

doi: 10.3788/gzxb20144302.0217003

水分胁迫下萌发玉米的自发发光在抗旱性评价中的应用

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, 西安 710048)

(2 西北农林科技大学 应用物理系, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:作物种子萌发过程中的自发发光是反映萌发种子细胞代谢和 DNA 合成的生命信息,其在种子萌发期抗旱性评价中具有重要意义.为了建立基于自发发光的玉米种子萌发期抗旱性评价方法,研究了-0.1 MPa 与-0.3 MPa 的 PEG-6000 溶液造成的水分胁迫下万瑞 168 号和堰单 8 号玉米种子萌发过程中自发发光的变化规律.结果表明,水分胁迫对萌发过程中两个玉米品种自发发光的升高都有抑制作用,相同强度的水分胁迫对万瑞 168 号玉米自发发光的抑制作用明显大于堰单 8 号,水分胁迫的强度越大,品种间的差异越大.研究还发现,种子萌发过程中自发发光的相对变化率 R_{SL} 值的变化灵敏地反映了种子细胞生命活动对水分胁迫的响应、适应和伤害的动态变化过程,依据 R_{SL} 的大小可以对玉米种子萌发期抗旱性进行无损和灵敏的评价.

关键词:自发发光;玉米萌发;水分胁迫;抗旱性

中图分类号:O482.31;Q632

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2014)02-0217003-5

Application of Spontaneous Fluorescence of Germinating Maize in Drought Resistance Evaluation under Water Stress

GAO Yu¹, XI Gang¹, 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, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Spontaneous fluorescence, as a kind of life information, can reflect cellular metabolism and DNA synthesis, so it plays an important role in evaluation of drought resistance during germination of crop seeds. To establish the method of drought resistance evaluation based on spontaneous fluorescence in germinating stage of maize, change of spontaneous fluorescence was studied in Wanrui No. 168 and Yandan No. 8 under water stress induced by PEG-6000 solution with the osmotic potential of -0.1 MPa and -0.3 MPa. The results show that spontaneous fluorescence of the two cultivars increase with the germination process, while is inhibited by water stress. The inhibition effect of spontaneous fluorescence to Wanrui No. 168 is more obvious than that to Yandan No. 8 under the same intensity of water stress, and the higher the intensity is, the greater the interspecific difference will be. It is also found that relative change rate of spontaneous fluorescence named R_{SL} during germination of seeds can reflect the dynamic process sensitively of response, adaptation and damage to water stress in life activities of seeds, and it is nondestructive and sensitive using R_{SL} to evaluate drought resistance in germination period of maize.

Key words: Spontaneous fluorescence; Maize germination; Water stress; Drought resistance

OCIS Codes: 170.0170; 170.1420; 160.1435

基金项目:国家自然科学基金(Nos. 50977079, 51277151)资助

第一作者:高宇(1989-),女,硕士,主要研究方向为生物光子学. Email: gygao89@163.com

导师(通讯作者):习岗(1957-),男,教授,主要研究方向为生物电磁学与生物光学. Email: xig@xaut.edu.cn

收稿日期:2013-09-16;录用日期:2013-10-30

<http://www.photon.ac.cn>

0 引言

作物抗旱性评价是节水农业的基础科学问题,也是研究的热点和难点^[1-2].长期以来,有关研究或者依据干旱胁迫下作物发生的单一生物学指标来评价作物抗旱性,或者采用多个生物学指标综合的隶属函数法、聚类分析和灰色关联度分析等数量分析方法来评价作物的抗旱性^[3-7].这种研究方法测量繁杂、工作量大、周期长,无法进行早期诊断.更为重要的是,作物抗旱性是活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协作来实现的^[8],依靠破坏性的试管实验获得的生物学指标无法反映生物代谢或者生命的真实运转状态^[9],并不存在能够统一评价作物品种抗旱性的生理指标^[10].因此,由于研究方法本身的缺陷导致了现流行的研究结果不能准确评价作物抗旱性.要解决长期存在的作物抗旱性评价的难题必须研究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抗旱性评价新方法.

基于光学技术的研究表明,活细胞产生的叶绿素荧光和生物超弱发光是能够反映作物整体抗旱性的生命信息^[11-14].其中,萌发种子的自发发光来自于细胞呼吸代谢和DNA合成反应^[15],是活细胞发出的生命信息^[16-19].因此,自发发光在作物种子整体抗旱性评价的研究中最具潜力^[11, 20-22].但是,有关研究很少.

