

活性氧和能量调控下草莓果实衰老 与超微弱发光的关系

刘欢, 梁爽, 闫宇彤, 白杨, 郭金丽*

(内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019)

摘要: 该试验以‘红颜’草莓果实为试材, 用过氧化氢(H_2O_2)和茶多酚(TP)、呼吸链解偶联剂——2,4-二硝基苯酚(DNP)和三磷酸腺苷(ATP)处理草莓果实, 研究促进和清除活性氧以及抑制能量生成和促进能量条件下, 草莓果实衰老进程和超微弱发光(UPE)的变化, 探讨 UPE 与草莓果实衰老的关系, 为了解 UPE 与植物成熟衰老的关系提供理论依据。结果表明: (1) 在草莓果实采后衰老过程中, 果实硬度持续下降, 失重率和腐烂率持续上升, 同时其 UPE 强度下降。(2) H_2O_2 处理和 DNP 处理的果实硬度均低于对照, 而其失重率和腐烂率均高于对照, 同时两种处理果实的 UPE 强度均低于对照。(3) 茶多酚处理和 ATP 处理的果实硬度均高于对照, 而其失重率和腐烂率均低于对照, 同时两种处理的 UPE 强度均高于对照。研究发现, 活性氧调控和能量调控均能影响草莓果实的 UPE 强度和衰老程度, 活性氧的增加加剧了果实衰老和 UPE 强度下降, 而清除活性氧则延缓了果实衰老和 UPE 强度下降; 抑制 ATP 生成加剧了果实衰老进程和 UPE 强度下降, 增加 ATP 则延缓了果实衰老和 UPE 强度下降; UPE 强度随着草莓果实逐渐衰老而下降, UPE 强度与草莓果实衰老有关, 反映了草莓果实的衰老进程。

关键词: 草莓果实; 活性氧调控; 能量调控; 衰老; 超微弱发光

中图分类号: Q945.6⁺5; S668.4

文献标志码: A

Relationship between Senescence and Ultraweak Photon Emission under Controlling of Reactive Oxygen and Energy in Strawberry Fruit

LIU Huan, LIANG Shuang, YAN Yutong, BAI Yang, GUO Jinli*

(College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China)

Abstract: The study was to discuss the relationship between Ultraweak photon emission (UPE) and senescence of strawberry fruit to supply theoretical basis for understanding the relationship between plant senescence and UPE. The study layout the experiment by soaking respectively postharvest ‘Hongyan’ strawberry fruit with hydrogen peroxide (H_2O_2) and tea polyphenol (TP), uncoupler 2,4-dinitrophenol (DNP) and adenosine triphosphate (ATP), then analyze contrastively the variation of fruit ageing process and UPE under promoting reactive oxygen and eliminating reactive oxygen conditions, inhibiting energy formation and increasing energy conditions in postharvest strawberry fruit. Therefore the study aim to understand the relationship between UPE and senescence in strawberry fruit. The result showed that: (1) during fruit ageing process, fruit firmness of CK, H_2O_2 and TP treatments, DNP and ATP treatments decrease contin-

收稿日期: 2017-02-08; 修改稿收到日期: 2017-05-05

基金项目: 国家自然科学基金(31260455)

作者简介: 刘欢(1990—), 女, 硕士, 主要从事园艺植物生理和栽培研究。E-mail: 707883001@qq.com

* 通信作者: 郭金丽, 博士, 副教授, 主要从事园艺植物生理和栽培及植物超微弱发光的研究。E-mail: guojinli1111@163.com

uously weight loss rate and decay rate of above treatments increase continuously. Meanwhile UPE intensity of five treatments decrease. Based on above results, in fruit ageing process, UPE intensity decline along with the ageing of postharvest fruit. (2) In whole fruit ageing process, the fruit firmness of H_2O_2 and DNP treatments are all lower than those of CK and weight loss rate and decay rate are all higher than those of CK, meanwhile UPE intensity of H_2O_2 and DNP treatments are all lower than those of CK. (3) The fruit firmness of TP and ATP treatments are all higher than those of CK and weight loss rate and decay rate are all lower than those of CK, meanwhile UPE intensity of TP and ATP treatments are all higher than those of CK. Above results indicated that regulating reactive oxygen level and energy level can effect on ageing process and UPE intensity of fruit. Promoting reactive oxygen accumulation lead to speed up the ageing extent and to intensify the decline of UPE intensity of fruit, and eliminating reactive oxygen lead to delay the ageing extent and to relieve the decline of UPE intensity in fruit; inhibiting ATP formation lead to speed up the ageing extent and to intensify the decline of UPE intensity of fruit, and increasing ATP lead to delay the ageing extent and TP relieve the decline of UPE intensity in fruit. Above results indicated that UPE intensity decline along with the fruit ageing process, UPE intensity reflect the ageing course of strawberry fruit.

