

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

李长志, 李欢, 刘庆, 史衍玺*

(青岛农业大学, 山东青岛 266109)

摘要: 【目的】干旱胁迫是我国甘薯生产所面临的重要问题, 本试验旨在为研究甘薯的抗旱生理机制, 明确甘薯水分临界期, 减轻干旱影响和优化甘薯生产管理提供科学依据。【方法】利用人工旱棚, 设置甘薯正常供水与前期、中期和后期(即定栽后 15 d、55 d、95 d)干旱胁迫四个处理(田间持水量的 8%~10%, 每次胁迫持续 15 天)。用 Epson v700 扫描仪调查了不同处理三个不同时期根系发育, 用 M-PEA(Hansatech, 英国)测定了叶片荧光生理参数。【结果】前期和中期干旱均显著降低了甘薯地上和地下部生物量($P < 0.05$), 而后期干旱影响较小, 其规律表现为前期 > 中期 > 后期。其中, 前期干旱甘薯总生物量减少约 50%; 中期干旱造成地上和地下部分别减少 38.4% 和 31.1%; 后期干旱地上和地下部减少均约 10% 左右。各个时期干旱胁迫均显著影响甘薯根系发育($P < 0.05$)。与正常供水相比, 前期干旱胁迫总根长、总表面积和总体积分别减少 49.5%、55.7% 和 43.2%, 中期干旱胁迫分别减少 27.5%、27.0% 和 28.9%, 后期干旱胁迫影响较小。不同时期干旱胁迫对叶绿素荧光参数的影响不同, 前期和中期胁迫处理测定值差异显著, 叶绿素荧光动力学曲线发生明显变化, 后期未达显著性水平。与对照相比, 前期和中期的 PS II 综合荧光参数指标 F_m 、 F_v/F_m 、 $PI(ABS)$ 分别减少了 36.4%、15.6%、44.3% 和 14.7%、3.8%、22.6%; 指示反应中心活性的参数 ϕE_0 分别减少 7.7%、3.4%, 而反映电子传递速率的参数 V_j 、 dV/dt_0 分别增加了 33.1%、32.1% 和 19.2%、17.1%, 这些荧光参数的变化表明, 干旱胁迫导致 PS II 结构受损, 反应中心受到伤害, 光能转化效率降低, 电子传递受阻。【结论】甘薯水分临界期处于前中期, 实际中应特别加强甘薯前期的水分供应。

关键词: 甘薯; 干旱胁迫; 根系发育; 叶绿素荧光参数

中图分类号: S531 文献标识码: A 文献编号: 1008-505X(2016)02-0511-07

Comparison of root development and fluorescent physiological characteristics of sweet potato exposure to drought stress in different growth stages

LI Chang-zhi, LI Huan, LIU Qing, SHI Yan-xi*

(Qingdao Agricultural University, Shandong, Qingdao 266109, China)

Abstract: 【Objectives】To clarity the water critical period of sweet potato will provide scientific basis to find effective way against drought and optimization of production and management of sweet potato. 【Methods】A pot experiment was conducted inside an artificial drought shed. Three drought stress (8%–10% field water capacity, stress lasted 15 days for each treatment) was designed at early, middle and late stages of sweet potato (15, 55 and 95 days since transplanted). The root development was measured using Epson v700 Scannor, and the fluorescence physiological parameters using M-PEA(Hansatech, Britain) method. 【Results】The shoot and root biomass of sweet potato were significantly reduced when exposure to drought stress at both the early and middle growth stages ($P < 0.05$), but not significant at late stage drought stress, and the reducing effect was in order of early stage > middle stage > late stage. Compared with the control, the shoot and root biomass were reduced almost in half in the early

收稿日期: 2014-11-14 接受日期: 2015-04-20

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-11-B-14); 青岛市青年专项基金(14-2-4-117-jch); 青岛农业大学博士基金(6631314)资助。

作者简介: 李长志(1990—), 男, 山东垦利人, 硕士研究生, 主要从事植物营养研究。E-mail: 9731397@qq.com

* 通信作者 E-mail: yanxiy@126.com

stage stress, and decreased by 38.4% and 31.1% at middle stage stress, and less than 10% in the late stage stress for aboveground and underground parts. Drought stress affected root development, compared with the normal water supply. Early drought stress decreased the length, surface area and volume of root by 49.5%, 55.7% and 43.2% respectively, the middle stage decreased by 27.5%, 27.0% and 28.9% respectively, and late stage had less effect. The influence of drought stress on the chlorophyll fluorescence parameters was different when stressed in different periods, the significant impact was found in early stage and medium stage, not in later stage. Compared with CK, the comprehensive chlorophyll fluorescence of PS II, Fm, Fv/Fm and PI(ABS) at early and middle stage were decreased by 36.4%, 15.6%, 44.3% and 14.7%, 3.8%, 22.6% respectively, the ϕE_o value decreased by 7.7%, 3.4% respectively, Vj and dV/dto increased by 33.1%, 32.1% and 19.2%, 17.1% respectively.

