

文章编号: 1000-7032(2014)02-0243-08

基于生物延迟发光评价玉米萌发期抗旱性的方法

高 宇¹, 习 岗^{1*}, 刘 锴¹, 杨运经²

(1. 西安理工大学 应用物理系, 陕西 西安 710048; 2. 西北农林科技大学 应用物理系, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 玉米种子萌发期抗旱性评价是节水农业研究中的难点和热点问题之一, 生物延迟发光分析技术的应用有可能解决这一问题。采用生物延迟发光评价方法研究了玉米种子萌发期的抗旱性能力, 探讨了在渗透势 -0.1 MPa 和 -0.3 MPa 的 PEG-6000 溶液中萌发的玉米品种万瑞 168 号和堰单 8 号延迟发光的变化规律。结果表明, 万瑞 168 号和堰单 8 号玉米品种的延迟发光积分强度都随着萌发进程逐渐升高, -0.1 MPa 和 -0.3 MPa 的 PEG-6000 溶液形成的干旱胁迫对两个玉米品种延迟发光积分强度的升高有不同的抑制作用, 胁迫强度越大, 两个品种延迟发光积分强度的差异就越大。研究还发现, 在干旱胁迫下萌发的万瑞 168 号和堰单 8 号玉米延迟发光相对变化率 R_{DL} 与种子萌发抗旱指数和储藏物质转运率的变化是一致的, 依据干旱胁迫下种子萌发过程中延迟发光积分强度相对变化率 R_{DL} 的大小可以评价玉米种子萌发期抗旱性的强弱。

关键词: 生物延迟发光; 抗旱性评价; 玉米萌发; 无损检测

中图分类号: Q632

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fgxb20143502.0243

Evaluation Method of Maize Drought Resistance During Germination Based on Delayed Luminescence

GAO Yu¹, XI Gang^{1*}, LIU Kai¹, YANG Yun-jing²

(1. Department of Applied Physics, Institute of Science, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Department of Applied Physics, North West Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

* Corresponding Author, E-mail: xig@xaut.edu.cn

Abstract: Evaluation of drought resistance during germination of maize is one of the basic problems that have not been solved in modern water-saving agriculture, while biological delayed luminescence technology may solve this problem. In order to explore the method of using delayed luminescence to evaluate drought resistance in maize germinating stage, the delayed luminescence of two maize varieties Wanrui No. 168 and Yandan No. 8 germinated in PEG-6000 solution with osmotic potential of -0.1 MPa and -0.3 MPa was measured. The results show that the integrated intensity of delayed luminescence of Wanrui No. 168 and Yandan No. 8 increase gradually with the germination process. Drought stress with osmotic potential of -0.1 MPa and -0.3 MPa inhibits the increase in integrated intensity of delayed luminescence of Wanrui No. 168 and Yandan No. 8, and the stronger the stress, the greater the difference of integrated intensity of delayed luminescence between two maize varieties. The relative change rate of delayed luminescence is defined as R_{DL} . The study found that the change of R_{DL} of Wanrui No. 168 and Yandan No. 8 was the same as the change of seed germination drought index and storage material transport rate under drought stress. It indicated that

the size of R_{DL} during germination under drought stress could be used to evaluate drought resistance of maize during seed germination.

Key words: biological delayed luminescence; evaluation of drought resistance; maize germination; nondestructive testing

