2016). 干旱胁迫对接种ERM真菌桃叶杜鹃幼苗叶绿素含量及荧光参数的影响. 南方农业学报, 47 (7): 1164–1170]

Demidchik V, Straltsova D, Medvedev SS, et al (2014). Stress-induced electrolyte leakage: the role of K^+-permeable channels and involvement in programmed cell death and metabolic adjustment. J Exp Bot, 65 (5): 1259–1270

Feng HF, Xue L, Ren XR, et al (2009). Physiological responses of four broadleaved seedlings to drought stress simulated by PEG. Acta Ecol Sin, 31 (2): 371–382 (in Chinese with English abstract) [冯慧芳, 薛立, 任向荣等(2009). 4种阔叶幼苗对PEG模拟干旱的生理响应. 生态学报, 31 (2): 371–382]

Gajanayake B, Reddy KR (2016). Sweetpotato responses to mid- and late-season soil moisture deficits. Crop Sci, 56: 1865–1877

Gong Q, Wang X, Hou M, et al (2015). Effects of drought stress on photosynthetic properties and dry matter accumulation of purple sweet potato. Acta Agr Boreali-Sin, 30 (3): 111–116 (in Chinese with English abstract) [龚秋, 王欣, 后猛等(2015). 干旱胁迫对不同品系紫甘薯光合特性及干物质积累的影响. 华北农学报, 30 (3): 111–116]

He B, Xu HY, Chen J (1997). Effects of drought stress on the permeability of plasma membrane and anti-oxidation enzymes of the leaves of sweet potato. Geno Appl Biol, 16 (4): 287–290 (in Chinese with English abstract) [何冰, 许鸿源, 陈京(1997). 干旱胁迫对甘薯叶片质膜透性及抗氧化酶类的影响. 基因组学与应用生物学, 16 (4): 287–290]

Kang SZ, Cai HJ (1996). Agricultural Water Management. Beijing: China Agriculture Press, 101–118, 172–174 (in Chinese) [康绍忠, 蔡焕杰(1996). 农业水管理学. 北京: 中国农业出版社, 101–118, 172–174]

Li CZ, Li H, Liu Q, et al (2016). Comparison of root development and fluorescent physiological characteristics of sweet potato exposure to drought stress in different growth stages. J Plant Nutr Fert , 22 (2): 511–517 (in Chinese with English abstract) [李长志, 李欢, 刘庆等(2016). 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, 22 (2): 511–517]

Li DQ, Zou Q, Cheng BS (1990). Relationship between water status and osmotic adjustment of wheat leaves different in drought resistance. Chin Bull Bot, 7 (4): 43–48 (in Chinese with English abstract) [李德全, 邹琦, 程炳嵩(1990). 抗旱性不同的小麦叶片的渗透调节与水分状况的关系. 植物学报, 7 (4): 43–48]

Li Q, Cao JH, Yu LJ, et al (2010). Effect of exogenous calcium on the photosynthetic characteristics of *Lonicera japonica* Thunb under drought stress. Ecol Environ Sci, 19 (10): 2291–2296 (in Chinese with English abstract) [李强, 曹建华, 余龙江等(2010). 干旱胁迫过程中外源钙对忍冬光合生理的影响. 生态环境学报, 19 (10): 2291–2296]

Li YM, He XR, Li QM, et al (2019). Effect of CO_2 enrichment on antioxidant system in cucumber seedling root system under drought stress. Plant Physiol J, 55 (7): 1011–1019 (in Chinese with English abstract) [李仪曼, 贺新蕊, 李清明等(2019). CO_2加富对干旱胁迫下黄瓜幼苗根系抗氧化系统的影响. 植物生理学报, 55 (7): 1011–1019]

Liang XH, Shi DG (2006). Effect of drought stress on the content of malondialdehyole and activity of cell defense enzymes in *Glycyrrhiza glabra* seedlings roots. Agr Res Arid Areas, 24 (3): 108–110 (in Chinese with English abstract) [梁新华, 史大刚(2006). 干旱胁迫对光果甘草幼苗根系MDA含量及保护酶POD、CAT活性的影响. 干旱地区农业研究, 24 (3): 108–110]

