



干旱胁迫下景天植物能量水平 与超微弱发光的关系

郭金丽,任鹏达,梁爽,闫宇彤,李连国*

(内蒙古农业大学农学院,呼和浩特 010019)

摘要:该试验以德景天幼苗为材料,设计 PEG、PEG+H₂O₂、PEG+苯甲酸钠、蒸馏水(CK)4个处理,分析 PEG 模拟干旱胁迫及活性氧调控干旱胁迫下超微弱发光(ultraweak luminescence, UWL)和能量水平的变化及两者的关系,为揭示 UWL 的产生及其来源提供理论依据。结果表明:(1)在 PEG 模拟干旱胁迫过程中,CK 和 PEG 处理德景天叶片的 ATP 含量、能荷和 UWL 强度均随着胁迫时间延长呈下降趋势,但 PEG 处理的上述指标的下降较 CK 更快、降幅更大。(2)进一步采用 H₂O₂ 和苯甲酸钠调控活性氧的 PEG 干旱胁迫过程中,PEG+H₂O₂、PEG+苯甲酸钠处理的德景天叶片 ATP 含量、能荷和 UWL 强度的变化趋势与 PEG 处理基本一致,均随胁迫时间的延长呈下降趋势;但 PEG+H₂O₂ 处理的上述指标均低于 PEG 处理,而 PEG+苯甲酸钠处理的上述指标却高于 PEG 处理。(3)相关分析表明,在干旱胁迫及活性氧调控干旱胁迫下,德景天叶片 UWL 强度均与 ATP 含量和能荷呈显著正相关。研究发现,在干旱胁迫和活性氧调控干旱胁迫下,德景天叶片 ATP 含量和能荷较 CK 均明显下降,UWL 强度也随之明显降低;UWL 强度随着以 ATP 为代表的能量水平的下降而降低,说明植物中 UWL 的产生与其能量水平的高低显著相关。

关键词:德景天;干旱胁迫;活性氧调控;超微弱发光;能量

中图分类号:Q945.78

文献标志码:A

Relationship between Energy and Ultraweak Luminescence in *Sedum hybridum* under Drought Stress

GUO Jinli, REN Pengda, LIANG Shuang, YAN Yutong, LI Lianguo*

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

Abstract: The dynamic variation of ultraweak luminescence (UWL) and energy level, and their relationship under stress of 20% PEG treatment and drought stress with regulating of reactive oxygen by carrying out four treatments of PEG, PEG+hydrogen (H₂O₂), PEG+sodium benzoate and distilled water(CK) in *Sedum hybridum* seedling to supply theoretical basis for understanding the generation of UWL. The results showed: (1) in process of drought stress by PEG treatment, ATP content, energy charge and UWL intensity all decreased; above energy index and UWL intensity of PEG treatment decreased more rapidly and showed a bigger drop. (2) Under drought stress with regulating by H₂O₂ and sodium benzoate, ATP content, energy charge and UWL intensity of treatments of PEG+H₂O₂ and PEG+sodium benzoate all de-

收稿日期:2017-12-07;修改稿收到日期:2018-05-05

基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2012MS0324)

作者简介:郭金丽(1972—),女,博士,副教授,硕士生导师,主要从事园艺植物生理生态和植物超微弱发光的研究工作。E-mail:guojinli1111@163.com

*通信作者:李连国,博士,教授,主要从事果树生理生态及栽培等研究工作。E-mail:nmndlgl@qq.com

creased along with stress time as well as PEG treatment; However, above energy index and UWL intensity of PEG+H₂O₂ were lower than those of PEG treatment, while above energy index and UWL intensity of PEG+sodium benzoate were higher than those of PEG treatment. (3) Correlation analysis also showed that UWL intensity was positively correlated with ATP content and energy charge both under drought stress and under drought stress with regulation of reactive oxygen. Above results indicated: under drought stress and drought stress with regulation of reactive oxygen, energy level represented by ATP content decreased more rapidly than that of CK, UWL intensity decreased more rapidly than that of CK too; UWL intensity decreased along with the decline of ATP content, which indicated that the generation of UWL in plants positively related to ATP level.

Key words: *Sedum hybridum*; drought stress; reactive oxygen regulation; ultraweak luminescence; energy

所有的生命有机体都有自发的超微弱发光(ultraweak luminescence, UWL)。UWL是生物系统中自发辐射的一种极弱的准连续光子辐射,这种光子辐射通常极其微弱,强度一般为100~1 000 h·s⁻¹·cm⁻²,发射光谱覆盖从近红外、可见光到紫外线的相对较宽的光谱范围^[1]。20世纪20年代,前苏联科学家Gurwitsch在研究洋葱根尖细胞分裂机理时首次发现了生物超微弱发光现象^[2],但在以后的几十年里,由于探测设备的落后,人们一直无法对这种辐射光的强度和波长范围进行深入了解。直到20世纪50年代光灵敏度极高的光电倍增管的诞生,才使人们重新继续这一研究。20世纪80年代发展起来的微通道板像增强器是一种超高灵敏度的弱光图像探测器,使超微弱发光的研究进入到一个新的阶段^[3-6]。研究表明,生物系统的超微弱发光可能与生物体的氧化代谢、信息传递、光合作用、应激反应、生长及死亡等基本生命过程密切相关,在医学、食品学、药理学、农业和环境科学等领域具有广泛的应用前景^[7-10]。