玉米是我国干旱和半干旱地区的主要作物,其种子在萌发期经常遭遇干旱,研究玉米萌发期抗旱性评价对于我国玉米生产具有极为重要的意义,而基于自发发光的玉米种子萌发期抗旱性评价方法的研究未见报道.鉴于此,本文采用PEG-6000高渗溶液形成水分胁迫,研究了在水分胁迫下萌发玉米自发发光的变化规律,并提出了基于自发发光的玉米种子萌发期抗旱性评价的方法.

1 材料与方法

1.1 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HgCl₂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.

水分胁迫是采用Michel等^[23]的方法配制渗透势为-0.1 MPa和-0.3 MPa的PEG-6000溶液,用该溶液处理萌发种子,对种子形成生理干旱.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三个重复.

1.2 自发发光的测量

自发发光的测量采用BPCL微弱发光测量仪(中国科学院生物研究所研制).测量前将仪器预热1 h,使系统本底稳定,并且每个样品测量前先用无水乙醇擦洗样品杯,作杀菌处理以避免细菌发光对试验造成影响.每次测量时间为60 s,采集数据的时间间隔设置为1 s,工作电压-1 000 V,样品室的环境温度设为25℃.每次测量前都测定1次本底,并减去本底.根据测量系统样品杯的大小,测量时分别选取处理组和对照组的玉米种子各3组,每组6粒.用滤纸吸干表面液体后放入样品室暗处理10 min,测定样品的自发发光.用单位时间的光子数表示自发发光强度,单位为counts/s.每隔24 h跟踪测量该6粒玉米种子的自发发光,取三个重复组的平均值.

1.3 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.种子发芽率等于发芽种子数/种子总数,将露白种子定义为已发芽种子.

1.4 种子萌发抗旱指数的测量

按照Bousslama提出的方法计算种子萌发抗旱指数(Germination Drought Resistance Index, GDRI)和种子萌发指数(Sprouting Index, PI)^[24]

$$GDRI = \frac{\text{水分胁迫下种子萌发指数}}{\text{对照种子萌发指数}} \quad (1)$$

$$PI = (1.00)nd_2 + (0.75)nd_4 + (0.50)nd_6 + (0.25)nd_8 \quad (2)$$

式中, nd_2 、 nd_4 、 nd_6 和 nd_8 分别为萌发2天、4天、6天和8天后的发芽率,1.00、0.75、0.50和0.25分别为相应萌发天数所赋予的抗旱系数.

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下玉米萌发过程中自发发光的变化

生物自发发光是生物体系在生命活动中发出的光,通常将待测生物样品放置在暗中适应一段时间后测量的发光作为样品的自发发光.暗适应10 min后两个玉米品种萌发过程中的自发发光变化见图1.

由图1可见,对照组的万瑞168号和堰单8号玉米的自发发光均随着萌发时间呈现单调增长的趋势,-0.1 MPa与-0.3 MPa的PEG-6000溶液造成的水分胁迫对萌发过程中自发发光的生长都有抑制作用,并且这种抑制作用呈现出品种差异,相同强度的水分胁迫对万瑞168号自发发光的抑制作用明显大于堰单8号.在120 h时,和对照相比较,在-0.1 MPa与-0.3 MPa的PEG-6000溶液造成的水分胁迫下万瑞168号的自发发光分别下降了31.95%和64.24%,而堰单8号下降的幅度分别为9.46%和53.93%.