Liu YH, Gao Q, Jia HK (2006). Leaf-scale drought resistance and tolerance of three plant species in a semi-arid environment: application and comparison of two stomatal conductance models. J Plant Ecol, 30 (1): 64–70 (in Chinese with English abstract) [刘颖慧, 高琼, 贾海坤(2006). 半干旱地区3种植物叶片水平的抗旱耐旱特性分析——两个气孔导度模型的应用和比较. 植物生态学报, 30 (1): 64–70]

Michel BE, Kaufmann MR (1973). The osmotic potential of polyethylene glycol 6000. Plant Physiol, 51: 914–916

Pu GL, Zhou LY, Hu XH, et al (2005). Effect of soil drought stress on characteristics of chlorophyll fluorescence in Jintaiyang apricot variety. Agr Res Arid Areas, 23 (3): 44–48 (in Chinese with English abstract) [蒲光兰, 周兰英, 胡学华等(2005). 干旱胁迫对金太阳杏叶绿素荧光动力学参数的影响. 干旱地区农业研究, 23 (3): 44–48]

Qi W, Tan H, Zhai H (2006). Photosynthetic characters and fluorescence parameters of different grape stocks under water stress. Chin J Appl Ecol, 17 (5): 835–838 (in Chinese with English abstract) [綦伟, 谭浩, 翟衡(2006). 干旱胁迫对不同葡萄砧木光合特性和荧光参数的影响. 应用生态学报, 17 (5): 835–838]

Shi PX, Qin X, Liu YR, et al (2016). The effects of coronatine on antioxidant enzyme activity and cell membrane permeability of peanut (*Arachis hypogaea* L.) seedling leaves under drought stress. J Peanut Sci, 45 (4): 30–35 (in Chinese with English abstract) [史普想, 秦欣, 刘盈茹等(2016). 干旱胁迫下冠菌素(COR)对花生幼苗叶片抗氧化酶活性及细胞膜透性的影响. 花生学报, 45 (4): 30–35]

Sun JK, Zhang WH, Lu ZH, et al (2009). Chlorophyll fluorescence characteristics of *Elaeagnus angustifolia* L. and *Grewia biloba* G. Don var. *Parviflora* (Bge.) Hand-Mazz. seedlings under drought stress. Bull Botan Res, 29 (2): 216–223 (in Chinese with English abstract) [孙景宽, 张文辉, 陆兆华等(2009). 干旱胁迫下沙枣和孩儿拳头叶绿素荧光特性研究. 植物研究, 29 (2): 216–223]

Sun Z, Shi CY, Liu GL, et al (2016). 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, 22 (4): 1071–1078 (in Chinese with English abstract) [孙哲, 史春余, 刘桂玲等(2016). 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, 22 (4): 1071–1078]

Van Heerden PDR, Laurie R (2008). Effects of prolonged restriction in water supply on photosynthesis, shoot development and storage root yield in sweet potato. Physiol Plant, 134 (1): 99–109

Wang H, Li H, Xu L (2015). A new indicator in early drought diagnosis of cucumber with chlorophyll fluorescence imaging. Proc SPIE-Int Soc Opt Eng, 9530

Wang H, Yu HN, Deng GY, et al (1989). Studies on effects of wheat water stress at different development stages on yield and drought determination. Acta Agr Boreali-Sin, 1989, 4 (4): 1–5 (in Chinese with English abstract) [王宏, 于沪宁, 邓根云等(1989). 小麦不同生育期水分胁迫对产量的影响及干旱诊断方法初探. 华北农学报, 4 (4): 1–5]

Wang J, Chen F, Wen MX, et al (2017). Effect of 6-BA on drought tolerance of flue-cured tobacco (*Nicotiana tabacum* L.). Crop Res, 31 (2): 142–145, 180 (in Chinese with English abstract) [王军, 陈帆, 温明霞等(2017). 6-BA处理对烤烟耐旱性的影响. 作物研究, 31 (2): 142–145, 180]

Wang QM, Zhang LM, Wang ZL (2005). Formation and thickening of tuberous roots in relation to the endogenous hormone concentrations in sweetpotato. Sci Agr Sin, 38 (12): 2414–2420 (in Chinese with English abstract) [王庆美, 张立明, 王振林(2005). 甘薯内源激素变化与块根形成膨大的关系. 中国农业科学, 38 (12): 2414–2420]

Wang X, Zhang JL, Feng XX, et al (2017). The molecular mechanisms of plant plasma membrane intrinsic proteins trafficking and stress response. Hereditas, 39 (4): 293–301 (in Chinese with English abstract) [王星, 张纪龙, 冯秀秀等(2017). 植物质膜水通道蛋白转运及逆境胁迫响应的分子调控机制. 遗传, 39 (4): 293–301]