1 引 言

玉米是我国干旱和半干旱地区的主要作物,其在种子萌发期经常遭遇干旱,严重影响了出苗和后期生长。因此,选用萌发期抗旱性较强的种子对于玉米生产具有极为重要的意义^[1-2]。然而,玉米种子萌发期抗旱性评价的问题一直没有很好地解决。长期以来,玉米种子萌发期抗旱性都是根据干旱胁迫下萌发种子发生的生物学变化来评价的,评价指标有生物抗旱指标和生理抗旱指标两大类。前者是以干旱胁迫对品种生长发育造成的直接伤害为依据,评价指标有种子萌发抗旱指数(GDRI)、储藏物质转移速率、相对发芽率、胚根条数、主胚根长度、胚芽鞘长度、株高等;后者以干旱胁迫下品种的生理生化反应变化为依据来评价作物品种的抗旱性,评价指标有呼吸速率、质膜透性、脯氨酸含量、丙二醛(MDA)含量、超氧化物歧化酶(SOD)活性、过氧化氢酶(CAT)活性、过氧化物酶(POD)活性、硝酸还原酶活性、ATP酶活性、蛋白水解酶活性、VC含量、 K^+ 含量等。单一的生理指标不能准确评价作物的抗旱性,所以,该方面的研究近年来向多个指标综合评定的隶属函数法、聚类分析和灰色关联度分析等数量分析方法发展^[3-7]。然而,生物抗旱指标测定繁杂,工作量大和周期长,需要在宏观性状出现以后才能评价,不能进行早期诊断;生理抗旱指标的获取大多来源于破坏性的试管实验,这些实验的特点是需要离体操作,即要将细胞破碎、纯化和富集,不能进行活细胞的实时定位测量,造成了细胞内各组分、各层次之间相互作用信息的丢失,其测定结果无法反映生物代谢或者生命的真实运转状态^[8]。抗旱性是作物细胞在干旱胁迫下自我调节能力的体现,它是通过细胞内各组分的相互作用来实现的,并不存在能够统一地评价作物品种抗旱性的生理指标^[9]。因此,必须发展基于活体细胞生命信息的、能够反映干旱胁迫下细胞整体代谢变化、并能实现无损和快速测量的作物种子

抗旱性评价新方法。

光学技术由于具有无损、高特异性、高灵敏、高空间分辨、高时间分辨和实时动态等优势,正在成为研究活细胞生命现象的主流研究方法。其中,叶绿素荧光和生物超弱发光分析技术在研究和评价作物抗旱性中最具潜力^[10-13]。因为在种子萌发过程中叶绿素尚未合成,所以生物超弱发光分析就成为种子萌发期抗旱性评价中最可能获得应用的光学技术。生物超弱发光包括自发发光和光诱导的延迟发光,是活细胞发出的生命信息^[14-17]。近年来,生物延迟发光分析技术受到关注,这是因为生物延迟发光起源于生命活动中多模光子辐射与集体生物分子之间的相干非线性作用,包含更多的生命信息,它的动力学参数可以反映细胞的总体代谢强度、细胞有序程度和细胞内各组分之间相互作用的大小^[18-20]。有关生物延迟发光在盐胁迫^[21-22]、 H_2O_2 胁迫^[23]、UV-B辐射^[22,24]和温度胁迫^[22]等方面的应用已有很多研究。由于干旱胁迫下,许多生物功能分子的结构和功能发生变化,造成生物分子解偶联和细胞伤害,其结果必然导致生物延迟发光的迅速减少,因此,通过对细胞延迟发光动力学过程的分析有可能获取干旱胁迫下细胞有序程度、细胞内各组分之间相互作用的变化以及细胞伤害的信息,从而解决长期存在的从细胞整体代谢角度无损检测和评价玉米种子萌发期抗旱性的难题。鉴于此,本文采用PEG(聚乙二醇)-6000高渗溶液形成水分胁迫,研究了在水分胁迫下萌发玉米延迟发光的变化规律及其在抗旱性评价中的应用,希望能够建立基于生物延迟发光的评价玉米种子萌发期抗旱性的新方法。

2 材料与方 法

2.1 材料培养与干旱处理

供试材料为两个品种的玉米种子,分别为万瑞168号(抗旱性弱)和堰单8号(抗旱性强)。选取大小、外观一致的饱满种子,用蒸馏水洗涤,

加入质量分数为0.2%的 HgCl_2 消毒、清洗后,均匀放置在铺有两层滤纸的培养皿中,每个培养皿中放置120粒玉米种子。对照组加适量蒸馏水,在25℃环境下恒温避光培养。根据Michel的方法配制渗透势为-0.1 MPa和-0.3 MPa的PEG-6000溶液^[25]。处理组除分别用渗透势为-0.1 MPa和-0.3 MPa的PEG-6000溶液处理外,其他条件均相同。考虑到种子吸水对渗透势的影响,每隔24 h更换培养液。对照组和处理组各设3个重复。

2.2 萌发种子发芽率的测量

每隔24 h记录对照组和处理组玉米种子的发芽数,计算种子发芽率,取平均值。种子发芽率=(发芽种子数/种子总数)×100%。

2.3 种子萌发抗旱指数(GDRI)的测量

按照Bousslama提出的方法计算种子萌发抗旱指数(PI)^[26]:

$$PI = 1.00n_{d2} + 0.75n_{d4} + 0.50n_{d6} + 0.25n_{d8}$$

其中, n_{d2} 、 n_{d4} 、 n_{d6} 、 n_{d8} 分别为萌发2,4,6,8 d后的发芽率,其前面的系数分别为相应萌发天数所赋予的抗旱系数。种子萌发抗旱指数(GDRI)为水分胁迫下的种子萌发指数与对照组的种子萌发指数的比值。

