

超弱发光技术在植物逆境生理研究中的应用

张新华^{1,2}, 李富军², 申琳¹, 生吉萍^{1,*}

¹ 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083; ² 山东理工大学轻工与农业工程学院, 山东淄博 255049

Application of Ultraweak Luminescence Technique in Research of Plant Stress Physiology

ZHANG Xin-Hua^{1,2}, LI Fu-Jun², SHEN Lin¹, SHENG Ji-Ping^{1,*}

¹College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; ²School of Light Industry and Agriculture Engineering, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

摘要: 文章介绍超弱发光的检测原理和方法, 以及这项技术在植物遭受干旱、温度、盐及金属离子胁迫和衰老过程中自发的超弱发光及其生理机制研究中的应用进展, 并指出了这一技术在植物逆境生理研究中存在的问题和今后的研究思路。

关键词: 超弱发光; 植物; 逆境生理

生物超弱发光(ultraweak luminescence, UWL)是广泛存在于动物、植物和微生物中自发辐射的一种极弱的光子流, 其强度为几个到几百个光子·s⁻¹·cm⁻², 波长范围为 200~800 nm。这种光不同于荧光素-荧光素酶体系那样的高效率生物发光, 而是一种极其微弱的低水平发光(杨海莲等 2008)。其与生物系统的氧化代谢、细胞的分裂和死亡、光合作用以及生长发育的调控等许多基本的生命过程有着内在的联系(Costanzo 等 2008; Triglia 等 1998; Yan 等 2003)。

植物的UWL是发生在植物体内与其生命活动相耦联的超弱光子辐射, 反映了植物体内物质代谢和能量转化的活跃程度。虽然植物UWL的机制还不十分清楚, 但大量的实验表明: 植物的UWL与环境极为密切, 在不同的环境胁迫下有明显的变化。因此, 用UWL来评价植物的抗逆性具有一定的实际意义(Chen 等 2005b; Ohya 等 2002; Yu 等 2005)。目前, 虽然UWL分析技术在植物逆境生理研究中的应用还不十分广泛, 但其作为一个极其灵敏的检测方法, 与传统的检测方法相比, 它具有费用低、灵敏度高、操作简便和检验速度快等优点, 已成为植物逆境生理研究中的一个重要发展方向。本文介绍UWL技术在植物逆境生理研究中的应用进展。

1 UWL的检测技术

生物UWL检测技术是20世纪80年代后发展起来的一门新技术。其测量原理是将发光的生物或化学样品置于黑暗的环境中, 用灵敏度极高的光

探测器接收来自样品中的超微弱光, 将其转换成电信号, 再经电路放大, 用微机分析处理, 从而获得样品中系统的发光信息。由于生物超微弱发光的强度极其微弱, 所以必须使用背景噪声极低和探测灵敏度极高的光电探测仪器才能进行有效的探测。自从1954年Colli和Facchini研究小组用光电倍增管首次检测到了生物UWL之后, 许多国家的科学技术工作者也用不同型号的探测仪器对UWL进行了全面的研究。生物UWL的检测技术分为以下两类。

1.1 单光子计数技术 光子计数技术主要是基于光电倍增管的检测方法, 通过分辨单个光子在光电倍增管中激发出来的光电子脉冲, 把光信号从噪声中以数字化的方式提取出来; 因此, 具有极高的探测灵敏度、分辨率和长时间的稳定性。光电倍增管内有铯和铯制成的光电阴极, 它们能将射入的光子转换成光电子, 在一系列倍增极高压电场的作用下, 极微弱的光子最终变成数目猛增到十几万至亿倍以上的光电子群, 最后集中到电子收集极, 成为达到一定强度的电流而输出。这种电信号还要经过一系列电子仪器的逐渐放大, 再经过信息筛选和处理后定量记录下来, 这项技术可提供UWL总强度的时域信息(李富军和张新华 2006)。