目前,UWL在农业领域的研究还极少,主要涉及植物在不同发育阶段的UWL表现、以及UWL与植物种子生活力、果实品质、花芽分化、抗逆性的关系等方面的研究^[11-16]。可见,有关UWL与植物生长发育关系的研究刚刚起步,植物中UWL的产生机制还不清楚,有待于更多的试验来研究验证。

景天植物是景天科植物,是优良的园林地被植物,普遍具有很强的抗旱性。迄今,仅以红富士苹果^[17]和平邑甜茶^[18]为试材进行过水分胁迫下UWL和ATP的变化的初步研究,发现UWL强度与ATP含量的变化有关。关于景天植物的抗旱性已经进行了较多的研究^[19-20],但对干旱胁迫下景天植物能量与UWL的关系还未有报道。德景天(*Sedum hybridum*)为抗旱性极强、生态绿化中应用最为广泛的景天植物。本试验以德景天为研究对象,

通过研究干旱胁迫及活性氧调控干旱胁迫情况下,德景天UWL和以ATP为代表的能量水平的变化,进一步探讨植物干旱胁迫条件下能量水平与UWL发生的关系,为揭示植物中UWL的产生来源提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料及处理

1.1.1 材料 试验以内蒙古农业大学教学与科研基地的德景天植株为材料。

1.1.2 干旱胁迫处理 选取株龄为2年、株高20 cm、生长状况相对一致的德景天植株,置于体积为3 L的20%PEG溶液(预备实验表明此浓度下干旱胁迫程度较重、胁迫效果明显)中进行模拟干旱胁迫,以等量体积的蒸馏水作为对照。室温为25℃,相对湿度为60%,重复5次(盆),每个重复(盆)5株景天,之后每天取样1次,连续取样6 d进行相关指标测定。

1.1.3 活性氧调控下干旱胁迫处理 取株龄为2年、株高20 cm、生长状况相对一致的德景天植株,分别置于1 mmol/L H₂O₂+PEG溶液(预备试验表明此浓度下活性氧调控干旱胁迫效果适当)和10 mmol/L苯甲酸钠+PEG溶液中进行胁迫处理,以PEG溶液为对照。3种处理溶液体积均为3 L,1 mmol/L H₂O₂+PEG溶液由30% H₂O₂溶液303 μL+PEG固体配制,10 mmol/L苯甲酸钠+PEG溶液由苯甲酸钠4.323 g+PEG固体配制。室温为25℃,相对湿度为60%,重复5次(盆),每个重复(盆)5株景天,之后每天取样1次,连续取样5 d进行相关指标测定。

1.2 测定指标及方法

UWL强度的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)。开机后预热30 min后进行测定,调节高压为1 050

V, 标准光源发光强度 20 000 count/s, 采样时间 30 s, 采样间隔 1 s。样品测定在暗室、恒温($20 \pm 2^\circ\text{C}$)及恒湿(RH 为 $75\% \pm 2\%$)条件下进行。取德景天植物中部健康叶片用直径为 1 cm 的打孔器均匀打取叶片, 平铺于测量杯中, 每个样品 3 次重复, 每次重复连续测定 10 次, 测定值减去本底后取平均值即为景天叶片的 UWL 强度。

ATP、ADP、AMP 含量的测定采用 ELITE Lachrom Pump L-2130 高效液相色谱仪(基本配置:HITACHI UV-VIS Deteetor L-2420 紫外检测器, HITACHI Autosampler L-2200 自动进样器及 HITACHI Column Oven L-2300 柱温箱)和 HC-2518R 高速冷冻离心机。日立液相色谱柱 LaChrom-C18(4.6 mm × 250 mm, 5 μm);流动相为 35 mmol/L NaH₂PO₄ 缓冲液(pH 6.8), 流速为 1.0 mL/min, 紫外检测波长为 259 nm;柱温为 30 °C;自动进样器进样量为 10 μL^[21]。标准品 5'-ATP 钠盐、5'-ADP 钠盐、5'-AMP 钠盐均为 Sigma 公司产品, 其他化学试剂为国产色谱纯, 试验用水为 Milli-Q 超纯水(美国 Millipore 公司)。

$$\text{能荷(EC)} = ([\text{ATP}] + 0.5[\text{ADP}])/([\text{ATP}] + [\text{ADP}] + [\text{AMP}])$$

1.3 数据分析

采用 Excel 统计软件和 SPSS 软件进行数据分析处理。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下德景天叶片能量水平的变化特征

