

doi:10.3788/gzxb20154404.0417002

NaN₃ 对玉米萌发过程中超弱光子辐射的影响

赵燕燕, 习岗, 刘锴, 贺瑞瑞

(西安理工大学 应用物理系, 西安 710048)

摘 要:为了解读植物种子萌发过程中超弱光子辐射信息的生物学意义,采用呼吸抑制剂 NaN₃ 处理萌发玉米种子,跟踪测量和分析了玉米种子萌发过程中超弱光子辐射中自发光子辐射和外界光诱导的延迟光子辐射的变化规律,同时研究了萌发玉米种子鲜质量的变化. 结果发现,NaN₃ 同步抑制了萌发玉米自发光子辐射和鲜质量的生长,造成萌发玉米延迟光子辐射的初始光子数和延迟光子辐射积分强度大幅度降低,相干时间减小. 机理分析表明,NaN₃ 对呼吸代谢电子传递链的抑制造成的自由基反应减弱是萌发玉米自发光子辐射减小的原因,自发光子辐射强度可以作为玉米萌发状态的信号,延迟光子辐射动力学参数的大小可以表征萌发玉米呼吸代谢的强弱,相干时间是种子细胞组织序性的量度,通过对萌发种子超弱光子辐射的采集和分析可以实现对萌发种子细胞代谢和功能状态变化的灵敏和无损检测.

关键词: 超弱光子辐射; 种子萌发; 呼吸抑制剂; 细胞代谢; 无损检测; 玉米

中图分类号: O482.31; Q632

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2015)04-0417002-6

Effect of NaN₃ on Ultra-weak Photon Emission during Germination of Corn

ZHAO Yan-yan, XI Gang, LIU Kai, HE Rui-rui

(Department of Applied Physics, Institute of Science, Xian University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to interpret the biological significance of ultra-weak photon emission during germination of plant seed, respiratory inhibitors NaN₃ was used to treat germinating corn seed, spontaneous photon emission and delayed photon emission during germination of corn were tracked to measure and analyze, and the change of fresh quality of germinating corn was studied. The results showed that NaN₃ inhibited the increase in spontaneous photon emission and fresh quality of germinating corns, caused a significant reduction in initial photon number and integral strength of delayed photon emission, the coherence time of delayed photon emission was also reduced. Mechanism analysis showed that the reduction of free radical reactions from respiratory electron transport chain caused by NaN₃ was the reason about decrease of spontaneous photon emission in germinating corn, spontaneous photon emission intensity in germinating corn could be used as a signal to express the germination state of corn, the kinetic parameters of delayed photon emission could represent the strength of the respiratory metabolism during germination of corn, and coherence time could be used to measure the order of cell organization. Such, sensitive and non-destructive testing about the change of cell metabolism and functional status during seed germination could be realized through the collection and analysis of the ultra-weak photon emission in germinating seed.

Key words: Ultra-weak photon emission; Seed germination; Respiratory inhibitor; Cell metabolism; non-destructive testing ;Corn

OCIS Codes: 170.0170; 170.1420; 160.1435

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 51277151, 31471412)和西安理工大学科技创新计划项目(No. 2013CX019)资助

第一作者: 赵燕燕(1989-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生物光子学. Email: zhaoyan5416@163.com

导 师: 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: 2014-09-22; **录用日期:** 2014-11-05

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

0 引言

生物超弱光子辐射分为自发光子辐射 (Spontaneous photon emission) 和延迟光子辐射 (Delayed biophoton emission), 是生物系统的一种普遍现象. 自发光子辐射与生物体内的细胞分裂、细胞死亡、光合作用、生物氧化、解毒作用、肿瘤发生、细胞内和细胞间的信息传递及功能调节等重要的生命过程密切相关^[1-3]; 延迟光子辐射与生物系统的功能状态有关, 是细胞生理状态的灵敏指标, 可用于评价植物系统的功能状态和对环境污染的检测^[4-6]. 因此, 生物超弱光子辐射的研究可以为分析和判断细胞代谢及其功能状态变化提供一种非侵入性的光学活检技术^[7]. 在农业方面, 超微弱光子辐射已经应用于监测植物对病原体^[8]、淹水^[9]、干旱^[10]、盐胁迫^[11]、除草剂^[12]和紫外线 A (Ultra Violet A, UVA) 辐射^[13] 的反应, 表现出巨大的应用潜力.