收稿 2009-07-23 修定 2009-08-17

资助 国家自然科学基金(30571296, 30671471)和国家公益性行业科技项目(200803033)。

* 通讯作者(E-mail: pingshen@cau.edu.cn; Tel: 010-62737620)。

1.2 光子成像技术 自从上个世纪80年代末发明微通道板增强器以来,这种超高灵敏度的弱光图像探测技术得到了迅速的发展。德国的 Schauf 等(1992)采用光纤通道板像增强技术,最先获得黄瓜种子发芽的 UWL 图像。其后,奥地利的 Bernroider (1994)又观测到了栗树叶的 UWL 图像。Chen等(2003a)运用这一技术成功地观测到了大豆芽及其损伤后的发光图像。迄今,这项技术已广泛应用于多种领域中 UWL 的研究和分析测试工作(Makino 等 1996; Kobayashi 等 1999; Watanabe 等 2007)。

与单光子计数技术相比,光子成像技术能同时捕捉到生物超弱光子的时间和空间分布信息,可以更准确客观地反映生物体的代谢发光,这对探讨 UWL 产生的机制有一定的实用价值;但由于动植物的自发 UWL 强度很低,探测系统采集到的光电信号很弱。为了获得必要的信号强度必须进行长时间的信号积累或叠加,但与此同时也积累了背景噪声,以致 UWL 图象变得模糊不清。所以,需要通过像面增益修正、扣除光背景噪声并结合图像处理等技术,来提高测量系统的成像质量,以使所获得的 UWL 图像具有较低的噪声和较高的空间分辨率。

2 UWL与植物的逆境胁迫

2.1 UWL与干旱胁迫 对于生物UWL机制的认识,生物化学的观点认为,活性氧在生物体内的积累,其中羟自由基与细胞膜上多聚不饱和脂肪酸通过脂质过氧化连锁反应,形成单线态氧,处于激发态的单线态氧退激回到基态时即向外发射光子,形成 UWL,这就是 UWL 产生的“活性氧”机制(Boveris 等 1981; Chen 等 2002, 2003b)。许多研究表明,在干旱胁迫下植物的 UWL 强度低于正常供水的植株;胁迫程度越大,植物的 UWL 越弱(Ohya 等 2002; 汪沛洪和吕金印 1990)。在正常情况下,细胞内活性氧的产生与清除处于动态平衡状态;但在干旱胁迫下,这种平衡状态受到破坏,导致活性氧积累。按照 UWL 的“活性氧”机制,植物的 UWL 随着胁迫时间的延长而增强。不过,有些试验发现,植物的 UWL 并没有随活性氧的增加而增强(汪沛洪和吕金印 1990; 接玉玲等 2006)。我们在以 15% 聚乙二醇(PEG6000)溶液模拟干旱条件下处理平邑甜茶幼苗的试验中,也曾观察到幼苗的 UWL 并没有随活

性氧的增加而增强,而与幼苗体内 ATP 含量的变化非常相似(张新华等 2004b)。可见,从植物的组织和器官水平上来说,UWL 的活性氧机制并不完全适用。植物体中 UWL 的降低可能是由于较严重的干旱胁迫后,幼苗代谢发生紊乱,组织结构受到破坏,生长活力下降,从而导致 UWL 的减弱所致。

2.2 UWL与温度胁迫 杨妍妍等(2006)将高度耐热、中度耐热以及不耐热的 3 种大白菜幼苗进行高温处理后,观察到不同品种大白菜之间的 UWL 有明显差异。抗热性强的品种其 UWL 明显高于不耐热的品种。在高温胁迫过程中 3 个品种的 UWL 均呈现先上升后下降的趋势,并与幼苗体内的超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化趋势一致。杨海莲等(2008)的研究表明,15 °C 下的绿宝石喜林芋叶片的 UWL 明显高于 45 °C 和 50 °C 下的叶片。刘红梅等(2006)报道,小麦的未成熟籽粒经 45 °C 的热处理 60 min 和 90 min 后,其 UWL 明显增强,而且 UWL 的变化与种子体内蛋白质的质量分数呈显著正相关,也与过氧化氢酶和谷胱甘肽S-转移酶活性的增加有密切关系。

