

# 水分逆境下糯玉米光合荧光系统的生理调节

于惠琳, 吴玉群, 胡宝忱, 尤丹, 王延波\*

(辽宁省农业科学院玉米研究所, 沈阳 110161)

**摘要:**以糯玉米品种为材料, 采用盆栽方式研究了土壤水分亏缺和过量条件下幼苗形态、叶片光合和荧光参数特性的变化。结果表明, 水分逆境下, 叶片叶绿素 a 下降明显、气孔导度(Gs)下降、净光合速率(Pn)显著降低, 伴随光饱和点(LSP)下降以维持机体代谢平衡; 水分胁迫下, 初始荧光(Fo)和可变荧光(Fv)增加, 而电子传递速率(ETR)、光化学猝灭(qP)下降, 以此提高荧光代谢系统的稳定性。

**关键词:**水分胁迫; 糯玉米; 光合; 荧光

中图分类号: S513

文献标识码: A

文章编号: 2096-5877(2020)01-0008-05

## Physiological Regulation of Photosynthetic Fluorescence System in Waxy Maize under Water Stress

YU Huilin, WU Yuqun, HU Baochen, YOU Dan, WANG Yanbo\*

(Maize Research Institute, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** The changes of seedling morphology, leaf photosynthesis and fluorescence parameters under soil water deficit and excess conditions were studied by potted plants. The results showed that under water stress, the leaf chlorophyll decreased significantly, the stomatal conductance (Gs) decreased, and the net photosynthetic rate (Pn) decreased significantly, accompanied by the decrease of light saturation point (LSP) to maintain the body's metabolic balance. The initial fluorescence (Fo) and variable fluorescence (Fv) increased under water stress, while the electron transfer rate (ETR) and photochemical quenching (qP) decreased to improve the stability of the fluorescent metabolic system.

**Key words:** Water stress; Waxy corn; Photosynthetic; Fluorescence

随着全球气候的变化, 淡水资源的短缺和水分分配不平衡的程度加深, 水分胁迫已成为全球农业生产的主要限制因素<sup>[1]</sup>。土壤水分胁迫多由土壤水分过量或水分亏缺造成, 对于种植在中国北方的糯玉米, 春季初期水资源有限, 往往出现干旱胁迫<sup>[2]</sup>; 而在潮湿的夏季, 由于过多的降雨、风暴或洪水, 糯玉米可能会遭受间歇性或长期的水分过量胁迫。

据报道, 90% ~ 95% 的作物物质积累都来自光合作用, 而水分胁迫条件下作物的物质积累和生理特性会受到很大影响<sup>[3]</sup>。大量研究表明, 水分逆境下植物根系的解剖学和形态学特征将发生

适应性变化, 如叶片生长速率降低、叶面积和株高下降等<sup>[4]</sup>。对冬小麦在水分逆境下生理活动的研究表明, 土壤水分过量可造成气孔传导受阻、蒸腾速率和光合速率下降<sup>[5]</sup>。也有学者研究并指出水分胁迫可导致植物叶片气孔关闭、细胞间CO<sub>2</sub>浓度降低、叶肉中有效CO<sub>2</sub>浓度降低、碳同化率降低、光合速率降低, 最终导致生产能力降低<sup>[6]</sup>。另外, 有研究发现水分胁迫下作物的光合荧光系统会对水分逆境发生适应性变化<sup>[7]</sup>。

具有抗旱、耐涝等多重抗性的糯玉米在我国农业产生结构调配中发挥着重要作用。大量研究表明, 糯玉米对水分胁迫具有良好的适应性, 可广泛种植在干旱和半干旱地区<sup>[8]</sup>。同时, 糯玉米也可在一些水分分布不均匀的低洼地块种植。然而, 糯玉米即便具有很好的水分逆境适应能力, 其在幼苗期间对水分胁迫的强度和时间的耐受度有限。在一定的水分逆境范围内, 糯玉米的形态、光合和荧光生理学等方面也将产生相应变化

收稿日期: 2019-05-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300700、2017YFD0300701-A01A)