对植物种子萌发过程中的超弱光子辐射研究具有重要意义, 通过对种子萌发过程中超弱光子辐射的解读有望实现对萌发种子生理代谢和细胞功能状态的动态检测, 进而对种子萌发期的抗逆性作出评价. 目前, 有关植物种子萌发过程中超弱光子辐射的研究已有报道, 研究涉及花生^[14]、豇豆^[2]、大豆^[3]、红豆^[10]、豌豆^[15]和玉米^[16]等, 但是这些研究大多是现象描述, 缺乏对种子萌发过程中超弱光子辐射机理及其所隐含的生命信息的深入研究, 制约了相关技术的发展.

NaN_3 是呼吸代谢的抑制剂, 对种子萌发有强烈的抑制作用^[17], 研究 NaN_3 对萌发种子超弱光子辐射的影响有助于了解种子萌发过程中超弱光子辐射的机理. 本文以玉米为材料, 研究了 NaN_3 作用下玉米萌发过程中自发光子辐射和延迟光子辐射的生物学意义, 为开发基于萌发种子生理代谢和细胞功能状态无损检测与评价的新技术奠定基础.

1 材料与方 法

1.1 材料培养与处理

供试材料为万瑞 168 号玉米种子. 选取 120 粒大小、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, 均匀放置在铺有滤纸的培养皿中, 加适量蒸馏水, 在 25 °C 环境下恒温避光培养, 每天定时加入定量蒸馏水.

在预备实验中发现 650 ppm 的 NaN_3 溶液完全抑制了玉米种子的萌发, 因此, 采用 650 ppm 的 NaN_3 溶液处理萌发玉米种子^[17]. 在种子萌发三天时加入 NaN_3 溶液, 前三天测量随机选取的 7 粒种子的数据, 设五个重复; 第三天加入呼吸胁迫后, 处理组除用 NaN_3 溶液处理外, 其他条件均相同, 对照组和处理组

各设 5 个重复, 跟踪测量每组中 7 粒种子的数据.

1.2 种子鲜质量的测量

从种子培养当天开始 (设为 0 点), 每天定时随机测量 7 粒萌发玉米种子的鲜质量一次, 设 5 组重复, 取平均, 连续测量 5 次. 从第 4 天开始, 分别跟踪测量对照组和处理组的萌发种子鲜质量, 对各组取平均, 再连续测量 5 天.

1.3 自发光子辐射的测量

自发光子辐射的测量采用 BPCL 型微弱发光测量仪 (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, 工作电压为 -1 000 V, 样品室的环境温度设为 25 °C, 每次测量前都测定 1 次本底, 并减去本底. 用滤纸吸干种子表面液体后放入样品室暗处理 5 min, 每天测定样品的自发发光. 根据测量系统样品杯的大小, 在未加入呼吸抑制剂的前三天, 随机选取玉米种子 5 组, 每组 7 粒, 分别进行测量; 在加入呼吸抑制剂后, 分别对处理组 and 对照组每组中 7 粒种子进行跟踪测量. 单位时间的光子数为自发发光强度, 用 I_{SL} 表示, 单位为 counts/s. 处理前每天测量的 7 粒玉米种子的自发发光, 取 5 个重复组的平均值, 处理后每天测量对照组和处理组的 7 粒玉米种子的自发发光, 分别取各组中 5 个重复的平均值.