Key words: strawberry fruit; reactive oxygen regulating; energy regulating; senescence; ultraweak photon emission

生物的发光除了由生物体内专门体系发出的光(称为“功能化学发光”)和受辐射诱导的光诱导发光(称为荧光)外,还有由代谢反应而引起的超微弱发光(ultraweak photon emission, UPE; ultraweak luminescence, UWL)。任何生物组织或细胞在生命活动的代谢过程中,都自发地辐射出一种极其微弱的光子流,其强度仅为在每秒每平方厘米上几个到几千个光子($10^0 \sim 10^3 \text{ hv} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{cm}^2$),波长范围为 $180 \sim 800 \text{ nm}$ ^[1]。1923 年前苏联细胞生物学家最早在“洋葱实验”中发现了 UPE 现象^[2],一直到 20 世纪 80 年代,随着超高灵敏度的弱光图像探测器的发展,UPE 的研究才进入到一个新的阶段,开始在生命科学、医学、食品和环境科学等领域相继展开^[3-4]。UPE 自 20 世纪 90 年代以来进入到农业领域,仅有的极少数农业领域中的 UPE 研究主要涉及植物在不同发育阶段的 UPE 变化、UPE 与植物种子活力的关系、UPE 与植物的抗逆性、UPE 与果实品质的关系等方面^[5-8]。但这些研究远未探清有关 UPE 与植物生长发育之间的关系。

草莓(*Fragaria ananassa* Duch.)是非跃变型果实,果实成熟后极易衰老。迄今有关草莓果实衰老生理的研究较多,活性氧积累是促进草莓果实衰老的一个重要因素^[9-11]。最近有研究认为,园艺作物采后衰老和品质劣变的发展可能与能量供应不足和生成效率下降有关^[12-14]。以上研究表明,活性氧积累和能量供应不足是影响果蔬果实衰老的重要因素,通过改变活性氧和能量状态即可以改变果实的衰老进程。在草莓果实衰老中 UPE 表现如何,

UPE 是否与草莓果实衰老有关? 这些均未见报道。因此,本试验以‘红颜’草莓果实为材料,在前期试验已探明 UPE 强度随着‘红颜’草莓果实的衰老而下降的基础上^[15-16],进一步研究促进和清除活性氧、促进和抑制能量生成条件下果实的衰老及 UPE 的变化,探讨 UPE 与草莓果实衰老的关系,以期了解 UPE 与植物成熟衰老的关系,并为草莓果实贮藏保鲜提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

本试验以草莓品种‘红颜’果实为材料,种植于呼和浩特市新城区农丰果蔬种植农民专业合作社同一温室内,环境条件及管理均一致,待草莓果实成熟时一次性采收进行试验。

1.2 试验方法

选择全红期、大小一致、无病虫害的‘红颜’草莓果实,采摘后立即运回实验室,分别进行活性氧和能量调控。活性氧调控以 $0.1 \text{ mmol/L } H_2O_2$ 、 100 mg/L 茶多酚(活性氧清除剂)浸泡,以蒸馏水浸泡为对照,处理时间为 30 min ;能量调控以 1 mmol/L DNP(呼吸链解偶联剂 2,4-二硝基苯酚)、 1 mmol/L ATP(三磷酸腺苷)浸泡,以蒸馏水浸泡作为对照,处理时间为 30 min 。活性氧和能量处理后捞出果实,于阴凉通风处晾干,装入保鲜袋常温贮藏,之后每 1 d 取 1 次样进行试验指标测定,共测 6 d 。每次取样后一部分立即进行 UPE 的测定;另一部分进行果实硬度、失重率、腐烂率的测定。