[Conclusions] The changes of fluorescence parameters reflected the PS II structure damage and reaction center hurt caused by drought stress, which indicated the resulted blockage of light energy conversion efficiency and electron transfer. The adverse impact is mainly happened when sweet potato is suffered from drought stress in the early and middle growth stages. Therefore, proper irrigation should be considered in case of drought climate in seedling stage of sweet potato.

Key words: sweet potato; drought stress; root growth; chlorophyll fluorescence

多数作物都有一个水分敏感期,在这一时期如果水分供应不足会导致显著减产^[1]。甘薯虽较一般作物耐旱,但其发根分枝结薯期却是一生中对水分相对敏感的时期^[2]。干旱条件下,甘薯会在根系形态特征、生理代谢方面发生改变以适应或抵御环境胁迫^[3]。栽插后不定根的生长需要充足水分^[4],此时遇到干旱胁迫会对甘薯不定根的分化造成不利影响,阻碍块根的形成,导致形成块根数目减少^[5]。干旱胁迫下,甘薯叶片相对含水量(RWC)显著降低,叶绿素降解且含量持续减少;丙二醛(MDA)和脯氨酸含量不断上升,超氧化物歧化酶(SOD)先增加后减少^[6]。甘薯体内酶活性、可溶性糖含量、净光合速率以及蒸腾速率均随干旱胁迫加重而降低^[7]。

荧光技术作为测定植物光合生理特性的有效方法已被广泛应用于室内和野外植物光合特性研究。本试验模拟当地气候条件,在甘薯的前中后三阶段分别进行一次持续15天的干旱胁迫处理,研究甘薯在三个不同时期荧光生理参数和根系形态的变化,分析干旱生境与作物生理过程及产量之间的关系,找出甘薯的水分临界期,阐明干旱减产的主要原因,为减轻干旱影响和合理甘薯生产管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与方法

试验于2013年6月14日至10月12日,在青岛农业大学百埠庄试验基地的人工旱棚(旱棚长15 m,宽10 m,高3 m)中进行。试验用营养钵高45 cm,直径36 cm,栽培基质采用菜园土与沙子3:1混

合,每盆装40 kg土。以北方薯区主栽品种徐薯22号为试验材料,挑选长势一致的薯苗,每盆定植1株,进行正常管理。

1.2 试验设计

以基质含水量8%~10%作为干旱胁迫,18%~20%作为正常处理,定栽后15、55和95天(即前、中、后三个时期)进行干旱处理,每次干旱处理持续15天,用土壤湿度计控制土壤水分含量。试验共设42盆,干旱处理重复9盆,其中3盆胁迫后立即采样,剩余6盆收获期测产;正常处理15盆,3次动态采样,每次采3盆,剩余6盆收获期测产。

1.3 测试指标

根系参数:采样时,将根完整挖出,将变态根摘下并切片,用Epson v700扫描仪(分辨率为400 dpi)对细根和切片进行扫描。扫描时将根系放入特制的透明托盘内,加入3~5 mL水以避免根系分支的互相缠绕。扫描后保存图像,采用WinRHIZO分析程序对图像进行分析。

叶绿素荧光参数参考 Schanske 等(2003)方法,取甘薯第5片功能叶,暗处理20 min,然后利用M-PEA(Hansatech,英国)同时测定叶片快速叶绿素荧光诱导动力学曲线(O-J-I-P曲线)和对820 nm的光吸收曲线[远红光测量光为峰值(820±20)nm的LED光源]。O-J-I-P曲线由3000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的脉冲光诱导,荧光信号记录从10 μs 开始,至1 s结束,记录的初始速率为每秒118个数据。

1.4 数据分析

数据分析采用SPSS(14.0),同一时期干旱与

各正常处理间的差异显著性用 t 检验,产量和不同时期的效应差异采用方差分析,平均数间的差异显著程度采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 不同时期干旱胁迫对甘薯生物量的影响

表 1 为三个阶段的干旱与正常处理生物量的差

异。由表 1 可知,任何时期干旱胁迫均降低了甘薯地上和地下部生物量。与正常供水相比,前期和中期干旱胁迫导致其地上和地下部分别降低 47.2%、35.4% 和 38.4%、31.1%,且差异显著($P < 0.05$)。而后期干旱胁迫较前中期影响程度有所下降,地上和地下部均减少 10% 左右(表 1)。