1.4 延迟光子辐射的测量

从种子培养开始, 每天定时测量萌发玉米种子的延迟光子辐射. 延迟光子辐射的测量采用自制的测量系统, 仪器组成和测量方法参照文献^[18]. 测量前仪器预热 1 h, 使本底稳定. 测量时每次取种子 7 粒, 用滤纸吸干表面溶液, 放入样品室, 设置光照时间为 30 s, 测量时间为 60 s, 采集数据间隔为 1 s, 工作电压为 -1 000 V, 样品室温度保持 25 °C, 每次测量前先测本底, 并减去本底. 呼吸胁迫处理前每天随机测 5 组样品, 每组重复 3 次, 取平均值; 处理后每天分别跟踪测量对照组和处理组中的五组, 且每组重复 3 次, 取平均值.

1.5 延迟光子辐射的动力学分析

参照文献^[19-21]的分析方法, 延迟光子辐射动力学曲线拟合为

$$I(t) = I_{\text{SL}} + \frac{I_0}{\left(1 + \frac{t}{\tau}\right)^\beta} \quad (1)$$

式中, t 为测量时间 (单位: s), I_0 为初始光子数 (单位: counts/s), τ 称相干时间, β 为衰减常量, I_{SL} 为单位时间的自发光子辐射. 延迟光子辐射积分强度 (即延迟光子辐射曲线下的面积) 可由式 (1) 积分得到

$$I(T) = I_{sl} T + \frac{\tau I_0}{\beta - 1} \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{T}{\tau}\right)^{\beta - 1}} \right] \quad (2)$$

式中, T 为测量周期, 在本文中 $T = 60$ s.

2 结果与分析

2.1 NaN₃ 溶液对玉米萌发过程中鲜质量的影响

图 1 为萌发过程中经过 NaN₃ 处理的处理组和未经 NaN₃ 处理的对照组玉米种子鲜质量的变化情况, 可以看出, 对照组玉米种子鲜质量随着萌发时间一直处于增长的态势, 在第 3 天加入 NaN₃ 溶液后, 处理组种子鲜质量不再增加, 表明 NaN₃ 溶液完全抑制了玉米种子的萌发.

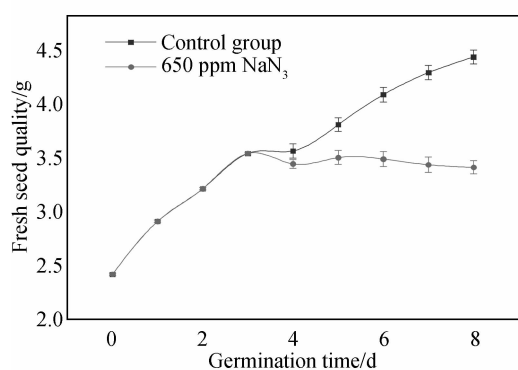


图 1 NaN₃ 对萌发玉米种子鲜质量的影响

Fig. 1 Effect of NaN₃ on the fresh quality of germinating corn

2.2 NaN₃ 对萌发玉米自发光子辐射的影响

NaN₃ 溶液对玉米萌发过程中自发光子辐射的影响见图 2. 在图 2 中, 随着萌发时间的进行, 对照组玉米种子的自发光子辐射强度逐渐增长, 经过 NaN₃ 处理的处理组, 从加入 NaN₃ 的当天开始, 自发光子辐射强度呈现出逐渐下降的趋势, 表明 NaN₃ 对玉米种子萌发过程中自发光子辐射的增长有明显的抑制作用.

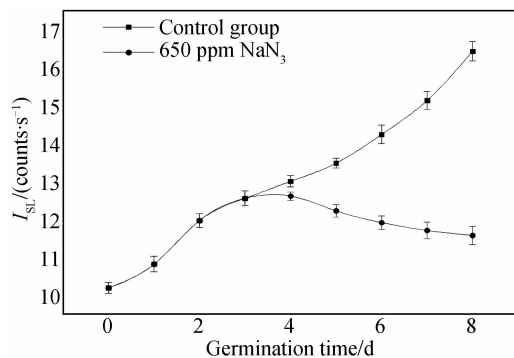


图 2 NaN₃ 对玉米萌发过程中自发光子辐射的影响

Fig. 2 Effect of NaN₃ on the spontaneous photon emission of germinating corn

2.3 NaN₃ 对萌发玉米种子延迟光子辐射的影响

图 3 为对照组和经过 NaN₃ 处理的处理组玉米萌

发过程中每天的延迟光子辐射. 由图 3 可见, 萌发玉米的延迟光子辐射呈现出随时间衰减的特征, 其衰减过程可延迟到数十秒的时间.