1.3 指标测定

UPE 测定采用北京建新力拓科技有限公司生产的超微弱发光测试系统(BPCL-2-SH 型)。测试前先开机预热 30 min,随机选取 10 个草莓,用直径 1 cm 的打孔器取 1.5 cm 高的果肉,迅速放入仪器暗室测量杯内测定,共测 10 次,减去本底取平均值,即为草莓果实的最终发光强度。

果实硬度的测定采用硬度计,随机选取 10 个草莓果实进行测定,取其平均值。果实失重率的测定采用称重法,失重率=(果实采摘当天的重量-每天测量的重量)/果实采摘当天的重量×100%。腐烂率的计算以果实腐烂数量占果实总数的百分比计。

1.4 数据分析

采用 Excel 制作图表,SPSS 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 活性氧调控对草莓果实衰老及超微弱发光的影响

2.1.1 衰老进程 果实硬度、失重率和腐烂率反映了果实的衰老程度。在草莓果实采后衰老过程中,

对照、H₂O₂ 和茶多酚处理的果实硬度均逐渐降低,且 H₂O₂ 处理的果实硬度均低于同期对照,而茶多酚处理的果实硬度高于同期对照(图 1,A);同时,随着草莓果实逐渐衰老,对照、H₂O₂ 和茶多酚处理的果实失重率均逐渐升高,且 H₂O₂ 处理的果实失重率均高于同期对照,而茶多酚处理的失重率低于同期对照(图 1.B)。另外,随着草莓果实逐渐衰老,对照、H₂O₂ 和茶多酚处理的果实腐烂率逐渐升高。其中,H₂O₂ 处理的果实在采后第 1 天即开始有腐烂现象,且之后腐烂率快速上升;茶多酚处理果实在采后第 2 天才始有腐烂现象,之后腐烂率上升缓慢。在整个果实衰老过程中,H₂O₂ 处理的果实腐烂率均高于对照,茶多酚处理的果实腐烂率均低于对照(图 1,C)。可见,随着草莓果实逐渐衰老,果实硬度持续下降,失重率和腐烂率持续上升;促进活性氧增加加剧了草莓果实衰老,而清除活性氧则延缓了果实衰老。

2.1.2 果实超微弱发光 随着草莓果实的衰老,H₂O₂ 处理、茶多酚处理和对照果实的 UPE 强度均先小幅上升而后下降,整体均呈下降趋势;在果实衰老过程中,H₂O₂ 处理果实的 UPE 强度均低于同期对