低温下 UWL 强度降低。低温下萌动 7~8 d 的玉米籽粒发光强度不及室温下的三分之一;同样的低温,抗寒品种的发光强度显著高于不抗寒品种(杨起简 1984)。李韶山等(2000)报道,萌发 48 h 的花生种子经 0 °C 低温处理 20 min 后的 UWL 急剧下降。李光等(2005)指出, UWL 衰减系数的变化可以反映植物叶片内各个组成部分之间的相互作用和相互联系的变化,特别是光合作用中的能量和电子传递的变化。15 °C 下的绿宝石喜林芋叶片的 UWL 衰减系数最大,衰减最慢;温度升高或降低时,衰减系数减小,衰减加快,这反映了 15 °C 下的叶片中各个组成部分之间的相互作用最强。

短时间的高温或低温胁迫能诱发植物体内抗冷或耐热蛋白的合成,激发体内防御体系的活性,加速单线态氧(1O_2)、超氧化物阴离子自由基(O_2^-)的产生和淬灭过程,这些应激反应可能会导致植物体 UWL 的短时增强(Miller 和 Mittler 2006; Chinnusamy 等 2003);但长时间的温度胁迫会严重影响植物的 RuBP 酶活性、光合效率、呼吸作用等诸多生理过程(Niu 等 2008; Bertamini 等 2005);甚至破坏叶中栅栏组织的超微结构,促进叶片的衰老,加快叶绿体和线粒体中亚细胞结构完整性的丧失,降低膜

脂以及其他关键分子的代谢和调节速率(杨春雪等 2008)。说明温度胁迫下, 植物UWL的变化乃是植物体内综合代谢过程的一个反应, UWL的变化规律似可作为温度胁迫植物研究中的一个敏感指标。

2.3 UWL与盐胁迫 盐胁迫是抑制植物生长, 降低农作物产量的众多环境因素之一。由于植物的抗盐性状涉及生理生化过程中的多种因素, 是一个多基因控制的极为复杂的反应过程; 因此, 植物对盐胁迫的反应机制非常复杂(Popova等 2008)。UWL的变化与盐胁迫时植物体内的生理生化反应密切相关, 所以采用这项技术可以分析盐胁迫对植物的生理作用, 搞清楚胁迫条件下植物体内的代谢变化规律。

曹晓兵等(2004)用不同浓度NaCl溶液处理绿豆种子后, 低盐溶液(0.01% NaCl)培养的绿豆种子萌发时的UWL比不用NaCl处理的高, 绿豆的生长速度也比其快; 而在较高浓度NaCl下, 绿豆胚根的生长受到明显抑制, UWL也随NaCl浓度的增加而显著下降, 并与SOD的活性呈极显著正相关。不同品种的紫花苜蓿在NaCl溶液胁迫下, UWL也有明显差异, 耐盐性强的品种其UWL明显高于耐盐性弱的品种(Zhou等 2008)。不但盐的浓度影响植物的UWL。无机离子的种类对植物的影响也可通过UWL的变化来观察。杨起简等(2001)研究不同钠盐影响豌豆种子萌发时UWL变化的结果表明, 在等渗条件下豌豆幼苗的UWL强度大小依序为 $\text{Na}_2\text{CO}_3 > \text{NaCl} > \text{Na}_2\text{SO}_4$; Na_2CO_3 对植物的伤害程度高于其他盐类。

植物盐害问题是复杂的, 盐胁迫下不同类型盐的溶解度、生理选择性吸收以及各种离子在植物体内的移动等都与盐胁迫有关。UWL变化反映的是植物对盐胁迫作出反应的实时的生理生化变化。低浓度盐可能会激发植物的代谢过程, 致使植物呼吸增强, 蛋白质合成受到促进, 植物的生理活动朝着有利于其适应盐胁迫的方向发展, 因而UWL增强; 但在高浓度盐下, 植物的呼吸作用受到伤害, 生长受到阻碍, 于是UWL降低。所以, 植物UWL的差异可以反映盐胁迫对植物代谢过程的影响情况。