2.4 萌发种子储藏物质转运率的测量

将测量种子发芽率后的每组玉米种子中的所有种子(包括经培养后生长部分及未发芽种子)置于烘箱中,80℃烘至恒重,称干重(包括根重、芽重、籽粒重),按下式计算贮藏物质转运率:

$$\text{贮藏物质转运率}(\%) =$$

$$(\text{芽} + \text{根})\text{干重}/(\text{芽} + \text{根} + \text{籽粒})\text{干重} \times 100\%$$

2.5 萌发玉米延迟发光的测量

萌发玉米延迟发光的测量采用自制的测量系统,测量仪器组成和测量方法见文献^[27]。测量前将仪器预热1 h,使本底稳定。测量时用滤纸吸干待测玉米表面溶液,用LED辐照30 s后开始测量样品的延迟发光,设置测量时间为50 s,采集数据间隔为1 s,工作电压为-1 000 V,样品室温度设为25℃。在测量前先测1次本底,并将测量值减去本底。每组样品重复3次,取平均值。

每个培养皿中放置6粒玉米种子,对照组加适量蒸馏水,处理组用渗透势为-0.1 MPa和-0.3 MPa的PEG-6000溶液处理,对照组和处理组各设3个重复。每隔24 h跟踪测量该6粒玉

米种子的延迟发光,测量完后放回对应的培养皿,更换培养液。将每次测量得到的种子延迟发光曲线按照式(1)拟合^[28]:

$$I(t) = I_{\text{SL}} + \frac{I(0)}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^\beta}, \quad (1)$$

其中, t 为测量时间(s)。按照式(1)拟合后可得初始光子数 $I(0)$ (counts/s)、相干时间 τ 、衰减常数 β 和单位时间的自发发光 I_{SL} (counts/s)。延迟发光积分强度(即延迟发光曲线下的面积)由式(2)计算^[28]:

$$I(T) = I_{\text{SL}}T + \frac{\tau I(0)}{\beta - 1} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + T/\tau\right)^{\beta-1}} \right], \quad (2)$$

其中, T 为测量时间(s)。

2.6 玉米萌发过程中延迟发光相对变化率的计算

玉米种子萌发过程中延迟发光相对变化率定义为:

$$R_{\text{DL}} = \frac{I_{\text{DL}}(T)}{I_{\text{DL}}^0(T)} - 1, \quad (3)$$

其中, R_{DL} 为延迟发光相对变化率, $I_{\text{DL}}(T)$ 为当前的延迟发光积分强度, $I_{\text{DL}}^0(T)$ 为初值(萌发为0时)的延迟发光积分强度。

3 结果与讨论

3.1 基于生物抗旱指标的萌发玉米抗旱性评价

在种子萌发期抗旱性评价中,种子萌发抗旱指数(GDRI)和贮藏物质转运率是应用较广和较为可靠的生物抗旱指标^[4]。为了了解供试玉米品种万瑞168号和堰单8号种子萌发期抗旱性的强弱,我们首先测定了两个供试玉米品种的GDRI和贮藏物质转运率。表1为万瑞168号和堰单8号两个玉米品种分别在蒸馏水中萌发和在-0.1 MPa、-0.3 MPa的PEG溶液中萌发时的种子发芽率。由表1计算得到的两个玉米品种的GDRI见表2。由表2可见,在-0.1 MPa和-0.3 MPa的PEG溶液中萌发时,堰单8号玉米的GDRI均大于万瑞168号,表明堰单8号玉米种子的萌发期抗旱性要强于万瑞168号。

储藏物质转运率的测量结果表明(表3),堰单8号对照组的储藏物质转运率大于万瑞168号对照组的储藏物质转运率,两者相比较,相对增长

表 1 玉米萌发过程中的发芽率 (%)

Table 1 Germination rate of maize (%)

萌发/d	万瑞 168 号			堰单 8 号		
	对照	-0.1 MPa	-0.3 MPa	对照	-0.1 MPa	-0.3 MPa
1	0	0	0	0	0	0
2	67.5	24.2	3.3	76.7	30.0	2.5
3	80.8	67.5	24.2	95.8	89.2	34.2
4	82.5	72.5	37.5	97.5	93.3	55.0
5	83.3	74.2	43.3	98.3	95.0	93.3
6	86.7	76.7	76.7	99.2	97.5	94.2
7	87.5	80.0	77.5	99.2	97.5	95.8
8	87.5	83.3	77.5	99.2	97.5	95.8