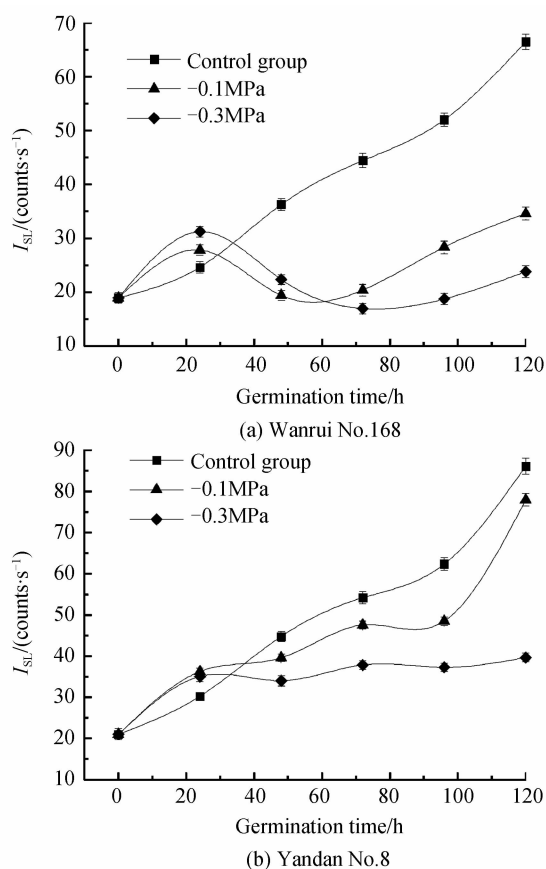


图1 万瑞168号与堰单8号玉米萌发过程中的自发发光
Fig. 1 Spontaneous fluorescence in germination period of Wanrui NO. 168 and Yandan No. 8

2.2 基于自发发光的玉米种子萌发期抗旱性评价方法

既然干旱胁迫对玉米萌发过程中自发发光的抑制呈现出品种差异性,那么,依据干旱胁迫对萌发玉米自发发光的抑制程度就可以区分出种子萌发期抗旱性的强弱。为此,以萌发初期的自发发光作为基准,用种子萌发过程中自发发光的相对变化率 R_{SL} 来区分种子萌发期抗旱性的强弱。 R_{SL} 的定义为

$$R_{SL} = I_{SL} / I_{SL}^0 - 1 \quad (3)$$

式中, R_{SL} 为自发发光相对变化率, I_{SL} 为当前的自发发光, I_{SL}^0 为初值(萌发零时)的自发发光。

图2为万瑞168号和堰单8号玉米在-0.1 MPa和-0.3 MPa的PEG溶液中萌发时自发发光的相对变化率 R_{SL} 。由图2(a)可见,在-0.1 MPa PEG渗透胁迫下,从萌发24 h开始,万瑞168和堰单8号玉米自发发光的 R_{SL} 开始出现差异。在萌发24 h~96 h之间,堰单8号的 R_{SL} 缓慢增长,而万瑞168号则呈现先下降后缓慢升高的现象,表明-0.1 MPa的PEG渗透胁迫对萌发过程中两个玉米品种自发发光的升高有不同的抑制作用。在120 h时,堰单8号自发发光的 R_{SL} 明显高于万瑞168号,两者相比较的差异达到了227.96%。图2(b)表明,在-0.3 MPa的PEG溶液的渗透胁迫下万瑞168号自发发光的 R_{SL} 值与堰单8号的差异更加明

显,因此,若依据-0.3 MPa的PEG溶液的渗透胁迫下萌发种子自发发光 R_{SL} 值的大小区分种子抗旱性更加准确。

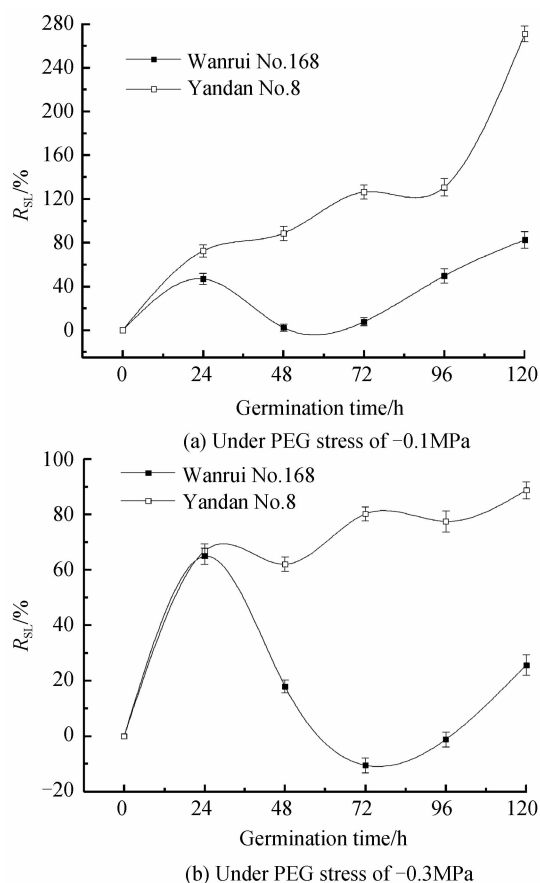


图2 -0.1 MPa和-0.3 MPa PEG处理下两种玉米种子自发发光 R_{SL} 值的变化
Fig. 2 Change of R_{SL} of the two kinds of maize under PEG stress of -0.1 MPa and -0.3 MPa