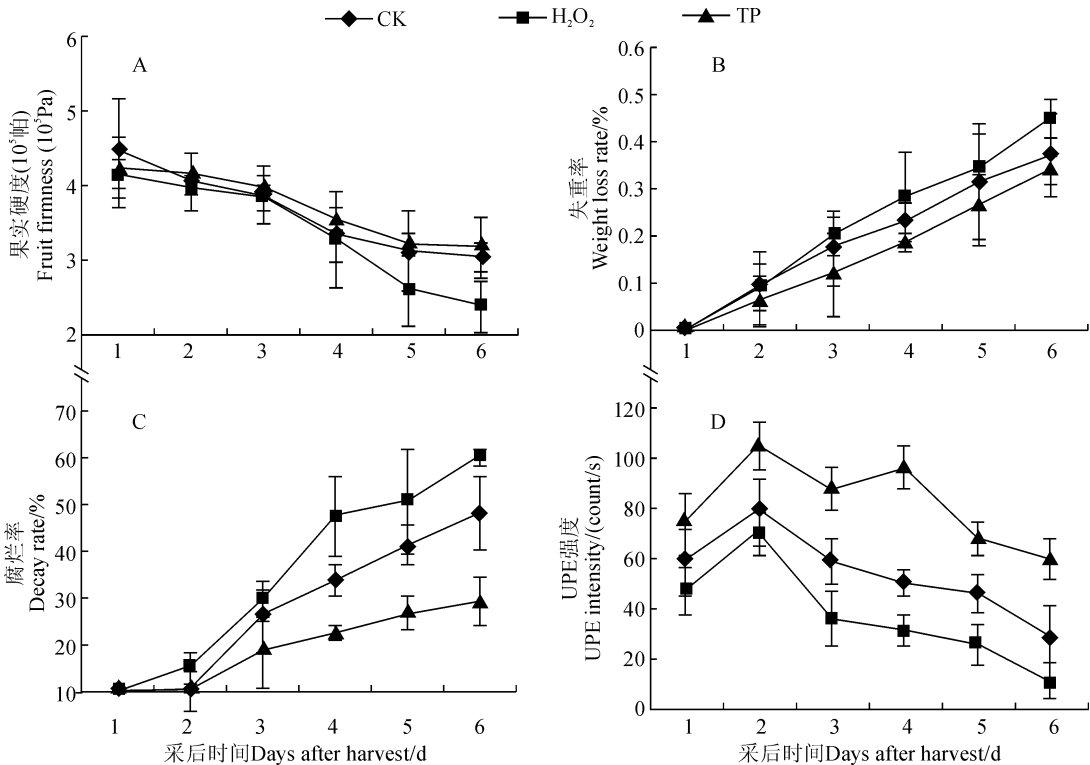


图 1 活性氧调控下草莓果实硬度、失重率、腐烂率和 UPE 的变化

Fig. 1 The variation of fruit firmness, weight loss rate, decay rate and UPE intensity under regulation of reactive oxygen in ageing strawberry fruit

表 1 活性氧调控下草莓果实 UPE 与果实衰老的相关分析

处理 Treatment	衰老指标 Senescence	UPE 回归方程 UPE regression equation	相关系数 Correlation coefficient
对照 CK	失重率 Weight loss rate(X_1)	$Y=80.77X_1-101.52$	0.792*
	硬度 Fruit firmness(X_2)	$Y=21.65X_2-26.29$	0.762*
	腐烂率 Decay rate(X_3)	$Y=71.63X_3-61.29$	0.689**
过氧化氢 H_2O_2	硬度 Fruit firmness(X_1)	$Y=21.807X_1-37.81$	0.830*
	腐烂率 Decay rate(X_2)	$Y=-70.71X_2+65.49$	0.821*
	失重率 Weight loss rate(X_3)	$Y=-101.74X_3-68.24$	0.810**
茶多酚 TP	硬度 Fruit firmness(X_1)	$Y=24.55X_1-9.35$	0.696
	失重率 Weight loss rate(X_2)	$Y=-88.95X_2+102.93$	0.655
	腐烂率 Decay rate(X_3)	$Y=-84.91X_3+96.12$	0.489

注:Y 为 UPE 强度; $X_1\sim X_3$ 为对应衰老指标,* 表示 $P<0.05$ 差异性相关,** 表示 $P<0.01$ 极显著性相关
Note: Y mean UPE intensity; X_1-X_3 stand for corresponding senescence level,* indicates significant correlation at 0.05 level, and ** indicates extremely significant correlation at 0.01 level; The same as Table 2