表 1 不同时期干旱胁迫甘薯地上和地下部干重(g/plant, DW)

Table 1 Shoot and root biomass of sweet potato exposure to drought stress in different days since transplanted

部位 Part	前期 Early stage		中期 Middle stage		后期 Later stage	
	正常 CK	干旱 Drought	正常 CK	干旱 Drought	正常 CK	干旱 Drought
地上部 Shoot	12.7 a	6.7 b	301.9 a	186.0 b	233.5 a	212.4 a
地下部 Root	8.2 a	5.3 b	130.1 a	89.6 b	295.7 a	265.0 a

注(Note): Early, middle and late stage mean drought stress at the 15–30, 55–70 and 95–110 days since transplanted; 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Different small letters mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 1 比较了各处理甘薯的最终产量差异。由该图可知,前中后三个时期的干旱胁迫均影响甘薯产量。与正常供水相比,前期和中期产量分别减少 23.3% 和 29.7%,差异显著($P < 0.05$)。而后期干旱胁迫后,产量有下降趋势,但差异未达显著性水平。

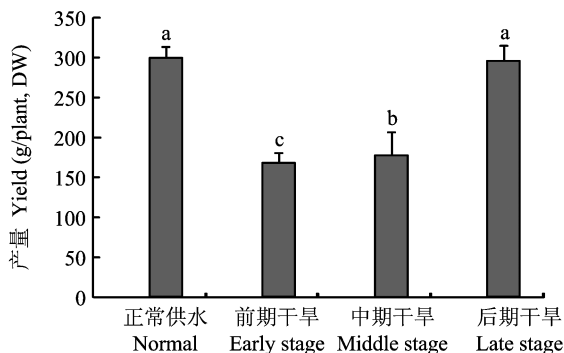


图 1 干旱胁迫对甘薯收获期产量的影响

Fig.1 The effect of drought stress on yield of sweet potato at harvest

[注(Note): Early, middle and late stage mean drought stress at the 15–30, 55–70 and 95–110 days since transplanted; 柱上不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Different small letters above the bars are significant difference among treatments at 0.05 level]

2.2 不同时期干旱胁迫对甘薯根系发育的影响

干旱胁迫严重影响了甘薯各个时期的根系发育,显著降低了根系的总长、总表面积和总体积。其中前期干旱胁迫后对根系发育的影响最显著,与对照相比,总根长减少了 49.5%,总表面积减少了

55.7%,总体积减少了 43.2%;其次是中期干旱,总根长减少了 27.5%,总表面积减少了 27.0%,总体积减少了 28.9%;后期干旱对根系生长的影响也达显著性水平,总根长减少了 16.2%,总表面积减少了 10.6%,总体积减少 15.1%(表 2)。

根据宁运旺等^[8]的研究可将根系直径 $d \leq 1.5$ mm 的认定为毛细根(以下简称细根),具有吸收功能,将根系直径 $d > 1.5$ mm 的认定为已发生变态增粗的分化根(以下简称粗根),有发育成块根的潜力。由表 2 可知,任何时期的干旱胁迫都显著减少了细根的总长度,且前期和中期干旱胁迫也使粗根显著减少。

由双因素分析可以看出,不同时期和干旱胁迫均显著影响了根系生长,且交互效应明显。其中,细根的长度与水分和时期呈极显著相关关系($P < 0.01$)。

2.3 不同时期干旱胁迫对甘薯 PS II 活性的影响

Fv/Fm 和 PI(ABS) 是反映干旱胁迫下甘薯 PS II 活性变化的重要参数。由图 2 可知,前期和中期干旱胁迫后叶片 PS II 的动力学曲线形状发生显著变化,最大吸收值 Fm 明显降低,且前期显著低于中期,表明干旱胁迫使 PS II 反应中心遭到破坏,导致光合潜力下降;前期和中期的干旱胁迫均显著降低甘薯叶片的 Fv/Fm 和 PI(ABS),表明前期中期干旱胁迫显著降低了 PS II 活性,且这种趋势在前期表现得更为突出。这说明干旱胁迫使甘薯叶片的光合能力下降,对光能的利用率降低,且在前期表现得最为明显(图 2)。

表 2 不同时期与干旱胁迫对根系发育的双因素分析

Table 2 Significance effect of drought stress and time on root growth based on Two-way ANOVA analyses