表 2 干旱胁迫下两个玉米品种的 GDRI (%)

Table 2 GDRI of the two kinds of maize under drought stress (%)

处理条件	万瑞 168 号	堰单 8 号	相对变化率/%
-0.1 MPa PEG	70.77	77.23	9.12
-0.3 MPa PEG	45.82	51.21	11.75

率为 33.9%, 显示堰单 8 号玉米的萌发要快于万瑞 168 号。在 -0.1 MPa 和 -0.3 MPa 的 PEG 溶液渗透胁迫下, 两个品种的储藏物质转运率都分别比对照要低, 说明两个品种的种子萌发过程都受到了抑制; 但是, 堰单 8 号玉米的储藏物质转运率明显高于万瑞 168 号玉米。在 -0.3 MPa 的 PEG 溶液渗透胁迫下, 堰单 8 号的储藏物质转运率与万瑞 168 号相比较, 相对增长率达到 278%, 显示出了巨大的差异, 说明堰单 8 号玉米种子的萌发期抗旱性比万瑞 168 号玉米要高。

表 3 干旱胁迫下两个玉米品种的储藏物质转运率 (%)

Table 3 Transport rate of reserve substance in maize under drought stress (%)

处理条件	万瑞 168 号	堰单 8 号
对照	3.736	5.003
-0.1 MPa PEG	3.111	3.438
-0.3 MPa PEG	0.428	1.622

3.2 干旱胁迫下玉米萌发过程中延迟发光的变化

生物延迟发光是生命体系在外来光激发下的持续发光现象, 因为这一发光过程不同于荧光, 要

持续较长时间, 因此称为延迟发光。图 1、图 2 和图 3 分别为实验测得的万瑞 168 号玉米和堰单 8 号玉米在蒸馏水中萌发(对照)和在 -0.1 MPa 与 -0.3 MPa 的 PEG-6000 溶液中萌发(处理)时的延迟发光曲线。

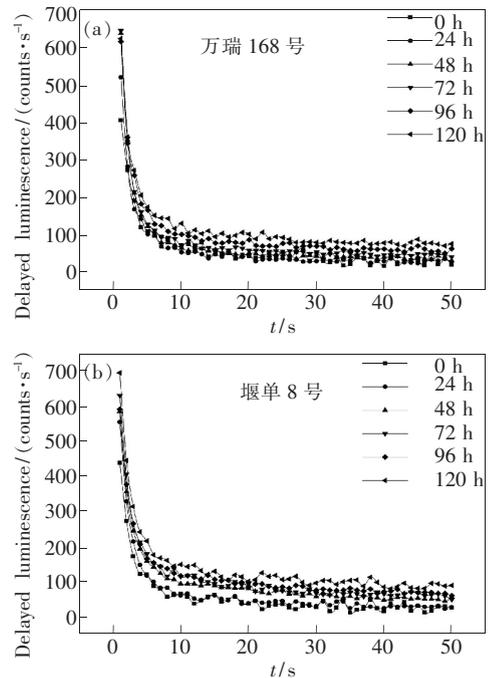


图 1 万瑞 168 号和堰单 8 号对照组的延迟发光

Fig. 1 Delayed luminescence of the control group of Wanrui No. 168 and Yandan No. 8

由图 1、图 2 和图 3 可见, 各延迟发光曲线随时间呈现逐渐衰减的特征。为了定量说明各延迟发光曲线的特征和区别, 将图 1、图 2 和图 3 中各曲线分别按式(1)拟合, 可以得到各曲线的拟合参

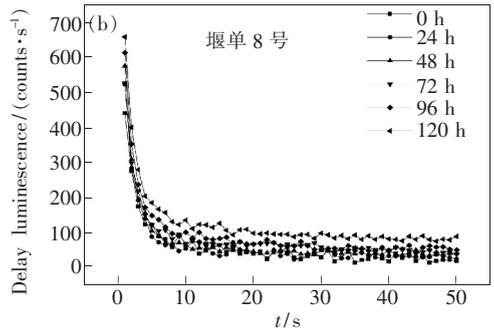
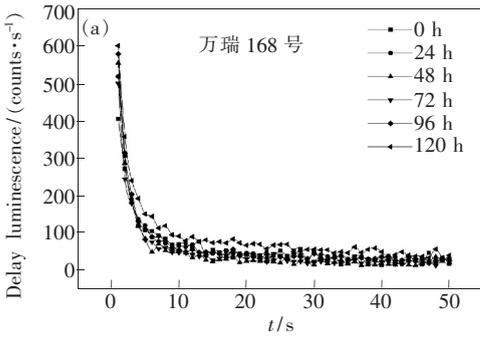