作者简介: 于惠琳(1983-), 女, 助理研究员, 博士, 主要从事玉米育种与栽培研究工作。

通讯作者: 王延波, 男, 博士, 研究员, E-mail: lnwangyanbo@163.com

以提高对水分胁迫的抵御能力。

本研究对水分亏缺和过量胁迫下糯玉米根系、地上部形态变化、光合参数和荧光特征进行了测定与研究。旨在探究糯玉米在不同水分逆境下的光合、叶绿素荧光等生理途径变化特点,采用育种和栽培手段调控,增强其对水分逆境的适应能力,以促进水分逆境区糯玉米的生产。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

以糯玉米万糯2000为试验材料,于2018年在辽宁省农科院(沈阳)人工气候室进行。采用盆栽方式,盆直径25 cm,深30 cm,每个盆都装满7.5 kg过筛的干燥壤土,土壤含有0.103%总氮、0.142%总磷、2.08%总钾、81.3 mg·kg<sup>-1</sup>有效氮、15.2 mg·kg<sup>-1</sup>有效磷、155.2 mg·kg<sup>-1</sup>有效钾、pH6.8。

设置三个水分浓度处理,分别为:(1)过量水分,田间持水量(土壤田间持水量为30%)的150%,在播种后20 d和40 d进行处理,每次胁迫10 d;(2)正常土壤供水(对照),田间持水量的100%;(3)干旱胁迫,田间持水量的50%。通过称重法对水分进行控制,其中干旱胁迫处理采用的处理方法为:播种后20 d开始停止水分供应,直至土壤水分降到田间持水量的50%(因为盆较小,停止供水后48 h左右土壤水分即可降到田间持水量的50%),之后每天18:00补充水分,维持这一胁迫水平胁迫10 d,之后恢复正常供水,并在播种后40 d继续重复这一过程。试验设三次重复,分别在播种后20 d和40 d水分胁迫后测定农艺性状、光合参数和叶绿素荧光参数。

### 1.2 调查项目和方 法

#### 1.2.1 农艺性状

在播种后20 d和40 d每处理取样5株用直尺测定株高,使用电子游标卡尺测量茎粗。使用叶面积扫描仪测量绿叶面积,每个处理测量5个植株,取平均值。另外,每个土壤水分处理取5个植株分离器官,将植株分割为三部分,分别为:茎、根和叶片叶鞘,采用电子天平称量各处理不同器官的鲜重,用烘箱在105℃下杀青30 min,然后在60℃下干燥直至恒重,称量根、茎和叶片叶鞘的干重,并根据干重和鲜重计算相对含水量(RWC)。

$$RWC(\%) = \frac{\text{干重}}{\text{鲜重}} \times 100\%$$

#### 1.2.2 光合参数

采用张宪政<sup>[9]</sup>法测定叶绿素含量,使用LI-6400便携式光合分析仪(LI-COR, Lincoln, NE, USA)测量

叶片的光合作用光响应曲线。在晴天9:00~11:00测量。每种水分胁迫处理选择5株生长一致的糯玉米植株,测定最后一叶完全展开叶片的净光合速率(Pn)、细胞间CO<sub>2</sub>浓度(Ci)、气孔导度(Gs)和蒸腾速率(Tr)。测量时,光合仪测定参数为:内置红蓝光源1 000 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,仪器叶室温度25℃,空气相对湿度42%,叶室CO<sub>2</sub>流量400 μmol·s<sup>-1</sup>。

测量光响应曲线的过程中,采用内置红光和蓝光光源(LI-6400-02BLED),光强度由强到弱设置,光合有效辐射(PPFD)依次设置为1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、100、80、60、40、20、10、0 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>。以光合有效辐射(PPFD)为横轴,以净光合速率(Pn)为纵轴绘制光合作用光响应曲线(Pn-PPFD曲线)。将Pn-PPFD曲线拟合DPS并计算最大光合速率(Pmax)、表观量子效率(α)、暗呼吸率(Rd)、光饱和点(LSP)等相关参数,计算水分利用效率(WUE)和光能利用效率(LUE)。

#### 1.2.3 荧光特性

用德国WAIZ生产的便携式叶绿素荧光仪(PAM-2500)测定叶片的叶绿素荧光动力学参数。获得光化学猝灭(qP)、非光化学猝灭(NPQ)和电子传递速率(ETR)等荧光参数。

### 1.3 试验统计分析

所有测量均进行三次重复,使用DPS 7.05对数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 农艺参数的变化