处理 Treatment		根长 Root length (cm)			表面积 (cm ²) Surface area	体积 (cm ³) Root volume
		总根长 Length	d ≤ 1.5 mm	d > 1.5 mm		
前期 Early stage	CK	1745.4 a	1391.6 a	353.1 a	517.6 a	13.9 a
	干旱 Drought	882.3 b	689.9 b	192.1 b	229.3 b	7.9 b
中期 Middle stage	CK	3504.8 a	2845.5 a	657.8 a	1026.1 a	20.4 a
	干旱 Drought	3220.1 b	2639.5 a	579.2 a	755.4 a	14.5 b
后期 Later stage	CK	3529.7 a	3114.9 a	413.6 a	1083.7 a	17.3 a
	干旱 Drought	2957.6 b	2532.3 b	423.8 a	700.4 a	14.7 a
因素分析 Factor analysis						
干旱胁迫 Drought (D)		**	***	**	**	**
不同时期 Stage (S)		***	***	**	***	**
D × S		*		*	*	*

注 (Note): 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters mean significant difference among treatments at 0.05 level.

* $-P < 0.05$; ** $-P < 0.01$; *** $-P < 0.001$.

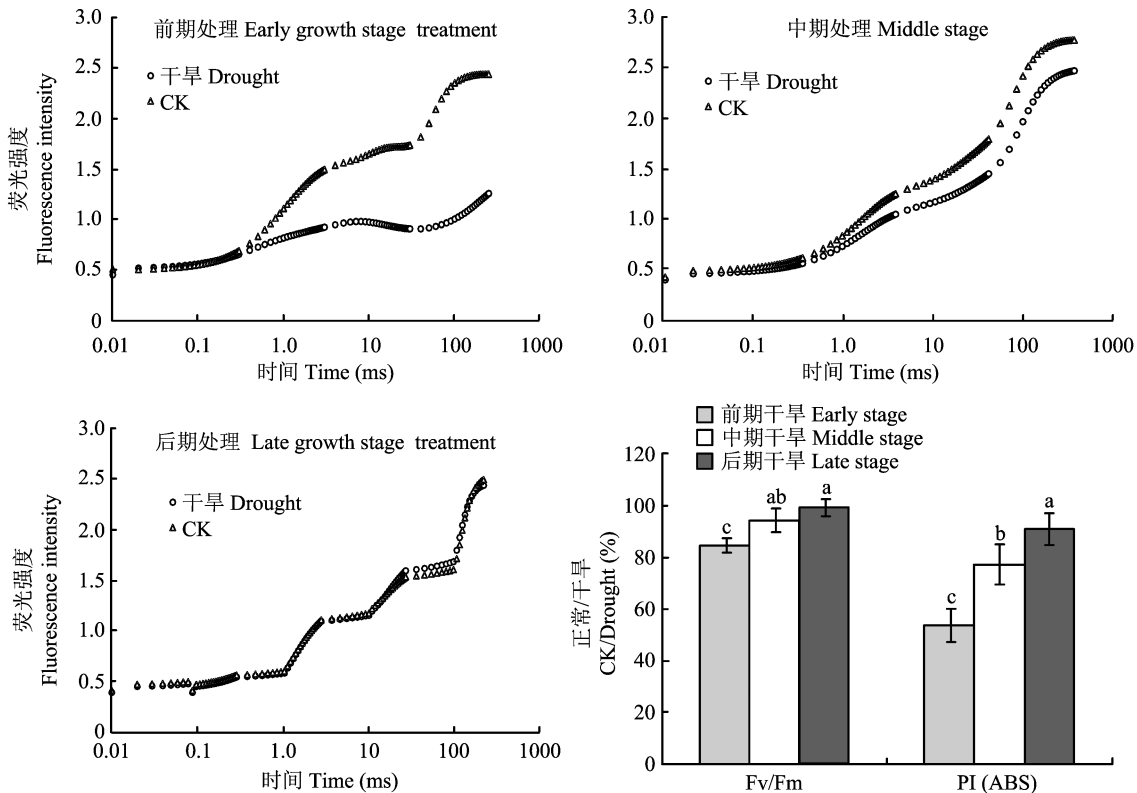


图 2 干旱胁迫对叶绿素荧光诱导动力学曲线及 Fv/Fm、PI_{ABS} 的影响

Fig. 2 The effect of drought stress on chlorophyll fluorescence transient and Fv/Fm、PI_{ABS}

[注 (Note): Early, middle and late stage indicate drought stress at 15–30, 55–70 and 95–110 days since transplanted.]