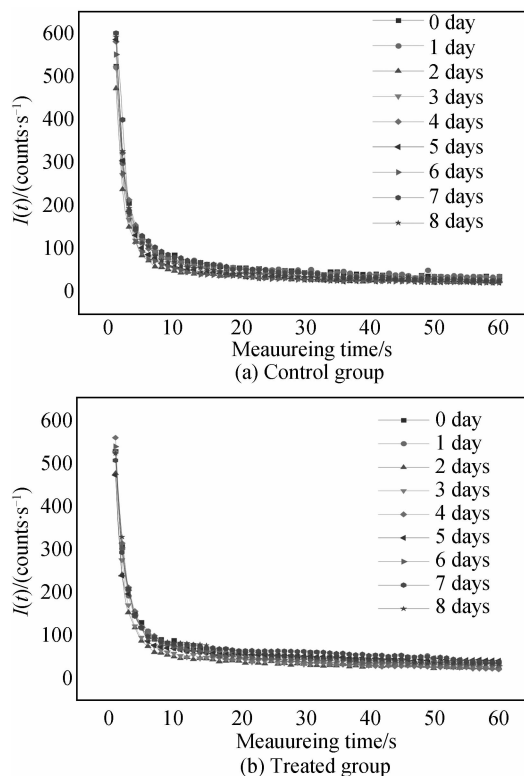


图 3 对照组与处理组玉米种子萌发过程中的延迟光子辐射

Fig. 3 The delayed photon emission of control group and treatment group during germination of corn

为了定量分析图 3 中各延迟光子辐射曲线的特征及差异, 将其按照式(1)拟合, 得到的各曲线的延迟光子辐射动力学参数见表 1 和表 2. 由表 1 和表 2 可见, 各曲线的拟合优度都在 0.99 以上, 说明基于表 1 和表 2 中的各动力学参数的动力学方程描述了图 3 中各延迟光子辐射动力学曲线的行为.

表 1 对照组萌发玉米延迟光子辐射动力学参数

Table 1 Delayed photon emission kinetic parameters of control group during germination of corn

Germination time/d	$I_{sl}/$	$I_0/$	τ/s	β	Fit goodness
0	10.19	2 136.10	0.33	1.22	0.997
1	10.82	2 196.98	0.36	1.37	0.995
2	11.97	2 295.05	0.38	1.40	0.994
3	12.56	2 401.23	0.40	1.41	0.999
4	13.01	2 653.17	0.42	1.46	0.995
5	13.49	2 671.39	0.42	1.45	0.993
6	14.25	2 743.15	0.46	1.46	0.993
7	15.15	2 769.31	0.51	1.48	0.997
8	16.45	2 807.28	0.53	1.50	0.992

表 2 NaN_3 处理组萌发玉米延迟光子辐射动力学参数
Table 2 Delayed photon emission kinetic parameters of NaN_3 treatment group during germination of corn

Germination time/d	$I_{SL}/$	$I_0/$	τ/s	β	Fit goodness
0	10.19	2 136.10	0.33	1.22	0.997
1	10.82	2 196.98	0.36	1.37	0.995
2	11.97	2 295.05	0.38	1.40	0.994
3	12.56	2 401.23	0.40	1.41	0.999
4	12.62	2 093.93	0.38	1.41	0.997
5	12.23	2 024.00	0.39	1.36	0.996
6	11.92	2 087.09	0.40	1.31	0.991
7	11.71	2 011.95	0.40	1.31	0.999
8	11.58	1 993.06	0.41	1.28	0.994

为了清楚表示萌发玉米延迟光子辐射动力学参数的变化规律,将表 1 和表 2 中延迟光子辐射动力学参数初始光子数 I_0 、相干时间 τ 的变化分别用图 4 和图 5 表示. 由图 4 可见,对照组的延迟光子辐射的初始光子数 I_0 随萌发时间逐渐增大,而处理组延迟光子辐射初始光子数 I_0 则在加入 NaN_3 后迅速降低. 图 5 显示,在玉米萌发过程中延迟光子辐射动力学参数相干时间 τ 也随萌发时间呈现出增长的趋势,但是在 NaN_3 作用下 τ 值明显减小,此后 τ 值呈现出小幅震荡的趋势.