糯玉米植株高度和茎粗在水分亏缺下低于对照,而在水分过量胁迫下略高于对照(表1)。根、叶、茎相对含水量(RWC)不同水分处理下的显著性表现为根>叶>茎。同时,不同水分处理下次生根差异明显,40 DT在水分过量下根系产生了9.3个次生根,在正常水分条件下生长了4.4个次生根(CK),而在干旱胁迫下生长了1.5个次生根。表明在水分过量条件下,糯玉米可通过增加次生根数量维持代谢平衡;而干旱胁迫主要是通过叶片卷曲收缩,减少水分散失来调节水分代谢。

### 2.2 叶绿素含量的变化

水分胁迫处理后,叶绿素a+b、叶绿素a和叶绿素b与对照相比均有所下降,叶绿素a的下降幅度明显高于叶绿素b(表2)。播种后20 DT的结果显示水分过量处理、正常供水(对照)、干旱胁迫下叶绿素b差异不显著,而叶绿素a+b和叶绿素

a均达差异极显著水平。同时不同测定时间(DT)也表现出叶绿素b受影响较小,而叶绿素a+b、叶绿素a在水分胁迫下下降趋势明显。此外,水分亏缺处理下叶绿素a+b、叶绿素a和叶绿素b显示出的下降幅度均大于水分过量处理,说明水分胁迫

迫,尤其是干旱胁迫可能会削弱叶绿素的生物合成能力或造成其分解失调。因此,水分胁迫处理后糯玉米叶片降低叶绿素含量是一种避免过量光能吸收、以防光合机构造成更大损害的表现。

表1 播种后第20天和第40天水分胁迫条件下农艺参数的变化

测定 时间	土壤水分处理	茎粗(mm)	株高(cm)	次生根数量(个)	相对含水量RWC (%)		
					根	茎	叶
20 DT	正常供水(CK)	4.9	11.7	3.6	78.9	73.6	83.5
	水分过量	5.1	12.0	6.4	75.2	69.1	79.0
	水分亏缺	4.7	11.4	0	63.4	57.8	68.7
40 DT	正常供水(CK)	8.4	24.1	4.4	75.3	69.3	80.4
	水分过量	8.6	24.3	9.3	63.7	63.6	71.3
	水分亏缺	7.3	23.2	1.5	45.4	61.1	59.8
	WT F 值	23.3*	17.5*	210.5**	94.7**	8.7ns	54.2*
	DT F 值	59.7**	85.3**	58.91**	24.4*	11.3ns	42.5*
	WT×DT F 值	18.1*	21.9*	101.3**	41.2**	10.9ns	7.4ns

注:\*\*表示在0.01水平差异显著,\*表示在0.05水平差异显著,ns表示差异不显著。DT-处理后天数;WT-水分处理,下同

表2 播种后第20天和第40天处理水分胁迫条件下叶片叶绿素的变化

土壤水分处理	叶绿素 a+b		叶绿素 a		叶绿素 b	
	20 DT	40 DT	20 DT	40 DT	20 DT	40 DT
正常供水(CK)	1.47	1.54	0.89	0.92	0.58	0.62
水分过量	1.33	1.48	0.79	0.81	0.54	0.67
水分亏缺	1.25	1.32	0.71	0.73	0.54	0.59
WT F 值	88.25**	75.37**	58.24**	73.58**	2.5ns	6.4ns
DT F 值	45.3**		53.24**		5.2ns	
WT×DT F 值	7.3ns	17.24*	15.36*	23.19*	7.3ns	8.1ns

### 2.3 叶片光合作用和气体交换的调节

经过水分过量和水分亏缺处理后,Pn与对照相比有所下降,特别是干旱胁迫下降显著(表3)。Gs、Tr、WUE在不同水处理之间的变化趋势与Pn基本一致,而Ci的变化与Pn呈显著负相

关。此外,不同测量时间(DT)和WT×DT的相互作用效果有所不同。表明水分胁迫对糯玉米的光合作用造成了不利影响,但通过糯玉米自身Gs、Tr和WUE等光合参数的调节可增强其对水分胁迫的适应性。

表3 播种后第20天和40天水分胁迫条件下叶片中Pn、Gs、Ci和WUE的变化

测定时期 (天)	土壤水分处理	净光合速率	气孔导度	胞间CO <sub>2</sub> 浓度	蒸腾速率	水分利用效率
		( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$\mu\text{mol}(\text{CO}_2) \cdot \text{mol}^{-1}$			
20 DT	正常供水(CK)	23.18	0.35	264.12	3.58	6.47
	水分过量	20.21	0.28	294.52	3.32	6.09
	水分亏缺	18.25	0.25	350.29	3.07	5.94
40 DT	正常供水(CK)	25.48	0.38	228.54	4.25	6.00
	水分过量	22.31	0.31	254.63	3.84	5.81
	水分亏缺	16.85	0.24	213.34**	2.93	5.75