2.3 基于生物抗旱指标的萌发玉米抗旱性评价

研究表明,用高渗溶液进行水分胁迫可代替土壤水分胁迫处理而获得较可靠的结果。Bouslama等提出的种子萌发胁迫指数,反映了种子在高渗溶液中的发芽率和发芽势,是一个较为可靠的评价种子萌发期抗旱性的指标^[24]。目前,种子萌发胁迫指数被定义为种子萌发抗旱指数(GDRI),已被广泛应用于种子萌发期抗旱性评价^[5]。为了证明上述利用种子萌发过程中自发发光的 R_{SL} 值评价玉米种子萌发期抗旱性强弱的可靠性,测量了万瑞168号和堰单8号玉米的GDRI值。

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号玉米,表明堰单8号玉米种子萌发期抗旱性比万瑞168号玉米的抗旱性要强。由于在120 h时堰单8号自发发光的 R_{SL} 值高于万瑞168号

的现象与堰单 8 号种子萌发抗旱指数(GDRI)大于万瑞 168 号 GDRI 的现象是一致的,因此,依据萌发种子

表 1 玉米萌发过程中的发芽率(%)及其在水分胁迫下的变化

Table 1 Germination rate(%) of maize and its change under water stress

Germination time/day		1	2	3	4	5	6	7	8
Wanrui NO. 168	Control group	0	67.50	80.83	82.50	83.33	86.67	87.50	87.50
	-0.1 MPa PEG	0	24.17	67.50	72.50	74.17	76.67	80.00	83.33
	-0.3 MPa PEG	0	3.33	24.17	37.50	43.33	76.67	77.50	77.50
Yandan NO. 8	Control group	0	76.67	95.83	97.50	98.33	99.17	99.17	99.17
	-0.1 MPa PEG	0	30.00	89.17	93.33	95.00	97.50	97.50	97.50
	-0.3 MPa PEG	0	2.50	34.17	55.00	93.33	94.17	95.83	95.83

表 2 水分胁迫下两个玉米品种的 GDRI(%)

Table 3 GDRI(%) of two maize varieties under water stress

Treatment condition	-0.1 MPa PEG	-0.3 MPa PEG
Wanrui NO. 168	70.771	45.824
Yandan No. 8	77.231	51.208
Relative change rate(%)	9.12	11.75

3 讨论

种子萌发过程中的自发发光主要来源于种子细胞中的氧化代谢和 DNA 合成反应^[15]. 在种子萌发过程中,呼吸代谢的恢复和 DNA 合成的进行使得萌发过程中自发发光逐渐增长. 由于在水分胁迫下种子细胞中的氧化磷酸化解偶联、呼吸速率下降,ATP 生成减少,DNA 合成受阻,这些变化必然造成自发发光的减少. 因此,水分胁迫下自发发光的下降实际上提供了细胞代谢受到抑制、DNA 合成受阻的信息. 由于抗旱性不同的作物种子对水分胁迫的适应能力不同,在相同胁迫程度下细胞代谢受到抑制和 DNA 合成受阻的程度不同,这种差异就可以通过自发发光的差异反映出来,从而使得依据自发发光的变化评价种子萌发期抗旱性成为可能. 本文采用水分胁迫下种子萌发过程中自发发光的相对变化率 R_{SL} 值的大小作为反映萌发过程中细胞代谢和 DNA 合成强度,进而表示种子萌发期抗旱性强弱的标志,在水分胁迫下的种子萌发过程中, R_{SL} 的值越大,说明水分胁迫对细胞代谢和 DNA 合成的抑制越小,种子萌发期抗旱性越强;反之, R_{SL} 的值越小,说明细胞代谢和 DNA 合成受到的抑制程度越大,种子萌发期抗旱性越弱. 在图 2 中,水分胁迫下萌发的抗旱性较弱的万瑞 168 号玉米的 R_{SL} 值从萌发 24h 开始就远远低于抗旱性较强的堰单 8 号玉米,并且水分胁迫的强度越大,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_{SL} 值的大小区分出来.

值得一提的是,图 2(b)还显示,在-0.3 MPa 的水分胁迫下堰单 8 号玉米自发发光的 R_{SL} 值在萌发开始迅速升高,在 24 h 时出现了拐点,然后缓慢增加,万瑞 168 号玉米自发发光的 R_{SL} 值则在 24 h 时开始迅速下降,此后,其 R_{SL} 值一直远远小于堰单 8 号,表明在水分

自发发光 R_{SL} 的差异区分种子萌发期抗旱性是可靠的.