2.4 干旱胁迫对甘薯 PS II 供体侧、受体侧和反应中心的影响

干旱胁迫后 ϕE_0 有所下降,且前期和后期干旱相比差异达极显著水平 ($P < 0.01$)。说明前期干旱胁迫明显降低了反应中心吸收的光能用于电子传递的量子

产额,PSII的相对电子传递能力下降。Vj 可以反映 QA⁻ 积累量大小,而 dV/dt₀ 反映的是 QA⁻ 被还原的最大速率。二者显著升高,表示干旱胁迫使 QA⁻ 的积累增加,QA 到 QB 电子传递受到抑制(图 3)。

不同时期的干旱胁迫,单位面积上活性反应中

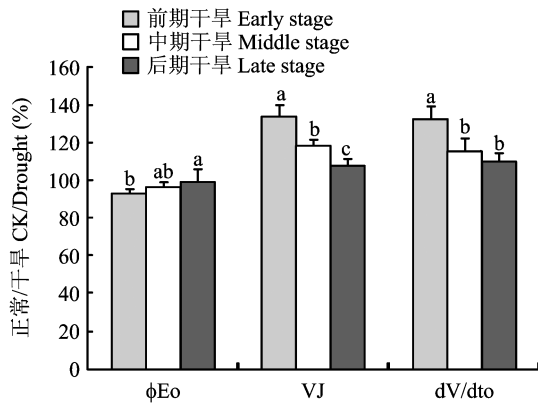


图3 干旱胁迫下叶绿素荧光参数 ϕEo 、VJ、dV/dto 的变化
Fig.3 Variation of chlorophyll fluorescence parameters of ϕEo 、VJ、dV/dto under drought stress

[注(Note): Early, middle and late stage mean droughtly stress at 15-30, 55-70, 95-110 days since transplanted.]

心的数目(RC/Cso)显著减少,单位面积上光能的吸收(ABS/Cso)、光能的捕获(TRo/Cso)也显著降低,且前期干旱最为明显。说明干旱胁迫(尤其是前期)对PS II反应中心造成伤害,使反应中心裂解或失活,同时也使天线色素降解或者结构改变。前期剩余的有活性反应中心激发QA的能量(TRo/RC)显著增加,说明前期干旱使激发能过剩,加重反应中心的负担,进一步对反应中心造成伤害(表3)。

2.5 根系参数与叶绿素荧光参数的相关性分析

细根长与Fv/Fm、PI(ABS)和 ϕEo 呈显著正相关关系、与V_J和dV/dto呈显著负相关关系($P < 0.05$),说明甘薯细根的长度与叶绿素荧光参数关系密切;而粗根长度仅与最为敏感的荧光参数PI(ABS)呈显著正相关关系($P < 0.05$),与其他参数无相关关系。这是由于负责从土壤中吸收水分的主要是细根,而粗根作为分化根,吸水能力有限(表4)。

表3 不同时期干旱胁迫对RC/Cso、ABS/Cso、TRo/Cso、TRo/RC的影响

Table 3 Effect of chlorophyll fluorescence parameters of RC/Cso, ABS/Cso, TRo/Cso, TRo/RC by drought stress in different periods

胁迫时期 Stress period	RC/Cso	ABS/Cso	TRo/Cso	TRo/RC
前期 Early	50.24 ± 1.36 c	92.58 ± 9.26 a	88.46 ± 7.3 b	176.55 ± 11.78 a
中期 Middle	85.34 ± 6.32 b	93.57 ± 3.63 a	93.32 ± 2.2 a	107.27 ± 9.69 b
晚期 Later	96.21 ± 3.76 a	96.34 ± 7.26 a	95.68 ± 6.4 a	100.51 ± 6.58 b

注(Note): 不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$) Different small letters mean significant difference among treatments ($P < 0.05$).

表4 根系参数与叶绿素荧光参数的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between root growth and chlorophyll fluorescence

项目 Item	根长 Root length	Root d ≤ 1.5 mm	Root d > 1.5 mm	Fv/Fm	PI(ABS)	ϕEo	V _J
Root (d ≤ 1.5 mm)	1.00**						
Root (d > 1.5 mm)	0.84*	0.79*					
Fv/Fm	0.83*	0.82*	0.71				
PI(ABS)	0.98**	0.97**	0.85*	0.77*			
ϕEo	0.93**	0.95**	0.63	0.79*	0.92**		
V _J	-0.78*	-0.81*	-0.44	-0.89**	-0.73	-0.88**	
dV/dto	-0.95**	-0.96**	-0.68	-0.89**	-0.92**	-0.98**	0.93**

注(Note): * — $P < 0.05$; ** — $P < 0.01$; *** — $P < 0.001$.