续表 3

测定时期 (天)	土壤水分处理	净光合速率 ( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	气孔导度 ( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	胞间 $\text{CO}_2$ 浓度 ( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	蒸腾速率 ( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )
WT F 值	125.64**	102.34**	54.32**	103.68**	8.13ns
DT F 值	44.21**	52.31**	11.54ns	18.45*	10.5ns
WT×DT F 值	15.68*	7.2ns	25.31*	8.6ns	6.3ns

## 2.4 叶片光合特征参数的变化

水分胁迫下,糯玉米的光饱和点(LSP)下降,特别是干旱胁迫下下降效果更为明显(表4)。不同测量时间(DT)和WT×DT之间的相互作用也存

在显著差异。此外,最大光合速率( $P_{\text{max}}$ )、表观量子效率( $\alpha$ )和表观暗呼吸速率( $R_d$ )的结果显示,水分胁迫(尤其是干旱胁迫)可导致LSP下降,减少光合物质的产生。

表 4 播种后第 20 天和第 40 天水分胁迫条件下叶片中 LSP、 $P_{\text{max}}$ 、 $\alpha$ 、 $R_d$  和  $R^2$  的变化

测定时期 (天)	土壤水分处理	光饱和点 ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	最大净光合速率 ( $\mu\text{molCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	表观量子效率 ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	表观暗呼吸速率 ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )	拟合系 数速率
20 DT	正常供水(CK)	2 547.32	25.31	0.049	2.14	0.95
	水分过量	2 142.67	19.85	0.045	1.89	0.99
	干旱胁迫	1 854.23	18.24	0.042	1.74	0.94
40 DT	正常供水(CK)	2 541.57	28.54	0.048	2.46	0.95
	水分过量	2 218.36	25.37	0.045	2.31	0.98
	干旱胁迫	1 954.28	16.58	0.039	2.08	0.92
WT F 值	5.2ns	157.6**	22.9*	42.4*	8.2ns	
DT F 值	72.3**	78.2**	7.8ns	11.3*	5.7ns	
WT×DT F 值	5.8*ns	19.7*	14.3*	5.5ns	2.5ns	

## 2.5 叶绿素荧光暗反应的变化

水分逆境下初始荧光( $F_0$ )和可变荧光( $F_v$ )显著增加,但最大荧光( $F_m$ )没有显著变化(20 DT),在40 DT这些荧光参数均呈现上升趋势(表5)。表明水分胁迫处理显著提高了光化学活性,破坏

了反应中心;最大光化学量子产率( $F_v/F_m$ )的降低进一步说明了这一点。此外,40 DT结果表明,水分胁迫后 $F_v/F_m$ 下降,表明PS II反应中心受长期水分胁迫损伤,原始光化学活性受到抑制,PS II活性中心受损。

表 5 播种后第 25 天和第 50 天水分胁迫条件下叶绿素荧光的变化

测定时期(天)	土壤水分处理	$F_0$	$F_m$	$F_v$	$F_v/F_0$	$F_v/F_m$
20 DT	正常供水(CK)	0.19	1.12	0.93	4.89	0.83
	水分过量	0.22	1.08	0.86	3.91	0.80
	干旱胁迫	0.25	1.13	0.88	3.52	0.78
40 DT	正常供水(CK)	0.20	1.14	0.94	4.70	0.82
	水分过量	0.24	1.23	0.99	4.13	0.80
	干旱胁迫	0.28	1.24	0.96	3.43	0.77
WT F 值	18.4*	3.5ns	15.3*	114.5**	11.5*	
DT F 值	8.7*	0.9ns	4.7ns	12.3*	5.6ns	
WT×DT F 值	2.3ns	4.8ns	5.1ns	12.7*	12.3*	