胁迫 24 h 时两个品种的玉米种子细胞代谢和 DNA 合成开始受到抑制,此后细胞经过调整,堰单 8 号玉米的细胞代谢和 DNA 合成有所恢复,万瑞 168 号玉米的细胞代谢和 DNA 合成恢复的水平要远远低于堰单 8 号. 由此看来,在水分胁迫下的萌发过程中种子自发发光 R_{SL} 的动态变化过程可以灵敏反映种子细胞代谢和 DNA 合成受到抑制的发生时刻及恢复程度.

研究表明:依据水分胁迫下萌发种子的自发发光评价种子萌发期抗旱性,评价指标 R_{SL} 与作物品种无关,具有普适性,能够反映出萌发玉米种子的生理代谢对水分胁迫的响应、适应和伤害的动态变化过程,具有准确和灵敏的特点. 此外,自发发光的测量简单,种子用量少,可以实现无损测量,这对于珍稀品种的抗旱性鉴定尤为重要. 因此,和传统方法相比较,本文提出的评价方法虽然具有很多优点,但还需要经过大量品种的实验来验证.

4 结论

1)在万瑞 168 号和堰单 8 号玉米种子的萌发过程中,自发发光均随着萌发时间呈现单调增长的趋势,-0.1 MPa 与-0.3 MPa 的 PEG-6000 溶液造成的水分胁迫均对两个玉米品种萌发过程中自发发光的生长有抑制作用.

2)相同强度的水分胁迫对万瑞 168 号自发发光的抑制作用明显大于堰单 8 号,水分胁迫的强度越大,对自发发光抑制的品种差异性越大.

3)玉米种子在萌发过程中自发发光的相对变化率 R_{SL} 灵敏地反映了种子细胞生命活动对水分胁迫的响应、适应和伤害的动态变化过程,依据 R_{SL} 的大小可以评价万瑞 168 号和堰单 8 号玉米种子萌发期的抗旱性.

参考文献

- [1] WU Pu-te, FENG Hao, NIU Wen-quan, *et al.* Technical trend and R&D focus of modern water-saving agriculture[J]. *Engineering science*, 2007, **9**(2): 12-18.
吴普特, 冯浩, 牛文全, 等. 现代节水农业技术发展趋势与未来研发重点[J]. *中国工程科学*, 2007, **9**(2): 12-18.
- [2] CHEN Zhao-bo. Research advance and development trends of