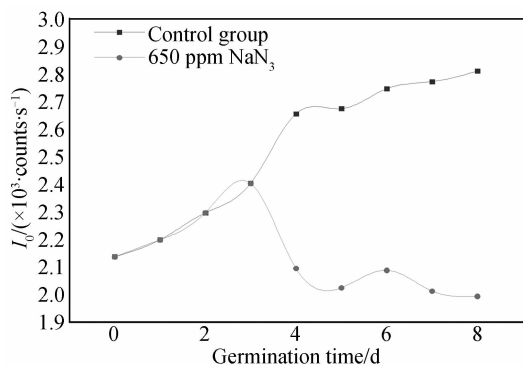


图 4 NaN_3 对萌发玉米延迟光子辐射初始光子数的影响
Fig. 4 Effect of NaN_3 on the initial photon number of delayed photon emission of germinating corn

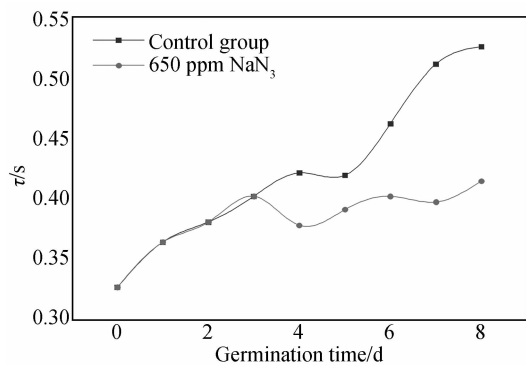


图 5 NaN_3 对萌发玉米延迟光子辐射相干时间的影响
Fig. 5 Effect of NaN_3 on the coherence time of delayed photon emission of germinating corn

2.4 NaN_3 对萌发玉米延迟光子辐射积分强度的影响

延迟光子辐射曲线下的面积称为延迟光子辐射积分强度,其数值可由式(2)求出. 将表 1 和表 2 中的各动力学参数带入式(2),可以得到图 3 中各延迟光子辐射积分强度,结果如图 6. 由图 6 可见,对照组玉米在萌发过程中延迟光子辐射积分强度呈现出增长的趋势,从第 3 天加入 NaN_3 开始延迟光子辐射积分强度迅速下降,并在处理 48 h 时达到最低点,此后有所升高,但仍明显低于对照组. 在整个 NaN_3 胁迫过程中,延迟光子辐射积分强度也呈现出波动的变化特征.

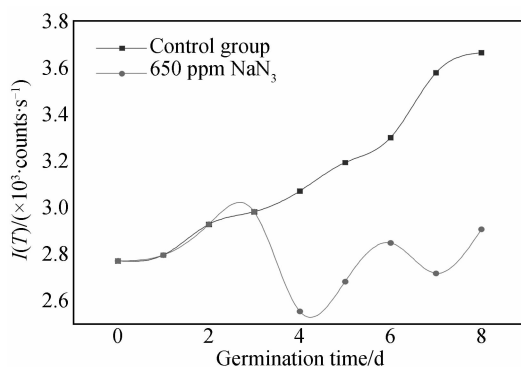


图 6 NaN_3 对萌发玉米延迟光子辐射积分强度的影响
Fig. 6 Effect of NaN_3 on the integral strength of delayed photon emission of germinating corn

3 讨论

在种子萌发过程中,随着种子吸水膨胀,DNA 合成反应被启动,各种水解酶和生物分子大量合成,种子鲜质量逐渐增加,因此,种子鲜质量代表了种子的萌发状态. 由于呼吸作用是物质和能量代谢的核心,对呼吸作用的抑制必然导致萌发状态和鲜质量增加的停滞. NaN_3 是呼吸抑制剂,其阻断线粒体呼吸电子传递链中的电子传递,抑制线粒体吸收 O_2 ^[22-23],因此阻断了种子的萌发过程. 实验中,在萌发 3d 时施加 NaN_3 ,种子鲜质量不再增加就证明了这一点.