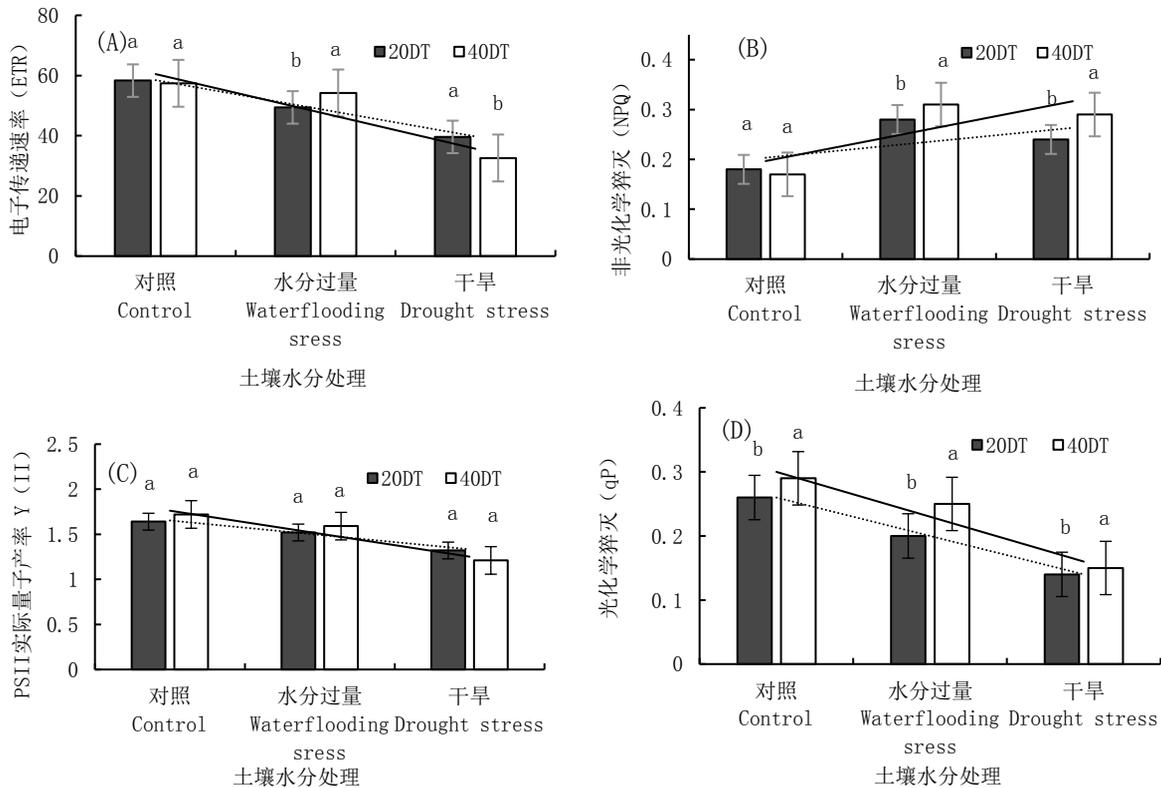
## 2.6 叶绿素荧光系统光响应的调节

经过水分胁迫处理后,电子传递速率(ETR)、光化学猝灭(qP)、PS II实际量子产率 $Y(II)$ 降低,

而非光化学猝灭(NPQ)有所增加(图1)。qP的降低表明PS II反应中心开口部分的比例减少,PS II的潜在活性受到抑制,NPQ的增加表明PS II的潜

在散热能力增强,水分逆境下光能过剩是通过非光化学猝灭消耗,避免或减轻由PS II过度吸收光能引起的对光合机制的破坏。另外,本试验中水分胁迫处理后,ETR和Y(II)均低于对照,表明水

分胁迫处理降低了糯玉米幼苗的实际光合能力,降低了光化学反应的比例和光合电子传递速率,特别是干旱处理的表现更为明显。所以糯玉米可通过荧光参数来增强对水分逆境的抵御能力。



注:多重比较为同一水分处理下两个测定时间比较

图1 播种后第20天和第40天水分胁迫条件下叶片荧光参数的变化

### 3 结论与讨论

以往的研究表明,水分胁迫可以显著抑制作物的营养生长,包括作物的株高、叶面积、干物质积累等参数,下降程度与胁迫程度有关<sup>[10]</sup>。本研究表明,当糯玉米受到水分胁迫时,株高和茎粗在水分亏缺条件下低于对照,但在水分过量胁迫下则略有提高。本研究还发现,在水分过量胁迫情况下,次生根增多,但当水分亏缺时次生根数量很少。这些结果与先前在水胁迫条件下对油菜、水稻和向日葵的研究结果基本一致<sup>[11]</sup>。