2.4 UWL与金属离子胁迫 铝是环境污染中的金属元素之一。在酸性土壤中, 过量的铝离子作用于根细胞, 破坏细胞膜和细胞结构、损害线粒体的功能, 并与细胞内的DNA相互作用, 从而抑制植物的

生长和发育(Yamamoto等 2002; Achary等 2008)。Pan等(2004)报道, 经氯化铝处理后的大麦根的UWL有明显变化, 这种变化与铝对大麦根的毒害作用密切相关。镉是工业生产中的原料, 用量很大, 其所造成的土壤污染很严重。植物吸收和积累后, 细胞分裂和代谢活动受抑, 植物中UWL发生变化。有研究表明, 月季以镉处理后, 其叶片的UWL明显增强, 丙二醛含量增加, 超氧化物歧化酶活性下降, 外施氯化镉溶液可明显缓解镉对植株的伤害, 叶片的UWL也降低(魏振林等 2007)。所以采用UWL技术可以了解金属离子对植物的毒害情况。

2.5 UWL与植物衰老 衰老是指植物细胞、组织、器官或整体生命功能逐渐衰退的过程。植物衰老过程中叶片的光合作用下降、品质劣变、种子发芽率低等。逆境胁迫也诱发植物的衰老进程。UWL技术也可用于植物衰老过程的检测。

有研究表明, 不同生理阶段的植物叶片, 其UWL也有明显的差异。光合作用较强和新陈代谢旺盛的苹果与大光金鱼花等植物的成熟叶片的UWL较强; 光合作用和其他生理代谢过程相对较弱的叶片(老叶和幼叶), 其UWL强度较弱(李光等 2008; 赵占娟等 2007; 张新华 2004)。

植物叶片之外的其他器官在衰老过程中的UWL强度也有类似的变化。不同发育时期的杏花的UWL强度有差异。杏花开放初期(露萼期~露瓣期)UWL较低, 初花期的UWL迅速上升, 盛花期达到最高值, 以后随着杏花的衰老而下降(张新华等 2004c)。番茄果实的发光强度与其成熟度有关系; 成熟度较低, 器官分化、细胞分裂及呼吸作用强的UWL强度高; 进入红熟后期后, 新陈代谢和细胞分裂减弱, UWL也相应减弱(徐树来 2005)。苹果与桃在采后贮藏过程中, 随着果实的继续不断成熟, UWL逐渐增强, 在果实发生呼吸跃变时的UWL也达到峰值, 以后随着果实的衰老UWL也逐渐降低(张新华等 2003, 2004a)。

植物衰老期间常出现与正常生长阶段不同的生理生化变化。这些变化与植物体各个部分密切相关, 但每个部分的改变是不能全面反映出其整体衰老变化的, 仅可能从一个侧面反映出衰老的变化过程。UWL是植物整体生长发育特征的表现, 它可以反映细胞分裂、生长发育以及生物有序性的变化过程, 可以提供表征植物衰老变化的参数。

3 结束语

UWL作为生命过程的一个极其灵敏的指示器,已经越来越多地应用于植物逆境生理代谢的研究,而且会越来越引起人们的关注并得到广泛的应用,它的发展是令人鼓舞的;但也应该看到,其在植物逆境生理研究中还有许多问题没有解决。

目前的研究只注意逆境下植物的UWL变化,对UWL变化的解释也只是一些推测。其来源还不能精确定位。所以,今后不但要从生理水平,还应从亚细胞水平、以致分子水平上探索UWL的变化,这对揭示生命现象的物理本质以及其在农业、医学、食品和环境科学研究中的应用都有意义(Chung等2004; Chen等2005a; Kim等2005)。