3 讨论

3.1 干旱胁迫对甘薯根系生长和产量的影响

本试验表明,任何时期的干旱胁迫均能使甘薯总根长、根表面积和根体积减少,且均造成一定程度的减产。这是由于根系很大程度上决定了甘薯对土壤中水分和养分的吸收,从而影响了产量的形成^[9]。而

且干旱胁迫还能影响块根的分化,阻碍块根的形成,从而降低产量^[10]。Kim等研究表明,干旱降低了影响块根发育的ADP葡萄糖焦磷酸化酶(AGPase)和查尔酮合成酶(CHS)基因在甘薯块根中的表达^[11]。另外,土壤水分含量的下降导致土壤机械阻力增大进而限制了块根的膨大。而干旱也降低了土壤中有效养分的迁移,导致根系对养分吸收下降,不利于甘薯根

系的生长发育和干物质积累^[12]。

干旱胁迫导致根系生长受到抑制,且胁迫时期对植物根系的长度、表面积、体积等的影响不同^[13-15]。土壤水分含量的下降导致土壤机械阻力增大进而限制了块根的膨大。而干旱也降低了土壤中有效养分的迁移,导致根系对养分吸收下降,不利于甘薯根系的生长发育和干物质积累^[12]。本研究结果表明,前期干旱胁迫对根系的生物量及生长状况影响最为严重,其次是中期,而后期干旱对甘薯生物量影响最小。这主要是因为干旱导致的土壤水分含量下降,严重影响前期根系生长发育;同时土壤有效养分的迁移也显著降低,进一步降低前期的分根结薯^[16]。到了甘薯生长中期,由于其地上部和根系结构发育完成,同时茎蔓上的不定根也能从土壤和空气中吸收水分,与前期相比对干旱胁迫具有一定的抗性,但甘薯仍会通过减少自身生物量来降低自身需水量。后期正值地上部的衰老期,对水分的需求小,且这时的根系基本建成,吸收水分的能力强,所以干旱对根系影响最小^[17]。

3.2 干旱胁迫对甘薯荧光生理特性的影响

植物受到干旱胁迫时,根系会最先感知,通过自身形态和生理的改变来适应干旱逆境,同时产生化学信号促使叶片气孔关闭以减少水分散失^[18]。在叶绿素荧光动力学中,Fm可反映通过PS II的电子传递情况,而Fv/Fm的高低可反映PS II反应中心内的光能转换效率^[19]。植物在干旱胁迫条件下,最大荧光产量(Fm)和PS II最大光化学效率(Fv/Fm)显著下降^[20-21]。本试验结果表明,前期和中期干旱使甘薯Fm和Fv/Fm显著下降,而后期干旱与对照相比差异未达到显著水平。干旱使甘薯发生了光抑制,光合能力下降,光能利用率降低,这与白志英等研究结果一致^[22]。

前期和中期干旱胁迫后PI(ABS)显著下降说明干旱胁迫使整个PS II的结构和功能都受到了严重影响,这与Živčák等研究吻合^[23]。干旱胁迫使Vj和dV/dt显著升高,反映出QA⁻的大量积累,表示QA到QB电子传递受阻,从而说明受体侧受到的抑制比供体侧大。同时,前期的干旱胁迫还使甘薯叶片单位面积上有活性反应中心的数目(RC/Cso)、光能的捕获(TRo/Cso)显著减少,而有活性的反应中心激发QA的能量(TRo/RC)却在增加,说明前期干旱胁迫对PS II反应中心造成伤害,使反应中心裂解或失活,同时也使天线色素降解或者结构改变。为了更好地耗散电子传递链中的能量,迫使剩余的有活性的反应中心效率提高,加重了剩余的有活性反应中心的负担,进一步对反应中心造成伤害,这些都与杨德翠等研究相吻合^[24]。

甘薯的干物质90%来自光合作用,而在干旱条

件下,甘薯叶片为避免缺水对光合器官的损伤,迫使PS II光化学活性下降,叶绿素衰减和光合膜的功能失调。叶片以热耗散形式消耗光捕获蛋白复合物吸收过剩光能^[25-26],从而导致光合能力下降,光能利用率降低,光合产物向薯块转移受阻,导致减产。本试验结果表明,前期干旱对各参数的影响最显著,说明前期干旱对光合产物的累积影响最大。