随着玉米种子的萌发进程,自发光子辐射呈现出增长的态势, NaN_3 抑制了自发光子辐射的增长(见图 2). 由于 NaN_3 对自发光子辐射的抑制与对鲜质量增加的抑制是同步的(见图 1),表明自发光子辐射可以作为萌发状态的信号,通过对其的测量可以实现对种子萌发状态的无损检测.

在呼吸代谢中,呼吸电子传递链的电子漏(Electron leak)会直接还原氧生成超氧阴离子(O_2^-), O_2^- 可以产生羟自由基 $\text{OH}\cdot$,还可与 H^+ 结合生成 $\text{HOO}\cdot$ 自由基,这些自由基经过重组、裂解、歧化等一系列反应生成处于三重激发态的过氧化物,或者单线态氧和激发态羰基,后者经过退激后产生光子辐射^[3,24]. 因此,种子萌发过程中的自发光子辐射主要来

自于呼吸代谢相偶联连的自由基反应,NaN₃对呼吸的抑制必然导致自由基反应减弱,造成自发光子辐射的减小。

延迟光子辐射也称延迟发光(Delayed luminescence),它是各种细胞和组织在白光或单色光照射后长时间的发光现象,其强度明显比荧光和磷光要低,弛豫时间比荧光要长^[25-26]。由于延迟光子辐射来源于与组织结构性质密切相关的相互协作的电子态激发和衰变,非常长的衰减时间反映了与空间结构序性相关的分子水平^[27],通过对延迟光子辐射的分析可以获知细胞或组织的能量水平、生理状态和系统序性的信息。

本文研究发现,和对照组相比较,NaN₃造成了萌发玉米延迟光子辐射的初始光子数大幅度降低(见图4)。根据式(1),初始光子数 I_0 是激发光停止时的辐射强度,在特定光照下,其与此处于激发态的分子数有关,呼吸代谢越旺盛,处于高能激发态的分子数越多, I_0 就越大。因此, I_0 的大小表征了细胞或者组织呼吸代谢的强弱^[28]。在玉米萌发过程中,NaN₃通过阻碍电子传递链抑制了呼吸代谢中糖酵解/三羧酸循环(EMP/TCA),造成三磷酸腺苷(ATP)的缺乏,这种代谢强度的降低必然导致 I_0 的减小。至于图4中6d时 I_0 出现了一个小峰,是萌发种子对NaN₃作用的适应性反应,因为在种子萌发过程中,EMP/TCA的抑制会造成磷酸戊糖途径(PPP)的激活,维持种子的有氧呼吸^[29-30]。

在延迟光子辐射动力学分析中,相干时间 τ 是一个重要的特征参数。当处于激发态的分子关联性越好时, τ 就越大。因此, τ 值可以作为组织序性的量度^[27]。在NaN₃作用下,萌发玉米种子的 τ 值迅速减小,此后出现了低于对照的小幅波动(见图5)。该结果表明,NaN₃作用对呼吸电子传递链的抑制所带来的代谢紊乱是组织序性降低的成因。图4和图5中 I_0 和 τ 值的下降和波动是同步的,说明组织序性的降低必然带来代谢强度的下降。

延迟光子辐射的特征是通过延迟光子辐射积分强度 $I(T)$ 来表征。本文中,NaN₃作用下萌发玉米延迟光子辐射积分强度 $I(T)$ 的变化与初始光子数 I_0 的变化是一致的(见图6)。因此,玉米种子萌发过程中的 $I(T)$ 或者 I_0 都表征了种子萌发过程中呼吸代谢的强弱。