UWL与植物逆境生理代谢的关系,迄今还只停留于定性关系的研究。UWL的变化还不能精确地判断植物受逆境胁迫的程度及其体内的代谢状况。从量子学角度看,UWL的光子统计应该包含着丰富的生物学信息,根据不同程度逆境胁迫下的植物UWL与生理生化代谢的测定的结果,建立两者之间的定量关系,这样,只要测出UWL的变化,就可了解植物体内的生理代谢状况和其受逆境胁迫的程度。

UWL在植物中的研究范围比较窄,大多集中在大田作物上,而在林木与果树中的研究比较少;而且,有些逆境条件下的植物尚未用过,如冻害、涝害、病虫害以及CO₂胁迫等。Wijk(2001)指出,UWL不仅可以作为植物生理和生化变化的灵敏指标,而且还可控制细胞内和细胞间的信息传递和功能调节。所以,探讨UWL在多种植物中的作用以及各种环境因素(物理的、化学的、生物的)对UWL的影响,即有可能揭示逆境影响植物代谢变化的本质,进而人为地调节UWL以实现对植物生命过程的控制。

生物UWL检测所面临的困难就是它的低强度和对许多物理和化学因素的敏感性。以前人们总认为UWL的应用范围相当有限,但现在已可通过许多技术来改进生物UWL的检测。如采用增加致冷器,可降低光电倍增管的局部温度,以得到更低的噪声本底;此外,还开发了多个样品同步测量装置,以适应不同处理样品测量中的同步性要求;还有通过增加控温装置,以降低温度对样品UWL的影响,以及加装滤色片的抽屉板和干涉滤色片,对

样品的发光光谱进行分析等(Tudisco等2004)。通过一系列的改进措施,可减少系统的误差,保证数据的可靠性,从而有利于系统模型的选择。

参考文献

- 曹晓兵,李光,廖祥儒,杨海莲,徐景智(2004). 盐胁迫下绿豆幼苗的超微弱发光. 热带亚热带植物学报, 12 (3): 261~264
- 接玉玲,赵海洲,张伟,杨洪强,李德全,束怀瑞(2006). 甜菜碱对于旱胁迫下湖北海棠超微弱发光及抗氧化能力的影响. 应用生态学报, 17 (12): 2394~2398
- 李富军,张新华(2006). 微弱发光技术在农产品检测中的应用研究进展. 农业工程学报, 22 (12): 260~264
- 李光,杨海莲,陈静伟(2005). 温度对叶片延迟发光的影响. 河北大学学报(自然科学版), 25 (1): 25~28
- 李光,赵占娟,焦小雪,刘品(2008). 叶片衰老过程中的光子计数统计实验研究. 河北大学学报(自然科学版), 28 (4): 360~364
- 李韶山,王艳,郭周义(2000). 萌花生种子超弱发光的研究. 光子学报, 29 (11): 966~969
- 刘红梅,廖祥儒,吴立峰,蒋继志(2006). 热休克对小麦未成熟种子萌发、生物发光和抗氧化酶活性的影响. 食品与生物技术学报, 25 (3): 75~78
- 汪沛洪,吕金印(1990). 利用生物超弱发光鉴定抗旱性的小麦品种初探. 生物化学与生物物理进展, 17 (5): 399~400
- 魏振林,苏亚南,焦传珍,姚翠鸾(2007). 镧对镧胁迫下月季叶片超弱发光的影响. 安徽农业科学, 35 (32):10213~10214, 10219
- 徐树来(2005). 不同成熟期番茄及其储藏过程中超弱发光特性的研究. 食品科学, 26 (9): 539~541
- 杨春雪,卓丽环,柳参奎(2008). 植物显微及超微结构变化与其抗逆性关系的研究进展. 分子育种, 6 (2): 341~346
- 杨海莲,王红梅,于家峰,李光,王吉华(2008). 温度胁迫对叶片超弱发光的影响. 四川师范大学学报(自然科学版), 31 (4): 468~470
- 杨起简(1984). 玉米籽粒超弱发光及其抗冷性研究. 生物化学与生物物理进展, (2): 37~41
- 杨起简,周禾,Погосян СИ (2001). 盐胁迫下豌豆幼苗的超弱发光. 激光生物学报, 10 (4): 265~268
- 杨妍妍,杨建平,王清华(2006). 高温胁迫对大白菜超微弱发光及其他生理指标的影响. 西北农业学报, 15 (5): 218~221
- 张新华(2004). 苹果与桃杏超微弱发光及其生理生化机制[硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学
- 张新华,李富军,杨洪强,王相友(2004a). 苹果成熟过程中超弱发光强度与果实跃变的关系. 农业机械学报, 35 (6): 215~217
- 张新华,杨洪强,李富军(2003). 肥城佛桃果实软化过程中的超弱发光及其与乙烯释放的关系. 植物生理与分子生物学学报, 29 (4): 353~356
- 张新华,杨洪强,李富军(2004b). 水分胁迫下苹果幼苗超弱发光及一些生理特性的变化. 西北植物学报, 24 (4): 720~724
- 张新华,杨洪强,李富军,张伟(2004c). 杏花开放过程中超弱发光和ATP及活性氧含量的变化. 植物生理与分子生物学学报, 30 (1): 41~44
- 赵占娟,李光,闫冰(2007). 大光金鱼花不同叶位叶片超微弱发光的光子计数统计. 植物生理学通讯, 43 (5): 909~912
- Achary VMM, Jena S, Panda KK, Panda BB (2008). Aluminium