图2 -0.1 MPa胁迫下的万瑞168号和堰单8号的延迟发光

Fig. 2 Delayed luminescence of Wanrui No. 168 and Yandan No. 8 under -0.1 MPa stress

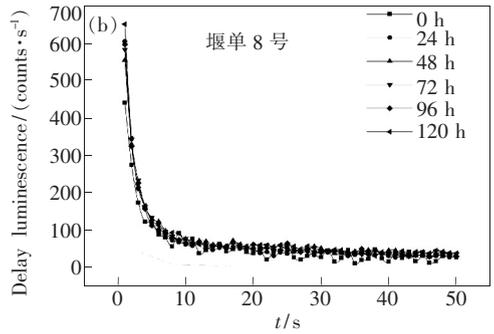
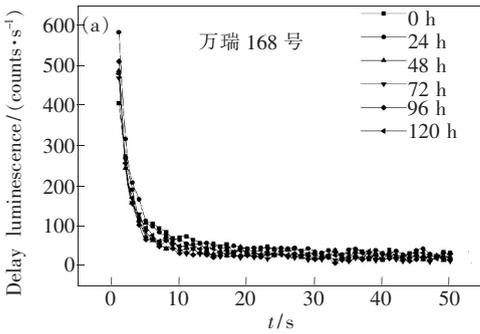


图3 -0.3 MPa胁迫下的万瑞168号和堰单8号的延迟发光

Fig. 3 Delayed luminescence of Wanrui No. 168 and Yandan No. 8 under -0.3 MPa stress

数:初始光子数 $I(0)$ (counts/s)、相干时间 τ 、衰减常数 β 和单位时间的自发发光 I_{SL} 。然后,将各拟合参数带入式(2)可以得到各曲线对应的延迟发光积分强度 I_{DL} ,结果见图4和图5。

由图4和图5可见,对照组的万瑞168号和堰单8号玉米的延迟发光积分强度均随着萌发时间呈现增长的趋势,-0.1 MPa和-0.3 MPa的PEG溶液形成的干旱胁迫对萌发过程中两个玉米品种延迟发光积分强度的增长都有抑制作用,

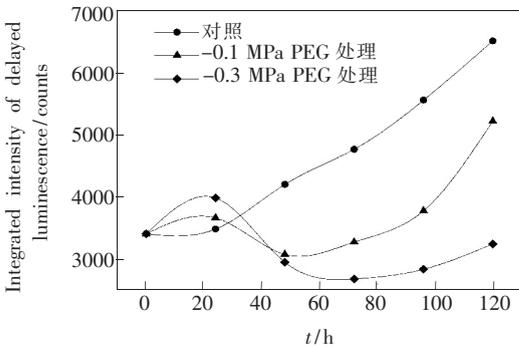


图4 万瑞168号玉米萌发过程中的延迟发光积分强度的变化

Fig. 4 Integrated intensity of delayed luminescence (I_{DL}) during germination of Wanrui No. 168

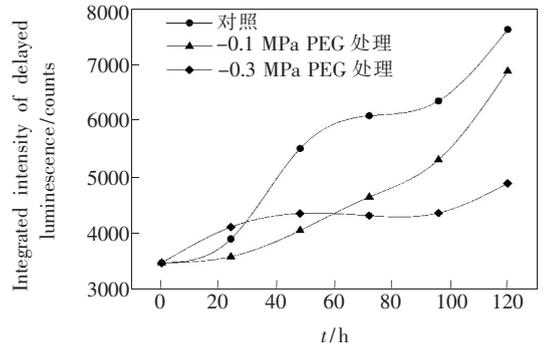


图5 堰单8号玉米萌发过程中的延迟发光积分强度的变化

Fig. 5 Integrated intensity of delayed luminescence (I_{DL}) during germination of Yandan No. 8