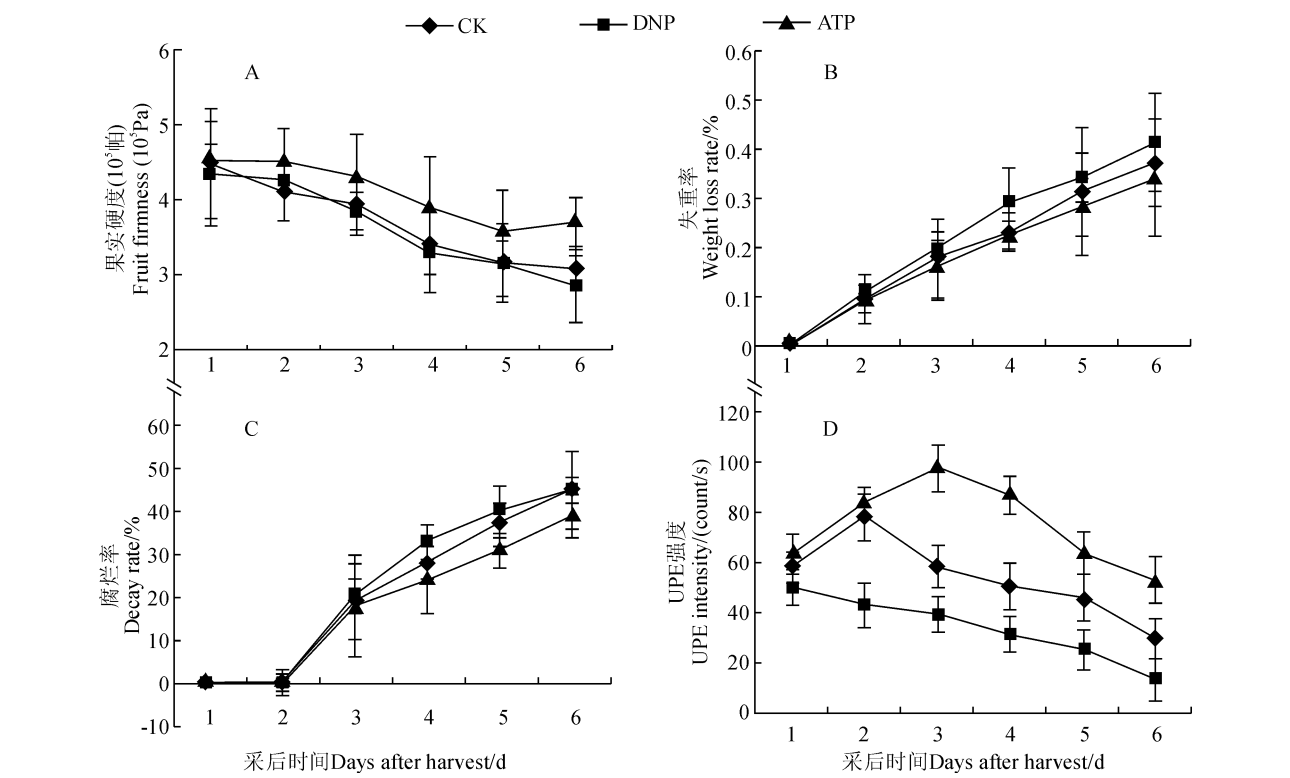


图 2 能量调控下草莓果实硬度、失重率、腐烂率和 UPE 的变化
Fig. 2 The variation of fruit firmness,weight loss rate,decay rate and UPE intensity under regulation of energy in ageing strawberry fruit

照,茶多酚处理的 UPE 强度始终明显高于同期对照(图 1, D)。由此可见,活性氧明显增加加剧了 UPE 强度下降,清除活性氧则有效减缓了 UPE 强度下降。

2.1.3 果实衰老与超微弱发光的关系 草莓果实衰老过程中, H_2O_2 处理和对照下的草莓果实 UPE

与其硬度、失重率和腐烂率均呈显著正相关。 H_2O_2 处理加剧了果实衰老进程,果实 UPE 强度也下降更迅速,UPE 强度与各衰老指标的相关系数均高于相应对照;茶多酚处理延缓了果实衰老进程,UPE 强度下降趋势减慢,UPE 强度与各衰老指标的相关系数均低于相应对照(表 1)。果实硬度、失重率和腐

表 2 能量调控下草莓果实 UPE 与果实衰老的相关分析

Table 2 The correlation analysis between UPE and fruit senescence under the regulation of energy

处理 Treatment	衰老指标 Senescence	UPE 回归方程 UPE regression equation	相关系数 Correlation coefficient
对照 CK	失重率 Weight loss rate(X ₁)	Y=−123.712X ₁ +88.414	0.906 *
	硬度 Fruit firmness(X ₂)	Y=27.269 X ₂ −53.229	0.888 *
	腐烂率 Decay rate(X ₃)	Y=−118.924X ₃ +100.500	0.872 * *
2,4-二硝基苯酚 DNP	失重率 Weight loss rate(X ₁)	Y=−82.781X ₁ +59.838	0.992 * *
	腐烂率 Decay rate(X ₂)	Y=−87.847X ₂ +70.874	0.972 * *
	硬度 Fruit firmness(X ₃)	Y=20.798X ₃ −41.432	0.966 * *
三磷酸腺苷 ATP	硬度 Fruit firmness(X ₁)	Y=37.678 X ₁ −71.802	0.844 *
	失重率 Weight loss rate(X ₃)	Y=−95.665X ₂ +101.885	0.661
	腐烂率 Decay rate(X ₃)	Y=−90.843 X ₃ +109.202	0.642