众所周知,叶绿素是植物叶片中主要的光合色素,叶绿素含量是评价植物生理代谢的重要指标,也是反映叶片光合能力的重要指标之一<sup>[12]</sup>。本研究表明,水分胁迫处理后叶片叶绿素a+b、叶绿素a和叶绿素b含量下降,但叶绿素a含量下降幅度显著高于叶绿素b。该结果与之前的报告基本一致,即水分胁迫下作物叶绿素含量的降低主要是由于叶绿素a的下降造成的<sup>[13]</sup>。该研究还指

出,水分胁迫处理后叶片可通过降低叶绿素含量,避免过量的光能吸收对光合机构造成损害。该结论与本研究的结果相一致。

本研究发现水分胁迫下,特别是干旱胁迫下Pn降低,不同水处理(WT)之间的气孔导度(Gs)、蒸腾速率(Tr)、水分利用效率(WUE)趋势与Pn一致。这项研究结果与“水分胁迫下叶片气孔关闭是影响光合作用的最重要因素之一”的结果相一致<sup>[14]</sup>。本研究还表明,在干旱或水分过量胁迫下,糯玉米的光饱和点(LSP)下降,可通过光合系统的调节来增强对水分逆境的抵御能力。

叶绿素荧光动力学在检测胁迫对光合作用的影响方面具有独特的作用,反映了光合系统的内在特性<sup>[15]</sup>。本研究结果表明,水分胁迫下,初始荧光(Fo)和可变荧光(Fv)的荧光参数显著增加,最大荧光(Fm)没有显著变化。在该研究中,Fv/Fm在水分胁迫后降低,表明PS II反应中心受到长期水分胁迫的破坏,原始光化学活性受到抑制,PS II活性中心受损。本研究还发现(下转第103页)

- [ 1 ] 熊忙利,黄汉军,赵战峰.对咸阳市畜禽粪便污染环境问题的初探[J].家禽生态学报,2008,29(6):144-146.
- [ 2 ] 敖子强,卜妹红,彭桂群,等.规模养猪废弃物资源化关键技术研究进展[J].家禽生态学报,2018,39(3):81-83.
- [ 3 ] 李刚,杨克,许方程,等.微生物菌剂处理规模化养猪场粪污水的研究进展[J].浙江农业科学,2018,59(11):2115-2121.
- [ 4 ] 郭鹏,郝向举,魏文侠,等.芽孢杆菌在畜禽废弃物污染治理中的研究进展[J].饲料研究,2016(23):25-28,33.
- [ 5 ] 杨小龙.复合菌剂的研制及其对水产养殖污水的净化作用[D].南昌:南昌大学,2012.
- [ 6 ] 高星爱,李莉,赵新颖,等.纤维素分解微生物复合菌剂降解固态物料特性研究[J].东北农业大学学报,2014,45(12):71-76.
- [ 7 ] 杨国俊,黄日波.产淀粉酶和蛋白酶中度嗜热细菌的分离、筛选及培养[J].广西农业大学学报,1995,14(3):243-247.
- [ 8 ] 麻琼丽.产脂肪酶菌株的筛选、鉴定及产酶条件优化[D].海口:海南大学,2010.
- [ 9 ] 高星爱,李忠和王鑫,等.4株降解低温污水芽孢杆菌的分离、鉴定及其降解效率研究[J].安徽农业科学,2016,44(17):83-85.
- [ 10 ] 欧阳华勇,李冰峰,权静,等.耐有机溶剂蛋白酶生产菌的筛选[J].安徽农业科学,2009,37(28):13606-13609.
- [ 11 ] 张吉鹏.乳酸菌及其在养猪生产中的应用[J].猪业科学,2018,35(11):86-90.
- [ 12 ] 张盼,刘婉瑜,李晓秀,等.高效纤维素优势分解菌的筛选和鉴定[J].中国土壤与肥料,2017(2):149-156.
- [ 13 ] 金荣德,范作伟,高星爱,等.高效溶磷微生物菌株的筛选、鉴定及其对磷素效率的影响[J].吉林农业科学,2011,36(1):13-16.
- [ 14 ] 蒋宝军,王飞虎,李忠和,等.微生物絮凝剂的特征及研究现状[J].东北农业科学,2019,44(5):107-110.
- [ 15 ] 凤鹏,赵新宇,郝登宝,等.玉米秸秆分解微生物复合菌剂群落组成及提高沼气产量的研究[J].吉林农业科学,2015,40(1):109-112.
- [ 16 ] 李丹,张波,李玉.高产漆酶菌株的筛选及其对秸秆降解初探[J].吉林农业科学,2013,38(6):90-94.
- [ 17 ] 许超,曲勤凤,顾文佳,等.新型可降解高效氯氰菊酯微生物菌株的筛选、鉴定及条件优化[J].东北农业科学,2016,41(2):70-73.