并且这种抑制作用也呈现出品种差异,干旱胁迫对万瑞168号延迟发光积分强度的抑制作用要大于堰单8号。

3.3 基于延迟发光的玉米种子萌发期抗旱性评价

由于干旱胁迫对萌发玉米延迟发光的抑制呈现出品种差异性,那么依据干旱胁迫对种子萌发过程中延迟发光升高的抑制程度可以区分种子抗

旱性的强弱。图 6 为万瑞 168 号玉米与堰单 8 号在 -0.1 MPa 的 PEG 形成的干旱胁迫下萌发时延迟发光的相对变化率 R_{DL} 。在图 6 中,两个品种的 R_{DL} 值在萌发 24 h 时开始出现差异,此后堰单 8 号的 R_{DL} 一直高于万瑞 168 号,两者的差异在 120 h 时达到了 83.70%。图 7 为万瑞 168 号玉米与堰单 8 号玉米在 -0.3 MPa 的 PEG 形成的干旱胁迫下萌发时的延迟发光 R_{DL} 的变化情况。由图 7 可见,在 -0.3 MPa 的干旱胁迫下,堰单 8 号与万瑞 168 号的 R_{DL} 的差异更大,在 120 h 时达到了 950.84%。这个结果表明,依据 -0.3 MPa 的干旱胁迫下的 R_{DL} 值的大小可以区分种子萌发期抗旱性的强弱。

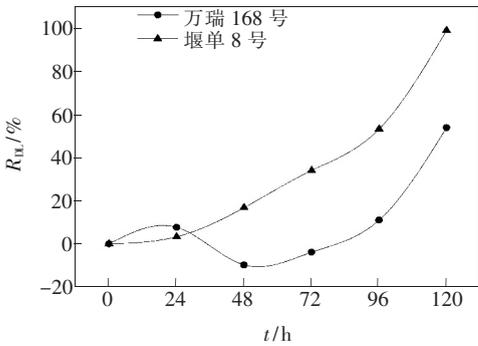


图 6 -0.1 MPa 的 PEG 胁迫下的两种玉米萌发过程中 R_{DL} 的变化

Fig. 6 R_{DL} of the two kinds of maize during germination under PEG stress of -0.1 MPa

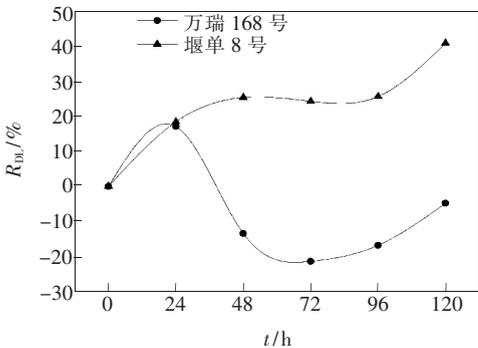


图 7 -0.3 MPa 的 PEG 胁迫下的两种玉米萌发过程中延迟发光 R_{DL} 的变化

Fig. 7 R_{DL} of the two kinds of maize during germination under PEG stress of -0.3 MPa

3.4 讨论

在种子萌发过程中,细胞吸水后开始修复和活化,线粒体内膜的缺损恢复完整,电子转移酶类被合成或活化并嵌入膜中,氧化磷酸化过程逐渐恢复正常,呼吸代谢的恢复使得 ATP 供应加速,

DNA 合成逐渐开始。在干旱胁迫下,过量的自由基会直接攻击细胞膜脂和含巯基的蛋白质,引起细胞膜组分的降解和某些酶功能的丧失,导致细胞膜损伤、氧化磷酸化解偶联。由于延迟发光起源于生命活动中多模光子辐射与集体生物分子之间的相干非线性作用^[19],生物分子之间的解偶联程度越高,细胞伤害的程度越大,延迟发光的衰减就越快,延迟发光曲线下的面积(即延迟发光积分强度)就越小。因此,依据干旱胁迫下种子萌发过程中延迟发光积分强度(I_{DL})的变化可以判断种子细胞受到的伤害程度,进而评价种子萌发期的抗旱性强弱。