烂率反映了果实的衰老程度,可见,随着草莓果实逐渐衰老,UPE 强度下降,UPE 强度变化能够反映草莓果实的衰老进程。

2.2 能量调控对草莓果实衰老及超微弱发光的影响

2.2.1 果实衰老进程 在草莓果实采后衰老过程中,对照、DNP 和 ATP 处理的果实硬度均逐渐降低;DNP 处理的硬度基本低于对照处理,ATP 处理的硬度则始终明显高于对照(图 2,A)。同时,随着草莓果实逐渐衰老,对照、DNP 和 ATP 处理的草莓果实失重率均逐渐升高;DNP 处理的草莓果实失重率大于对照,ATP 处理的失重率始终小于对照(图 2,B)。另外,随着草莓果实逐渐衰老,对照、DNP 和 ATP 处理的果实腐烂率均呈上升趋势;在整个果实衰老过程中,DNP 处理的草莓果实腐烂率均大于对照,ATP 处理的腐烂率均小于对照,尤其是处理后期表现更明显(图 2,C)。可见,随着草莓果实逐渐衰老,其果实硬度持续下降,失重率和腐烂率持续上升;抑制 ATP 生成明显加剧了果实衰老进程,增加 ATP 则有效延缓了果实衰老。

2.2.2 果实超微弱发光 随着草莓果实逐渐衰老,DNP 处理果实的 UPE 强度持续下降,对照的 UPE 强度整体下降,ATP 处理的 UPE 强度则先上升后下降,整体表现出上升趋势(图 2,D)。贮藏结束时,DNP 处理的草莓果实 UPE 强度下降了 74.25%,对照处理下降了 49.57%,而 ATP 处理的则上升了 1.31%。在整个果实衰老过程中,DNP 处理的 UPE 强度均低于对照,ATP 处理的 UPE 强度均高于对照。以上结果说明 DNP 处理加剧了果实 UPE 强度下降,ATP 处理则提高了果实 UPE 强度。

2.2.3 果实衰老与超微弱发光的关系 在草莓果实衰老过程中,对照、DNP 处理和 ATP 处理的草莓果实 UPE 与其硬度、失重率和腐烂率均呈正相关。DNP 处理加剧了果实衰老进程,同时加剧了果实 UPE 强度下降幅度,UPE 强度与各衰老指标均呈显著正相关,且相关性均强于对照;ATP 处理延缓了果实衰老进程,同时减慢 UPE 强度下降,UPE 强度与各衰老指标的相关性均弱于对照(表 2)。能量调控下 UPE 与果实衰老的相关分析结果同样说明,随着草莓果实逐渐衰老,UPE 强度随之下降,UPE 强度变化反映了草莓果实的衰老进程。

3 讨 论

许多研究表明园艺作物果实衰老过程中各种活性氧明显累积,致使果实膜脂过氧化过程加剧,质膜系统受到伤害,该过程伴随着 MDA 的产生和蛋白质的降解,加速了果实衰老^[17-18]。最近有研究认为园艺作物的衰老和品质劣变受能量水平调节。如对荔枝果实采后衰老的研究发现,通过短期厌氧和纯氧处理均提高了荔枝果实的 ATP 含量,延缓了衰老和品质劣变^[19];陈莲等^[20]通过抑制 ATP 生成而导致龙眼果皮内活性氧累积、膜系统破坏而引起果皮褐变。本试验研究发现,在草莓果实采后衰老过程中,对照、活性氧调控和能量调控下的果实硬度均持续下降、失重率和腐烂率均持续上升。H₂O₂ 处理和呼吸链解偶联剂 2,4-二硝基苯酚(DNP)处理的果实硬度均低于对照,而失重率和腐烂率均高于对照;活性氧清除剂茶多酚处理和 ATP 处理的果实硬度均高于对照,而失重率和腐烂率均低于对照。由此可见,能量水平和活性氧代谢均与草莓果实衰

老有关,促进活性氧增加和抑制 ATP 生成的处理均加速了草莓果实的衰老,而清除活性氧和增加 ATP 的处理则有效缓减了草莓果实的衰老。

有关 UPE 与园艺作物果实生长发育的研究零星可数。如对番茄果实和猕猴桃果实贮藏过程中呼吸强度与 UPE 强度的研究发现,在 28 ℃ 贮藏条件下,两种果实的 UPE 强度变化趋势与呼吸强度的变化趋势相一致,认为 UPE 可以用来比较不同呼吸跃变果实之间的生物学差异^[21-22]。张新华等^[23]研究发现,用 1-甲基环丙烯(1-methylcyclopropene, 1-MCP)和乙烯利处理成熟过程中的红富士苹果果实后 UPE 强度的变化与呼吸强度、乙烯释放速率的变化趋势相似,均有明显的高峰出现,且出峰时间一致。乙烯利处理加速了果实软化,使 UPE 强度峰值时间提前,并加速了果实跃变后 UPE 强度的