Wu YL, Wang HX, Yang J, et al (2017). Advances in storage root development and regulation in sweetpotato [*Ipomoea batatas* (L.) Lam.]. Plant Physiol J, 53 (5): 8–16 (in Chinese with English abstract) [吴银亮, 王红霞, 杨俊等(2017). 甘薯储藏根形成及其调控机制研究进展. 植物生理学报, 53 (5): 8–16]

Xie WH, Liu D, Sun JL, et al (2015). Permeability of cells in leaves of *Vitex trifolia* var. simplicifolia under stresses of dehydration and high oxygen pressure. Sci Silvae Sin, 51 (6): 44–49 (in Chinese with English abstract) [解卫海, 刘丹, 孙金利等 (2015). 脱水和高氧压过程中单叶蔓荆叶片细胞膜透性分析. 林业科学, 51 (6): 44–49]

Yuan L, Karim A, Zhang LQ (2005). Effects of NaCl stress on active oxygen metabolism and membrane stability in *Pistacia vera* seedlings. J Plant Ecol, 29 (6): 985–991 (in Chinese with English abstract) [袁琳, 克热木·伊力, 张利权(2005). NaCl胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响. 植物生态学报, 29 (6): 985–991]

Zhang HY, Xie BT, Duan WX, et al (2018). Effects of drought stress at different growth stages on photosynthetic efficiency and water consumption characteristics in sweet potato. Chin J Appl Ecol, 29 (6): 1943–1850 (in Chinese with English abstract) [张海燕, 解备涛, 段文学等(2018). 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, 29 (6): 1943–1850]

Zhang SP, Feng HJ, Ma CJ, et al (2014). Effect of light quality on photosynthesis and photosystem of maize (*Zea mays* L.) leaves. Sci Agr Sin, 47 (20): 3973–3981 (in Chinese with English abstract) [张善平, 冯海娟, 马存金等(2014). 光质对玉米叶片光合及光系统性能的影响. 中国农业科学, 47 (20): 3973–3981]

Physiological diagnosis of response to drought stress of sweet potato

LI Siping[1], YANG Shuo[1], LI Huan[1,*], LIU Qing[1], XIN Guosheng[2]

[1]*College of Resource and Environment, Qingdao Agricultural University, Qingdao, Shandong 266109, China*
[2]*Yantai Academy of Agricultural Sciences, Yantai, Shandong 265500, China*

Abstract: In response to the seasonal drought stress during the growth of sweet potato (*Ipomoea batatas*), the experiment used sand culture test method to add different concentrations of polyethylene glycol (PEG-6000) nutrient solution after 70 d of sweet potato planting to simulate mild, moderate and severe drought stress. Through the monitoring of dynamic physiological and biochemical indicators for three consecutive days, the drought diagnosis based on the physiological index of sweet potato in the middle of sweet potato growth was explored. The results showed that the physiological indexes of sweet potato after 48 h of stress were more obvious to drought in the process of drought stress for 24−72 h. Correlation analysis between physiological indexes of drought stress for 48 h and PEG concentration showed that the relative water content, malondialdehyde content, F_v/F_m and net photosynthetic rate (P_n) of the leaves were significantly correlated with different degrees of drought stress, among which the correlation coefficients of 'Yan sweetpotato 25' were 0.93, 0.98, −0.98, and 0.96, respectively. The stepwise regression analysis and path analysis of sweet potato physiological index and fresh weight of the ground showed that the relative water content and F_v/F_m of the sweet potato were the key indicators affecting the aboveground biomass of sweet potato (R_1=0.987 and R_2=0.998), among which the direct action coefficients of 'Shang sweetpotato 19' are 2.30 and 1.52, respectively. In summary, the diagnosis of key physiological indicators of sweet potato after drought stress can provide a theoretical basis for guiding post-drought irrigation of sweet potato seasonal drought.

key words: sweet potato; drought stress; chlorophyll fluorescence parameter; drought diagnosis

Received 2019-09-16 Accepted 2019-11-18

This work was supported by Special Funded Project for the Construction of Modern Agricultural Industrial Technology System (CARS-10-B10).

*Corresponding author (lihuancomcomcom@163.com).