3.3 根系与叶绿素荧光参数之间的关系

根系作为甘薯水分吸收及物质同化的关键部位,其数量和分布影响着土壤中水分和养分的分布。而叶片作为甘薯光合作用的场所,受到干旱胁迫后,甘薯叶片PS II受损,导致甘薯光合效率下降、光电子传递受阻。本试验结果表明,不同时期干旱胁迫下根系参数和荧光参数呈显著的相关关系。这是因为甘薯前期叶片对干旱相对敏感,水分供应不足易使光合器官受损,而前期根系发育尚不完全,不能吸收充足的水分,甘薯只能通过降低PS II活性来减轻干旱胁迫的伤害;中期甘薯根系生物量比前期大,能吸收较深层的土壤水分,而薯蔓的不定根也能增加土壤表层的水分吸收,所以对干旱的抵抗力比前期强,干旱对PS II的影响较小;后期正值甘薯叶片的衰老期,对水分的需求下降,且PS II活性本来就弱,故对干旱的响应不显著。

4 结论

- 1) 三个时期干旱胁迫均降低了甘薯地上部和地下部生物量,其影响规律为前期>中期>后期。
- 2) 干旱胁迫阻碍毛细根生长从而减少甘薯对养分的吸收,前期和中期干旱胁迫阻碍显著,后期相对较小。
- 3) 前、中期干旱胁迫均对甘薯光合器官造成了破坏,显著降低光合能力,且叶绿素荧光动力学曲线发生明显变化,而后期未达显著性水平。
- 4) 甘薯前期遇旱应及时灌溉,才能减少经济损失,实现经济效益最大化。

参考文献:

- [1] 赵长星,程曦,王月福,等.不同生育时期干旱胁迫对花生生长发育和复水后补偿效应的影响[J].中国油料作物学报,2012,34(6):627-632.
Zhao C X, Cheng X, Wang Y F, et al. Effects of drought stress on peanut growth during different growth stages and compensatory effect after water recovery [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2012, 34(6): 627-632.
- [2] 张明生,谈锋,张启堂.水分胁迫下甘薯的生理变化与抗旱性的关系[J].杂粮作物,1999,19(2):35-39.
Zhang M S, Tan F, Zhang Q T. Relationship between physiological changes and drought resistance of sweet potato under water stress [J]. Rain Fed Crops, 1999, 19(2): 35-39.
- [3] 刘志玲,程丹.植物抗旱生理研究进展与育种[J].中国农学通报,2011,27(24):249-252.