4 结论

本文采用呼吸抑制剂NaN₃,分别研究了萌发玉米自发光子辐射和外界光诱导的延迟光子辐射的生物学意义。结果表明,NaN₃对玉米萌发过程中的鲜质量和自发光子辐射的增长有同步的抑制作用,玉米种子萌发过程中的自发光子辐射来自于呼吸代谢相偶联连的

自由基反应,自发光子辐射可以作为玉米萌发状态的信号。研究还发现,NaN₃造成了萌发玉米延迟光子辐射动力学参数中初始光子数 I_0 和延迟光子辐射积分强度 $I(T)$ 大幅度降低,相干时间 τ 减小, I_0 或者 $I(T)$ 的大小表征玉米萌发过程中呼吸代谢的强弱, τ 的减小表征了种子细胞或组织序性降低,NaN₃作用对呼吸电子传递链的抑制所带来的代谢紊乱是组织序性降低的成因。通过对萌发玉米自发光子辐射强度和延迟光子辐射动力学参数的分析可以实现对萌发种子细胞代谢和状态变化的灵敏和无损检测。

参考文献

- [1] HOSSU M, MA L, CHEN W. Nonlinear enhancement of spontaneous biophoton emission of sweet potato by silver nanoparticles [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2010, **99**(1): 44-48.
- [2] KOBAYASHI M, SASAKI K, ENOMOTO M, et al. Highly sensitive determination of transient generation of biophotons during hypersensitive response to cucumber mosaic virus in cowpea [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2007, **58**(3): 465-472.
- [3] KOMATSU S, HENA A, KAMAL M, et al. Ultra-weak photon emission and proteomics analyses in soybean under abiotic stress [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 2014, **1844**(04): 1208-1218.
- [4] YAN Y, POPP F A, ROTHE G M. Correlation between germination capacity and biophoton emission of barley seeds [J]. *Seed Science and Technology*, 2003, **31**(2): 249-258.
- [5] COSTANZO E, GULINO M, LANZANÖL, et al. Single seed viability checked by delayed luminescence [J]. *European Biophysics Journal with Biophysics Letters*, 2008, **37**(2): 235-238.
- [6] SCORDINO A, MUSUMECI F, GULINO M, et al. Delayed luminescence of microalgae as indicator of metal toxicity [J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2008, **41**(15): 155507.
- [7] CHANG J J. Physical properties of biophotons and their biological functions [J]. *Indian Journal of Experimental Biology*, 2008, **46**(5): 371-377.
- [8] MANSFIELD J W. Biophoton distress flares signal the onset of the hypersensitive reaction [J]. *Trends in Plant Science*, 2005, **10**(7): 307-309.
- [9] KHATOON A, REHMAN S, HIRAGA S, et al. Organ-specific proteomics analysis for identification of response mechanism in soybean seedlings under flooding stress [J]. *Journal of Proteomics*, 2012, **75**(18): 5706-5723.
- [10] OHYA T, YOSHIDA S, KAWABATA R, et al. Biophoton emission due to drought injury in red beans: possibility of early detection of drought injury [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2002, **41**(7A): 4766-4771.
- [11] OHYA T, KURASHIGE H, OKABE H, et al. Early detection of salt stress damage by biophotons in red bean seedling [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, **39**(6A): 3696-3700.
- [12] INAGAKI H, ISHIDA Y, UCHINO A, et al. Difference in ultra-weak photon emissions between sulfonylurea-resistant and sulfonylurea-susceptible biotypes of scirpus juncoides following the application of a sulfonylurea herbicide [J]. *Weed Biology and Management*, 2008, **8**(2): 78-84.
- [13] RASTOGI A, POSPISIL P. Ultra-weak photon emission as a