- water use efficiency in plant biology[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(7): 1456-1462.
- 陈兆波. 生物节水研究进展及发展方向[J]. 中国农业科学, 2007, **40**(7): 1456-1462.
- [3] SUN Cai-xia, WU Zhi-jie, ZHANG Zhen-ping, *et al.* System analysis of drought resistance identification parameters in maize [J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2004, **20**(1): 43-47.
- 孙彩霞, 武志杰, 张振平, 等. 玉米抗旱性评价指标的系统分析[J]. 农业系统科学与综合研究, 2004, **20**(1): 43-47.
- [4] ZHOU Wei, HOU Jian-hua, GAO Zhi-jun. Selection of the drought resistance indexes in maize seedling emergence stage [J]. *Journal of Maize Sciences*, 2008, **16**(5): 66-69.
- 周伟, 侯建华, 高志军. 玉米芽苗期抗旱性鉴定指标的选取[J]. 玉米科学, 2008, **16**(5): 66-69.
- [5] SUN Jun-wei, JI Tian-hui, YANG Zi-guang, *et al.* Study on identification of the drought resistant in maize seedling emergence stage[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(3): 104-107.
- 孙军伟, 冀天会, 杨子光, 等. 玉米萌芽期抗旱性鉴定研究[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(3): 104-107.
- [6] ZHAO Mei-ling. Studies on identification indices for drought resistance in different growing periods of corn[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, **25**(12): 66-68.
- 赵美令. 玉米各生育时期抗旱性鉴定指标的研究[J]. 中国农学通报, 2009, **25**(12): 66-68.
- [7] LENG Yi-feng, ZHANG Biao, ZHAO Jiu-ran, *et al.* Identification of drought resistance of transgenic maize during seed germination stage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2013, **31**(1): 177-182.
- 冷益丰, 张彪, 赵久然, 等. 转基因玉米种子萌发期抗旱性鉴定[J]. 干旱地区农业研究, 2013, **31**(1): 177-182.
- [8] ZHANG Can-jun, JI Tian-hui, YANG Zi-guang, *et al.* Study on resistance drought identify method and evaluation index of wheat I, identify method and evaluation index [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2007, **23**(9): 226-230.
- 张灿军, 冀天会, 杨子光, 等. 小麦抗旱性鉴定方法及评价指标 I, 鉴定方法及评价指标[J]. 中国农学通报, 2007, **23**(9): 226-230.
- [9] TANG Pei-song, XIAO Jing-ping. Certain modes of control of life process operation by respiratory metabolism in plant cells [J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 1991, **33**(10): 729-737.
- [10] SHAN Lun. Development trend of dry land farming technologies[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, **35**(7): 848-855.
- 山仑. 旱地农业技术发展趋向[J]. 中国农业科学, 2002, **35**(7): 848-855.
- [11] XI Gang, ZHANG Zhen-ying. Using physics to study plant resistance to adversity[J]. *Physics*, 1997, **26**(3): 162-166.
- 习岗, 张振瀛. 植物抗逆性研究的物理学方法[J]. 物理, 1997, **26**(3): 162-166.
- [12] ZHANG Xin-Hua, LI Fu-Jun, SHEN Lin, *et al.* Application of ultraweak luminescence technique in research of plant stress physiology [J]. *Plant Physiology Communications*, 2009, **45**(9): 931-935.
- 张新华, 李富军, 申琳, 等. 超弱发光技术在植物逆境生理研究中的应用[J]. 植物生理学通讯, 2009, **45**(9): 931-935.
- [13] BURKE J J. Evaluation of source leaf responses to water-deficit stresses in cotton using a novel stress bioassay[J]. *Plant Physiology*, 2007, **143**(1): 108-121.
- [14] BURKE J J, FRANKS C D, BUROW G, *et al.* Selection system for the stay-green drought tolerance trait in sorghum germplasm[J]. *Agronomy Journal*, 2010, **102**(4): 1118-1122.
- [15] MAO Da-zhang, SHEN Xun, ZHANG Yue-jing, *et al.* Effects of metabolic inhibitors on the ultraweak photon emission from germinating mung bean seeds [J]. *Acta Biophysica Sinica*, 1988, **4**(2): 116-120.
- 毛大璋, 沈恂, 张月敬, 等. 代谢抑制剂对萌发绿豆超弱发光的影响[J]. 生物物理学报, 1988, **4**(2): 116-120.
- [16] MANSFIELD J W. Biophoton distress flares signal the onset of the hypersensitive reaction [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, **10**(7): 307-309.
- [17] YOON Y Z, KIM J, LEE B C. Changes in ultraweak photon emission and heart rate variability of epinephrine-injected rats [J]. *General Physiology Biophysics*, 2005, **24**(2): 147-159.
- [18] YOSHINAGA N, KATO K, KAGEYAMA C. Ultraweak photon emission from herbivory-injured maize plants [J]. *Naturwissenschaften*, 2006, **93**(1): 38-41.
- [19] 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 Biochemistry and Physiology*, 2007, **89**(2): 158-162.
- [20] WANG Pei-hong, LV Jin-yin. Preliminary study of drought resistance identification for wheat varieties using ultraweak bioluminescence [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 1990, **17**(5): 399-400.
- 汪沛洪, 吕金印. 利用生物超弱发光鉴定抗旱性的小麦品种初探[J]. 生物化学与生物物理进展, 1990, **17**(5): 399-400.
- [21] YANG Qi-jian. A study of relations between superweak luminescence of several plants under germination and its ability of resistance to the unfavorable conditions [J]. *Progress in Biochemistry and Biophysics*, 1993, **20**(4): 315-317.
- 杨起简. 几种作物籽粒萌发时超弱发光与其抗逆性关系[J]. 生物化学与生物物理进展, 1993, **20**(4): 315-317.
- [22] LI Shao-hua, XI Gang, FAN Lin-lin, *et al.* Changes of ultraweak photon emission of wheat seed during germination and its significance under osmotic stress [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, **40**(2): 282-288.
- 李少华, 习岗, 樊琳琳, 等. 渗透胁迫下萌发小麦种子超弱光子辐射的变化及其意义[J]. 光子学报, 2011, **40**(2): 282-288.
- [23] MICHEL B E, KAUFMANN M R. The osmotic potential of polyethylene glycol 6000 [J]. *Plant Physiology*, 1973, **51**(5): 914-916.
- [24] BOUSLAMA M, SCHAPAUGH W T. Stress tolerance in soybeans. II Evaluation of three screening techniques for heat and drought tolerance [J]. *Crop Science*, 1984, **24**(5): 933-937.