- Liu Z L, Cheng D. Plant drought-resistant physiology research progress and breeding[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27 (24): 249-252.
- [4] Belehu T, Hammes P S. Effect of temperature, soil moisture content and type of cutting on establishment of sweet potato cuttings[J]. Plant and Soil, 2004, 21(2): 85-89.
- [5] Villordon A, LaBonte D, Solis J, et al. Characterization of lateral root development at the onset of storage root initiation in 'Beauregard' sweet potato adventitious roots [J]. Hortscience, 2012, 47(7): 961-968.
- [6] 吴巧玉, 何天久. 干旱胁迫对甘薯生理特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2013, 41 (6): 52-54.
- Wu Q Y, He T J. Effects of drought stress on physiological characteristics of sweet potato[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2013, 41(6): 52-54.
- [7] 成雨洁, 伍小丘. 干旱胁迫下转基因甘薯块根膨大期水分利用效率和生理代谢特征[J]. 西北植物学报, 2012, 32 (11): 2255-2263.
- Cheng Y J, Wu X Q. Water use efficiency and physiological metabolism of vegetatively propagated transgenic sweet potato under drought stress [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2012, 32 (11): 2255-2263.
- [8] 宁运旺, 马洪波, 张辉, 等. 氮、磷、钾对甘薯生长前期根系形态和植株内源激素含量的影响[J]. 江苏农业学报, 2013, 29 (6): 1326-1332.
- Ning Y W, Ma H B, Zhang H, et al. Effect of nitrogen, phosphorus and potassium on root morphology and endogenous hormone contents of sweet potato at early growing stages [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2013, 29 (6): 1326-1332.
- [9] 袁振, 汪宝卿, 解备涛, 等. 甘薯根系发育对干旱胁迫的响应及化控对其缓解作用研究综述[J]. 山东农业科学, 2014, 46 (9): 138-141.
- Yuan Z, Wang B Q, Xie B T, et al. Response of sweetpotato roots development to drought stress and mitigative effect of chemical regulation[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2014, 46 (9): 138-141.
- [10] Kato Y, Okami M. Root growth dynamics and stomatal behaviour of rice (*Oryza sativa* L.) grown under aerobic and flooded conditions[J]. Field Crops Research, 2010, 117(1): 9-17.
- [11] Kim S H, Mizuno K, Fujimura T. Regulated expression of ADP glucose pyrophosphorylase and chalcone synthase during root development in sweetpotato[J]. Plant Growth Regulation, 2002, 38: 173-179.
- [12] Chowdhury S R, Singh R, Kundu D K, et al. Growth, dry matter and yield of sweetpotato (*Ipomoea batatas* L.) as influence by soil mechanical impedance and mineral nutrition under different irrigation regimes[J]. Advances in Horticultural Science, 2000, 16(1): 25-29.
- [13] 李文绕, 张岁岐, 丁圣彦, 等. 干旱胁迫下紫花苜蓿根系形态变化及与水分利用的关系[J]. 生态学报, 2010, 30 (19): 5140-5150.
- Li W R, Zhang S Q, Ding S Y, et al. Root morphological variation and water use in alfalfa under drought stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(19): 5140-5150.
- [14] 韩希英, 宋凤斌. 干旱胁迫对玉米根系生长及根际养分的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(3): 170-172.
- Han X Y, Song F B. Effect of drought stress on root growth and rhizosphere nutrients of maize [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(3): 170-172.
- [15] 尚小颖, 刘化冰, 张小全, 等. 干旱胁迫对不同烤烟品种根系生长和生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2010, 30 (2): 357-361.
- Shang X Y, Liu H B, Zhang X Q, et al. Growth and physiological characteristics of roots in different flue-cured tobacco varieties under drought stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2010, 30(2): 357-361.
- [16] 汪云, 陈胜勇, 李观康, 等. 甘薯抗旱性研究进展[J]. 广东农业科学, 2011, 11: 35-38.
- Wang Y, Chen S Y, Li G K, et al. Advances in research on drought resistance in sweetpotato [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011, 11: 35-38.
- [17] 马富举, 李丹丹, 蔡剑, 等. 干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 724-730.
- Ma F J, Li D D, Cai J, et al. Responses of wheat seedling root growth and leaf photosynthesis to drought stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(3): 724-730.
- [18] Jia W S, Zhang J H. Stomatal movements and long-distance signaling in plants[J]. Plant Signaling and Behavior, 2008, 3: 772-777.
- [19] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, 16(4): 444-448.
- Zhang S R. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance [J]. Chinese Bulletin of Botany, 1999, 16(4): 444-448.
- [20] 冀天会, 张灿军, 杨子光, 等. 冬小麦叶绿素荧光参数与品种抗旱性的关系[J]. 麦类作物学报, 2005, 25(4): 64-66.
- Ji T H, Zhang C J, Yang Z G, et al. Study on the relationship of chlorophyll fluorescence characters and drought resistance of winter wheat varieties under drought stress [J]. Journal of Triticeae Crops, 2005, 25(4): 64-66.
- [21] 郭春芳, 孙云, 唐玉海, 等. 水分胁迫对茶叶叶片叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(3): 560-564.
- Guo C F, Sun Y, Tang Y H, et al. Effect of water stress on chlorophyll fluorescence in leaves of tea plant [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(3): 560-564.
- [22] 白志英, 李存东, 赵金锋, 等. 干旱胁迫对小麦代换系叶绿素荧光参数的影响及染色体效应初步分析[J]. 中国农业科学, 2011, 44(1): 47-57.
- Bai Z Y, Li C D, Zhao J F, et al. Effect and preliminary analysis of chromosomal control on the chlorophyll fluorescence parameters of wheat substitution lines between synthetic hexaploid wheat and chinese spring under drought stress [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(1): 47-57.
- [23] Živčák M, Brestič M, Olšovská K, et al. Performance index as a sensitive indicator of water stress in *Triticum aestivum* L [J]. Plant Soil Environment, 2008, 54(4): 133-139.
- [24] 杨德翠, 刘超, 盖树鹏, 等. 牡丹柱枝孢叶斑病 (*Cylindrocladium canadense*) 对叶片光合系统功能的影响 [J]. 园艺学报, 2013, 40(3): 515-522.
- Yang D C, Liu C, Gai S P, et al. Effect of infection by *Cylindrocladium canadense* on behaviors of photosystems in tree peony leaves[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2013, 40(3): 515-522.
- [25] Ladjal M, Epron D, Ducrey M. Effects of drought preconditioning on thermo tolerance of photosystem II and susceptibility of photosynthesis to heat stress in cedar seedlings [J]. Tree Physiology, 2000, 20: 1235-1241.
- [26] Bader M R, Ruuska S, Nakano H. Electron flow to oxygen in higher plants and algae: rates and control of direct photoreduction (Mehler reaction) and rubisco oxygenase [J]. Biological Sciences, 2000, 1402: 1433-1445.