- induced oxidative stress and DNA damage in root cells of *Allium cepa* L. *Ecotoxicol Environ Safety*, 70 (2): 300~310
- Bernroeder G (1994). Processing biological images from very low light emissions. *J Biolumines Chemilumines*, 9 (3): 127~133
- Bertamini M, Muthuchelian K, Rubinigg M, Zorer R, Nedunchezian N (2005). Low-night temperature (LNT) induced changes of photosynthesis in grapevine (*Vitis vinifera* L.) plants. *Plant Physiol Biochem*, 43 (7): 693~699
- Boveris A, Cadenas E, Chance B (1981). Ultraweak chemiluminescence: A sensitive assay for oxidative radical reactions. *Fed Proc*, 40 (2): 125~128
- Chen WL, Van Wijk R, Xing D (2005a). Effects of isoflurane on measurements of delayed luminescence in *Acetabularia acetabulum*. *Luminescence*, 20 (1): 16~19
- Chen WL, Xing D, Tan SC, Tang YH, He YH (2003a). Imaging of ultraweak bio-chemiluminescence and singlet oxygen generation in germination soybean in response to wounding. *Luminescence*, 18 (1): 37~41
- Chen WL, Xing D, Chen WG (2005b). Rapid detection of *Aspergillus flavus* contamination in peanut with novel delayed luminescence spectra. *Photochem Photobiol*, 81 (6): 1361~1365
- Chen WL, Xing D, He YH (2002). Determination the vigor of rice seed with different degrees of aging with ultraweak chemiluminescence during early imbibition. *Acta Bot Sin*, 44 (11): 1376~1379
- Chen WL, Xing D, Wang J, He YH (2003b). Rapid determination of rice seed vigor by spontaneous chemiluminescence and singlet oxygen generation during early imbibition. *Luminescence*, 18 (1): 19~24
- Chinnusamy V, Ohta M, Kanrar S, Lee BH, Hong XH, Agarwal M, Zhu JK (2003). ICE1: a regulator of cold-induced transcriptome and freezing *Arabidopsis* tolerance in *Arabidopsis*. *Gene Dev*, 17 (8): 1043~1054
- Chung HW, Delincee H, Han SB, Hong JH, Kim HY, Kim MC, Byun MW, Kwon JH (2004). Trials to identify irradiated chestnut (*Castanea bungeana*) with different analytical techniques. *Radiat Phys Chem*, 71 (1): 179~182
- Colli L, Facchini U (1954). Light emission by germinating plants. *Nuovo Cimento*, 12 (1): 150~155
- Costanzo E, Gulino M, Lanzano L, Musumeci F, Scordino A, Tudisco S, Sui L (2008). Single seed viability checked by delayed luminescence. *Euro Biophys J*, 37 (2): 235~238
- Kim HW, Sim SB, Kim CK, Kim J, Choi C, You H, Soh KS (2005). Spontaneous photon emission and delayed luminescence of two types of human lung cancer tissues: Adenocarcinoma and Squamous cell carcinoma. *Cancer Lett*, 229 (2): 283~289
- Kobayashi M, Takeda M, Ito KI, Kato H, Inaba H (1999). Two-dimensional photon counting imaging and spatiotemporal characterization of ultraweak photon emission from a rat's brain *in vivo*. *J Neurosci Meth*, 93 (2): 163~168