- non-invasive tool for the measurement of oxidative stress induced by UVA radiation in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2013, **123**(1):59-64.
- [14] LI Shao-shan, WANG Yan, GUO Zhou-yi, *et al.* Ulterweak photo emission from germinating peanut seeds [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2000, **29**(11):966-969.
李韶山, 王艳, 郭周义, 等. 萌发花生种子超弱发光的研究[J]. 光子学报, 2000, **29**(11):966-969.
- [15] CHENG Hai-peng, WANG Jun-hui, CHI Hao-chao, *et al.* Study on ultraweak luminescence of *Pisum sativum* seeds at the stage of germination[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2001, **28**(6):682-685.
程海鹏, 王君晖, 池浩超, 等. 豌豆种子萌发过程中超微弱发光的研究[J]. 浙江大学学报(理学版), 2001, **28**(6):682-685.
- [16] GAO Yu, XI Gang, LIU Kai, *et al.* Application of spontaneous fluorescence of germinating maize in drought resistance evaluation under water stress [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(2):0217003.
高宇, 习岗, 刘楷, 等. 水分胁迫下萌发玉米的自发发光在抗旱性评价中的应用[J]. 光子学报, 2014, **43**(2):0217003.
- [17] MAO Da-zhang, SHEN Xun, ZHANG Yue-jing, *et al.* Effects of metabolic inhibitors on the ultra-weak 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.
- [18] LI Shao-hua, XI Gang, FAN Lin-lin, *et al.* Changes of ultra-weak 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.
- [19] PALAZZO G, MALLARDI A, HOCHKOEPLER A, *et al.* Electron transfer kinetics in photosynthetic reaction centers embedded in trehalose glasses; trapping of conformational substates at room temperature [J]. *Biophysical Journal*, 2002, **82**(2):558-568.
- [20] MUSUMECI F, APPELEGATE L A, PRIYITERA G, *et al.* Spectral analysis of laser-induced ultra-weak delayed luminescence in cultured normal and tumor cells; Temperature dependence[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2005, **79**(2):93-99.
- [21] XI Gang, LIU Kai, ZHANG Xiao-hui, *et al.* Dynamic analysis of ultra-weak photon radiation of soybean callus induced by UV-B radiation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(8):1449-1454.
习岗, 刘楷, 张晓辉, 等. UV-B 诱导的大豆愈伤组织超弱光子辐射的动力学分析[J]. 光子学报, 2010, **39**(8):1449-1454.
- [22] INOMATA K, TANAKA H. Protective effect of benidipine against sodium azide-induced cell death in cultured neonatal rat cardiac myocytes [J]. *Journal of Pharmacological Sciences*, 2003, **93**(2):163-170.
- [23] PEREZ F J, VERGARA R, OR E. On the mechanism of dormancy release in grapevine buds; a comparative study between hydrogen cyanamide and sodium azide [J]. *Plant Growth Regulation*, 2009, **59**(2):145-152.
- [24] RASTOGI A, POSPISIL P. Effect of exogenous hydrogen peroxide on biophoton emission from radish root cells [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, **48**(2-3):117-123.
- [25] POPP F A, YAN Y. Delayed luminescence of biological systems in terms of coherent states [J]. *Physics Letters A*, 2002, **293**(1-2):93-97.
- [26] BOKKON I, VIMAL RLP, WANG C, *et al.* Visible light induced ocular delayed bioluminescence as a possible origin of negative afterimage [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2011, **103**(2):192-199.
- [27] HO M W, MUSUMECI F, SCORDINO A, *et al.* Delayed luminescence from bovine Achilles' tendon and its dependence on collagen structure [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 2002, **66**(3):165-170.
- [28] XI Gang, LU Hong, LI Shao-hua. Changes of biophoton emission of plant leaf induced by H_2O_2 and its significance [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(10):3250-3255.
习岗, 卢洪, 李少华. H_2O_2 诱导的植物叶片光子辐射的变化及意义[J]. 光子学报, 2009, **38**(12):3250-3255.
- [29] MICHAEL E, MEAURINO V, KNAPPE S, *et al.* The plastidic pentose phosphate translocator represents a link between the cytosolic and the plastidic pentose phosphate pathways in plant [J]. *Plant Physiology*, 2002, **128**(2):512-522.
- [30] HUANG J, ZHANG H S, WANG J F, *et al.* Molecular cloning and characterization of rice 6-phosphogluconate dehydrogenase gene that is up-regulated by salt stress [J]. *Molecular Biology Reports*, 2003, **30**(4):223-227.