衰减;1-MCP 处理延缓了果实的衰老,使 UPE 强度峰值推迟,并减弱了峰值过后 UPE 强度的衰减。该研究结果认为 UPE 强度能反映富士苹果成熟过程中代谢的变化。

本试验的前期试验研究发现,UPE 强度在采后草莓果实自然衰老过程中逐渐下降。本试验进一步研究表明,活性氧调控和能量调控下的 UPE 强度均随着草莓果实的衰老加剧而下降。活性氧增加和抑制 ATP 生成的处理均加速了草莓果实的衰老,同时加速了 UPE 强度的下降;而清除活性氧和增加 ATP 的处理则缓减了草莓果实的衰老,同时缓减了 UPE 强度的下降。因此,草莓果实 UPE 强度随着草莓果实的逐渐衰老而降低,UPE 强度与草莓果实衰老有关,反映了草莓果实的衰老进程。

参考文献:

[1] POPP F A. Biophoton emission[J]. *Experientia*, 1988, **44** (7):543-544.

[2] POPP F A, GUQ L. Recent Advances in Biophoton Research and Its Applications[M]. Singapore: World Scientific, 1992: 1-46.

[3] 王 畅,蒋礼林,王乐新,等. 奶牛血清微弱发光的分析与应用研究[J]. *江苏农业科学*, 2013, **41**(2):187-189.
WANG C, JIANG L L, WANG L X, *et al.* Analysis and application of ultraweak bioluminescence of serum in dairy cow [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2013, **41**(2):187-189.

[4] 岳霞丽,刘永红,胡先文,等. 水华鱼腥藻的超弱发光研究[J]. *光谱实验室*, 2008, **25**(4):673-676.
YUE X L, LIU Y H, HU X W, *et al.* The study of ultraweak luminescence of *Anabaena Flos-Aquae* [J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2008, **25**(4):673-676.

[5] 胡献明,潘建伟,陈 虹,等. 铝胁迫诱导大麦根尖细胞超微弱发光的变化[J]. *浙江大学学报*, 2002, **28**(4):383-386.
HU X M, PAN J W, CHEN H, *et al.* Aluminum-induced ultraweak luminescence changes in root-tip cells of barley [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2002, **28**(4):383-386.

[6] 侯仙慧,廖祥儒,李 颖,等. 苋菜种子萌发过程的超微弱发光及其机理研究[J]. *种子*, 2004, **23**(7):23-27.
HOU X H, LIAO X R, LI Y, *et al.* Ultraweak biophoton emission and its mechanism during seed germination of *Amaranthus hypochondriacus* [J]. *Seed*, 2004, **23**(7):23-27.

[7] 刘红梅,廖祥儒,吴立峰,等. 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[J]. *食品与生物技术学报*, 2006, **25**(3):75-78.

[8] LIU H M, LIAO X R, WU L F, *et al.* Effect of heat shock on biophoton and activities of antioxidant enzymes in immature wheat grains [J]. *Journal of Food Science and Biotechnology*, 2006, **25**(3):75-78.

[9] 林桂玉,黄在范,张翠华,等. 菊花花芽分化期超微弱发光及生理代谢的变化[J]. *园艺学报*, 2008, **35**(12):1 819-1 824.
LIN G Y, HUANG Z F, ZHANG C H, *et al.* Changes in ultraweak luminescence intensity, respiration rate and physiological metabolism of chrysanthemum during floral differentiation [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, **35**(12):1 819-1 824.

[10] 许家辉,余 东,许 玲,等. 晚熟龙眼果实挂树期果皮活性氧代谢及抗氧化酶活性[J]. *热带作物学报*, 2009, **30**(6):725.
XU J H, YU D, XU L, *et al.* Active oxygen metabolism and activity of anti-oxidant enzymes of pericarp tissues in late longan cultivars [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2009, **30** (6):725.

[11] 陈学红,郑永华,杨震峰,等. 高氧处理对草莓果采后活性氧代谢和腐烂的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2005, **28** (1):99.
CHEN X H, ZHENG Y H, YANG Z F, *et al.* Effects of high oxygen treatments on active oxygen metabolism and fruitdecay in postharvest strawberry [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2005, **28**(1):99.