(责任编辑:王昱)

(上接第12页)水分胁迫处理后,电子传递速率(ETR)和PS II实际量子产率 $Y(II)$ 降低,该结果类似于增加的qP可以以光化学利用为代价耗散一些激发能量的研究结论<sup>[7]</sup>。此外,本研究发现光化学猝灭(qP)在水分胁迫下显著下降,该结论与“水分胁迫下水稻和大麦叶片中的实际量子效率( $\Phi_{PS II}$ )、qP和光合电子传递速率(ETR)显著降低”的结论相吻合。

综上所述,本研究初步解释了水分亏缺和水分过量胁迫下糯玉米幼苗通过光合、荧光系统的调节增强抵御水分逆境的初步方式,但具体生理代谢机理尚不明晰,有待深入研究。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 路振广,邱新强,张明智,等.干旱胁迫对夏玉米叶片光合特性及产量的影响[J].节水灌溉,2019(2):34-42.
- [ 2 ] 孙丽娟,赵志宏,贺娟,等.我国鲜食玉米相关标准问题分析及对策[J].作物杂志,2019(2):1-4.
- [ 3 ] 姚斌,徐晨,王俊鹏,等.不同父本血缘玉米杂交种对光、CO<sub>2</sub>响应特性[J/OL].分子植物育种,2019:1-11.
- [ 4 ] 郭艳阳,刘佳,朱亚利,等.玉米叶片光合和抗氧化酶活性对干旱胁迫的响应[J].植物生理学报,2018,54(12):1839-1846.
- [ 5 ] 燕辉,胡笑涛,姚付启.限量灌溉对冬小麦光合与叶绿素荧光的影响[J].农业机械学报,2011,42(11):49-54.
- [ 6 ] 任永福,陈国鹏,蒲甜,等.玉米-大豆带状种植中套作高光效玉米窄行穗位叶光合特性对弱光胁迫的响应[J].作物学报,2019,45(5):728-739.
- [ 7 ] 祁娟霞,刘馨,赵小兵,等.不同灌水量和灌水频率对番茄植株生长、光合与荧光特性的影响[J].节水灌溉,2017(4):50-56.
- [ 8 ] 郑加兴,覃嘉明,覃永媛,等.广西鲜食糯玉米品种在越南的适应性分析[J].种子,2019,38(2):89-92,97.
- [ 9 ] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992:119-120.
- [ 10 ] Downie A, Miyazaki S, Bohnert H. et al. Expression profiling of the response of Arabidopsis thaliana to methanol stimulation[J]. Phytochemistry, 2004, 65(16): 2305-2316.
- [ 11 ] Gao YP, Young L, Bonham-Smith P, et al. Characterization and expression of plasma and tonoplast membrane aquaporins in primed seed of Brassica napus during germination under stress conditions[J]. Plant molecular biology, 1999, 40(4): 635-644.
- [ 12 ] 李建查,孙毅,赵广,等.干热河谷不同土壤水分下甜玉米灌浆期光合作用光响应特征[J].热带作物学报,2018,39(11):2169-2175.
- [ 13 ] Bai J, Xu D H, Kang H M, et al. Photoprotective function of photorespiration in Reaumuria soongorica during different levels of drought stress in natural high irradiance[J]. Photosynthetica, 2008, 46(2): 232-237.
- [ 14 ] 宋贺,蒋延玲,许振柱,等.玉米光合生理参数对全生育期干旱与拔节后干旱过程的响应[J].生态学报,2019(7):1-10.
- [ 15 ] 李冬旺,张永江,刘连涛,等.干旱胁迫对棉花冠层光合、光谱和荧光的影响[J].棉花学报,2018,30(3):242-251.

(责任编辑:王丝语)