本文采用干旱胁迫下萌发过程中种子延迟发光相对变化率 R_{DL} 值的大小作为反映萌发过程中细胞代谢和细胞受到伤害程度,进而表示抗旱性强弱的标志。 R_{DL} 值越大,说明干旱胁迫对萌发过程中细胞代谢的影响和细胞伤害越小,抗旱性越强。在图 6 和图 7 中,干旱胁迫下萌发的抗旱性较弱的万瑞 168 号玉米的 R_{DL} 值从萌发 24 h 开始就远低于抗旱性较强的堰单 8 号玉米,并且干旱胁迫的强度越大,差异越大,说明这两个品种的种子萌发期抗旱性的强弱可以通过 R_{DL} 值的大小区分出来。依据延迟发光 R_{DL} 值的评价结果与采用传统评价指标种子萌发抗旱指数和储藏物质转运率的评价结果是一致的(见表 2 和表 3),说明本文提出的评价方法是可靠的。

应该指出,本文提出的评价方法除了具有无损测量的特点以外,还具有以下优点:(1)由于延迟发光的变化对于干旱胁迫十分敏感,所以依据延迟发光判断种子抗旱性强弱具有灵敏和准确的特点,其对于不同品种的抗旱性区分度大;(2) R_{DL} 表示的是延迟发光积分强度的相对变化率,与作物品种无关,具有普适性;(3)种子用量少,这对于珍稀品种的抗旱性鉴定尤为重要;(4) R_{DL} 的动态变化过程可以反映出种子细胞代谢受阻和细胞伤害的发生时刻和程度。例如,在图 7 中,在 -0.3 MPa 的渗透胁迫下,堰单 8 号玉米延迟发光的 R_{DL} 值在萌发开始迅速升高,在 24 h 时出现了拐点,此后缓慢增加,说明干旱胁迫在 24 h 时开始对细胞代谢产生影响,此后细胞经过调整,逐步适应了干旱环境,延迟发光积分强度又开始升高。然而,万瑞 168 号玉米的 R_{DL} 值在 24 h 时开始迅速下降,表明干旱胁迫对万瑞 168 号玉米细胞的

伤害和影响比堰单8号玉米要大。此后,堰单8号玉米的 R_{DL} 值一直明显大于万瑞168号,表明堰单8号玉米对干旱的适应和恢复程度远远高于万瑞168号。可见,依据 -0.1 MPa 和 -0.3 MPa 的渗透胁迫下的 R_{DL} 值可以区分出两个玉米品种抗旱性的强弱。当然,本文提出的方法还需要通过大量实验来进一步验证。

4 结 论

在萌发过程中,万瑞168号和堰单8号玉米

种子的延迟发光积分强度逐渐升高,相同强度的干旱胁迫对两个品种的延迟发光积分强度的升高有不同的抑制作用,呈现出品种差异性。在相同的干旱胁迫下,万瑞168号和堰单8号玉米种子在萌发过程中的延迟发光积分强度的相对变化率 R_{DL} 呈现出很大的差异,依据 R_{DL} 的大小可以区分这两种玉米种子萌发期抗旱性的强弱。该评价方法具有种子用量少、无损、快速、灵敏和准确的特点,能够反映出种子细胞对干旱的综合抗性。

参 考 文 献:

- [1] Wu P T, Feng H, Niu W Q, *et al.* Technical trend and R&D focus of modern water-saving agriculture [J]. *Eng. Sci.* (中国工程科学), 2007, 9(2):12-18 (in Chinese).
- [2] Chen Z B. Research advance and development trends of water use efficiency in plant biology [J]. *Sci. Agr. Sinica* (中国农业科学), 2007, 40(7):1456-1462 (in Chinese).
- [3] Sun C X, Wu Z J, Zhang Z P, *et al.* System analysis of drought resistance identification parameters in maize [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture* (农业系统科学与综合研究), 2004, 20(1):43-47 (in Chinese).
- [4] Sun J W, Ji T H, Yang Z G, *et al.* Study on identification of the drought resistant in maize seedling emergence stage [J]. *Chin. Agr. Sci. Bull.* (中国农学通报), 2009, 25(3):104-107 (in Chinese).
- [5] Zhou W, Hou J H, Gao Z J. Selection of the drought resistance indexes in maize seedling emergence stage [J]. *J. Maize Sci.* (玉米科学), 2008, 16(5):66-69 (in Chinese).
- [6] Zhao M L. Studies on identification indices for drought resistance in different growing periods of corn [J]. *Chin. Agr. Sci. Bull.* (中国农学通报), 2009, 25(12):66-68 (in Chinese).
- [7] Leng Y F, Zhang B, Zhao J R, *et al.* Identification of drought resistance of transgenic maize during seed germination stage [J]. *Agr. Res. Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2013, 31(1):177-182 (in Chinese).
- [8] Tang P S, Xiao J P. Certain modes of control of life process operation by respiratory metabolism in plant cells [J]. *J. Integr. Plant Biol.*, 1991, 33(10):729-737.
- [9] Shan L. Development trend of dryland farming technologies [J]. *Sci. Agr. Sinica* (中国农业科学), 2002, 35(7):848-855 (in Chinese).
- [10] Xi G, Zhang Z Y. Using physics to study plant resistance to adversity [J]. *Phys.* (物理), 1997, 26(3):162-166 (in Chinese).
- [11] Zhang X H, Li F J, Shen L, *et al.* Application of ultraweak luminescence technique in research of plant stress physiology [J]. *Plant Physiol. Commun.* (植物生理学通讯), 2009, 45(9):931-935 (in Chinese).
- [12] Burke J J. Evaluation of source leaf responses to water-deficit stresses in cotton using a novel stress bioassay [J]. *Plant Physiol.*, 2007, 143(1):108-121.
- [13] Burke J J, Franks C D, Burow G, *et al.* Selection system for the stay-green drought tolerance trait in sorghum germplasm [J]. *Agronomy J.*, 2010, 102(4):1118-1122.
- [14] Mansfield J W. Biophoton distress flares signal the onset of the hypersensitive reaction [J]. *Trends in Plant Sci.*, 2005, 10(7):307-309.
- [15] Yoon Y Z, Kim J, Lee B C. Changes in ultraweak photon emission and heart rate variability of epinephrine-injected rats [J]. *General Physiol. Biophys.*, 2005, 24(2):147-159.
- [16] Yoshinaga N, Kato K, Kageyama C. Ultraweak photon emission from herbivory-injured maize plants [J]. *Naturwissenschaften*, 2006, 93(1):38-41.
- [17] Hidehiro I, Toshiyuki I, Wang G X, *et al.* Spontaneous ultraweak photon emission from rice (*Oryza sativa* L.) and paddy

- weeds treated with a sulfonylurea herbicide [J]. *Pesticide Biochem. Physiol.*, 2007, 89(2):158-162.
- [18] Yu Y, Popp F A, Sibylle S. Further analysis of delayed luminescence of plants [J]. *Photochem. Photobiol. B: Biol.*, 2005, 78(3):235-244.
- [19] Gu Q. *Biophotonics* [M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2012:25-33 (in Chinese).
- [20] Xi G, Yang Y J, Li S H, *et al.* Double-exponential model of ultraweak photon emission of soybean callus and its significance [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(1):87-93 (in Chinese).
- [21] Wang H M. Effect of salt stress with different time on delayed luminescence from leaves [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2009, 30(4):545-548 (in Chinese).
- [22] Li Y, Xu W H. Detection of stress physiology of plant using F_{730}/F_{685} ratio of delayed fluorescence spectrum [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(7):740-747 (in Chinese).
- [23] Xi G, Li S H, Zhang Y. Analysis of delayed luminescence dynamic processes of spinach leaves stressed by H_2O_2 [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2010, 31(6):952-956 (in Chinese).
- [24] Xi G, Zhang X H, Liu K, *et al.* Evaluation method of UV-B radiation injury on plant cell based on photonic technology [J]. *Chin. J. Lumin.* (发光学报), 2011, 32(4):398-403 (in Chinese).
- [25] Michel B E, Kaufmann M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000 [J]. *Plant Physiol.*, 1973, 51(5):914-916.
- [26] Bouslama M, Schapaugh W T. Stress tolerance in soybeans. I. Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance [J]. *Crop Sci.*, 1984, 24(5):933-937.
- [27] Li S H, Xi G, Fan L L, *et al.* Changes of ultra-weak photon emission of wheat seed during germination and its significance under osmotic stress [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2011, 40(2):282-288 (in Chinese).
- [28] Xi G, Liu K, Zhang X H, *et al.* Dynamic analysis of ultra-weak photon radiation of soybean callus induced by UV-B radiation [J]. *Acta Photonica Sinica* (光子学报), 2010, 39(8):1449-1454 (in Chinese).



高宇(1989-),女,陕西延安人,硕士研究生,2011年于重庆工商大学获得学士学位,主要从事生物光子学方面的研究。

E-mail: gygao89@163.com



习岗(1957-),男,陕西杨凌人,教授,1982年于西安理工大学获得学士学位,1991年于西北农林科技大学获得硕士学位,主要从事生物电磁学和生物光学的研究。

E-mail: xig@xaut.edu.cn