LI Y H, YUAN H Y, ZHANG H, *et al.* Effect of postharvest 1-hexanol treatment on active oxygen metabolism and senescence of strawberry fruits[J]. *Food Science*, 2010, **31**(4):272.

[12] 陈文烜,宋丽丽,廖小军.减压贮藏技术对水蜜桃采后能量代谢的影响[J].农业机械学报,2014, **45**(10):226-230.

CHEN W X, SONG L L, LIAO X J. Effects of hypobaric storage on postharvest energy metabolism in juicy peach[J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2014, **45**(10):226-230.

[13] 陈京京,金 鹏,李会会,等.低温贮藏对桃果实冷害和能量水平的影响[J].农业工程学报,2012, **28**(4):275-280.

CHEN J J, JIN P, LI H H, *et al.* Effects of low temperature storage on chilling injury and energy status in peach fruit[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, **28**(4):275-280.

[14] SAQUET A A, STREIF J, BANGERTH F. Changes in ATP,ADP and pyridine nucleotide levels related to the incidence of physiological disorders in Conference pears and Jonagold apples during controlled atmosphere storage[J]. *Journal of Horticultural Science & Biotechnology*, 2000, **75**: 243-249.

[15] 刘 欢,朱冠宇,梁 爽,等.草莓果实采后衰老过程中果实品质及超微弱发光的变化[J].北方农业学报,2016, **44**(3): 29-32.

LIU H, ZHU G Y, LIANG S, *et al.* The change of postharvest fruit quality during the process of aging and the ultra-weak luminescence of strawberry[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2016, **44**(3):29-32.

[16] 郭金丽,朱冠宇,刘 艳,等.草莓果实衰老过程中超微弱发光的变化及与活性氧的关系[J].北方园艺,2016,(11):1-4.

GUO J L, ZHU G Y, LIU Y, *et al.* The dynamic variation of UWL and reactive oxygen during the ageing process of strawberry fruit[J]. *Northern Horticulture*, 2016, (11):1-4.

[17] 樊秀彩,关军锋,张继澍,等.草莓采后微粒体膜 Ca^{2+} -ATPase 活性与膜脂过氧化水平[J].园艺学报,2003, **30**(1): 15-18.

FAN X C, GUAN J F, ZHANG J S, *et al.* Microsomal membrane Ca^{2+} -ATPase activity and lipid peroxidation level during senescence of postharvest strawberry fruit[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2003, **30**(1):15-18.

[18] 顾采琴,朱冬雪,李 棋.草莓果实采后 NAD 激酶活性与 NAD(H)、NADP(H)含量及活性氧代谢的关系[J].中国农业科学,2007, **40**(2):352-357.

GU C Q, ZHU D X, LI Q. Relationship between NAD kinase and NAD(H), NADP(H) and active oxygen during ripening and senescence of postharvested strawberry fruit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, **40**(2):352-357.

[19] 刘 亭,钱政江,杨 恩,等.呼吸活性和能量代谢与荔枝果实品质劣变的关系[J].果树学报,2010, **27**(6): 946-951.

LIU T, QIAN Z J, YANG E, *et al.* Respiratory activity and energy metabolism of harvested litchi fruit and their relationship to quality deterioration[J]. *Journal of Fruit Science*, 2010, **27**(6): 946-951.

[20] 陈 莲,陈梦茵,林河通,等.解偶联剂 DNP 处理对采后龙眼果实果皮褐变和活性氧代谢的影响[J].中国农业科学, 2009, **42**(11):4 019-4 026.

CHEN L, CHEN M Y, LIN H T, *et al.* Effects of uncoupling agent DNP treatment on browning and active oxygen metabolism in pericarp of harvested longan fruit[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, **42**(11):4 019-4 026.

[21] 李淑丽.番茄成熟过程中超微弱发光的研究[D].西安:西北大学,2005.

[22] 田珊珊.猕猴桃成熟过程中超微弱发光的研究[D].西安:西北大学,2007.

[23] 张新华,李富军,杨洪强,等.苹果成熟过程中超弱发光强度与果实跃变的关系[J].农业机械学报,2004, **35**(6):215-217.

ZHANG X H, LI F J, YANG H Q, *et al.* Study on relationship between ultraweak luminescence and fruit climacteric in apple ripening [J]. *Journal of Agricultural Machinery*, 2004, **35**(6):215-217.

(编辑:裴阿卫)