- Makino T, Kato K, Lyozumi H, Honzawa H, Tachiri Y, Hiramatsu M (1996). Ultraweak luminescence generated by sweet potato and *Fusarium oxysporum* interactions associated with a defense response. *Photochem Photobiol*, 64 (6): 953~956
- Miller G, Mittler R (2006). Could heat shock transcription factors function as hydrogen peroxide sensors in plants? *Ann Bot*, 98 (2): 279~288
- Niu SL, Li ZX, Xia JY, Han Y, Wu MY, Wan SQ (2008). Climatic warming changes plant photosynthesis and its temperature dependence in a temperate steppe of northern China. *Environ Exp Bot*, 63 (1): 91~101
- Ohya T, Yoshida S, Kawabata R, Okbae H, Kai S (2002). Biophoton emission due to drought injury in red beans: Possibility of early detection of drought injury. *Jpn J App Phys*, 41 (7): 4766~4771
- Pan JW, Zheng K, Ye D, Yi HL, Jiang ZM, Jing CT, Pan WH, Zhu MY (2004). Aluminum-induced ultraweak luminescence changes and sister-chromatid exchanges in root tip cells of barley. *Plant Sci*, 167 (6): 1391~1399
- Popova OV, Yang O, Dietz KJ, Gollack D (2008). Differential transcript regulation in *Arabidopsis thaliana* and the halotolerant *Lobularia maritima* indicates genes with potential function in plant salt adaptation. *Gene*, 423 (2): 142~148
- Schauf B, Repas LM, Kaufmann R (1992). Localization of ultraweak photon emission in plants. *Photochem Photobiol*, 55 (2): 287~291
- Triglia A, Lamalfa G, Musumeci F, Leonardi C, Scordino A (1998). Delayed luminescence as an indicator of tomato fruit quality. *J Food Sci*, 63 (3): 512~515
- Tudisco S, Scordino A, Privitera G, Baran I, Musumeci F (2004). ARETUSA—advanced research equipment for fast ultraweak luminescence analysis: new developments. *Nucl Inst Meth Phys Res A*, 518 (2): 463~464
- Watanabe W, Shimada T, Matsunaga S, Kurihara D, Fukui K, Ichi S, Tsutsumi N, Isobe K, Itoh K (2007). Single-organelle tracking by two-photon conversion. *Opt Express*, 15 (5): 2490~2498
- Wijk RV (2001). Bio-photons and bio-communication. *J Sci Explor*, 15 (2): 183~197
- Yamamoto Y, Kobayashi Y, Devi SR, Rikiishi S, Matsumoto H (2002). Aluminum toxicity is associated with mitochondrial dysfunction and the production of reactive oxygen species in plant cells. *Plant Physiol*, 128 (1): 63~72
- Yan Y, Popp FA, Rothe GM (2003). Correlation between germination capacity and biophoton emission of barley seeds (*Hordeum vulgare* L.). *Seed Sci Technol*, 31 (2): 249~258
- Yu Y, Popp FA, Sigrist S, Schlesinger D, Dolf A, Yan Z, Cohen S, Chotia A (2005). Further analysis of delayed luminescence of plants. *J Photochem Photobiol B-Biol*, 78 (3): 235~244
- Zhou H, Yang Q, Ji Q (2008). Study on superweak luminescence and salt tolerance in alfalfa. *Luminescence*, 23 (2): 112