2.1.1 PEG 模拟干旱胁迫处理 图 1, A 显示, 在 PEG 模拟干旱胁迫开始时, 德景天叶片中以 ATP 含量最高, ADP 含量次之, AMP 含量最低, 且 ATP 含量在胁迫前期远高于 ADP 和 AMP 含量, 说明德

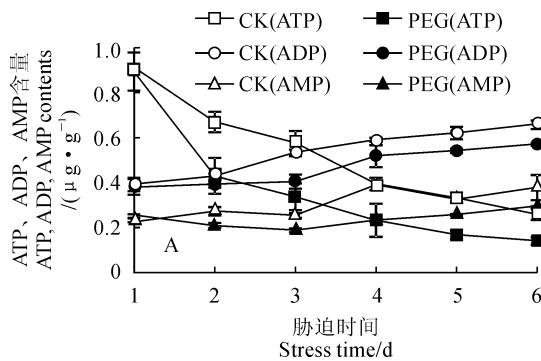


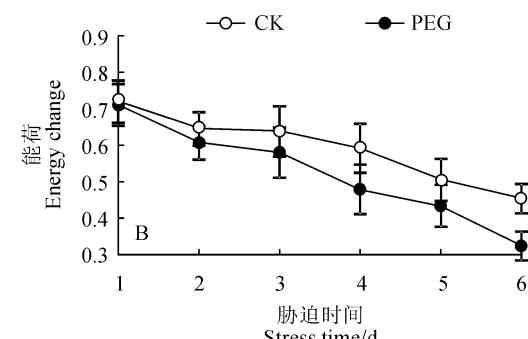
图 1 干旱胁迫(PEG)下德景天叶片能量水平的变化

Fig. 1 The change of energy level in leaves of *Sedum hybridum* under drought (PEG) stress

景天叶片中的能量形式开始时主要以 ATP 为代表;随着胁迫时间的延长, 对照和 PEG 处理德景天叶片 ATP 含量均呈下降趋势, 而 ADP 和 AMP 含量整体呈上升趋势, 说明此时 ATP 合成过程受阻而水解过程加强, 导致 ATP 含量不断下降而 ADP 和 AMP 积累, 能量水平下降。另外, 在整个干旱胁迫过程中, PEG 处理 ATP、ADP 和 AMP 含量均明显低于同期对照, 且 ATP 含量表现得更明显;与干旱胁迫 1 d 时相比, 胁迫结束时(6 d) PEG 处理的 ATP 含量下降了 84.23%, 而此时对照的 ATP 含量下降了 71.8%, 说明干旱胁迫处理叶片能量的降幅明显大于对照(图 1, A)。

与此同时, 在干旱胁迫期间, 德景天叶片能荷的变化趋势与 ATP 表现一致, PEG 处理和对照叶片的能荷均呈逐渐下降趋势, 但 PEG 处理的能荷值始终低于同期对照;与干旱胁迫 1 d 时相比, 胁迫结束时 PEG 处理叶片的能荷降低了 54.43%, 而同期对照的能荷降低了 36.94%, 即干旱胁迫下德景天叶片能荷的下降幅度也明显大于对照(图 1, B)。

2.1.2 活性氧调控干旱胁迫处理 图 2 显示, 在干旱胁迫期间, PEG、PEG + H₂O₂ 和 PEG + 苯甲酸钠 3 种处理的德景天叶片的 ATP 含量和能荷均呈逐渐下降趋势, 而各处理 ADP 和 AMP 含量整体呈上升趋势;其中, 在处理结束时, PEG + H₂O₂ 处理叶片的 ATP 含量和能荷分别比处理第 1 天时下降了 87.58%、50.07%, PEG + 苯甲酸钠处理叶片则分别下降了 72.71%、32.55%, 而同期 PEG 处理则分别下降了 82.46%、38.88%, 即 PEG + H₂O₂ 处理的 ATP 含量和能荷降幅最大, PEG 处理居中, 而 PEG + 苯甲酸钠处理的降幅最小。同时, 在干旱胁迫过程中, PEG + H₂O₂ 处理叶片的 ATP 含量和能荷基本均低于同期 PEG 处理, 而 PEG + 苯甲酸钠处



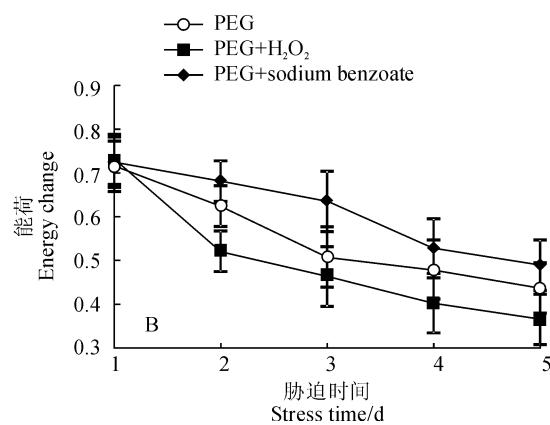
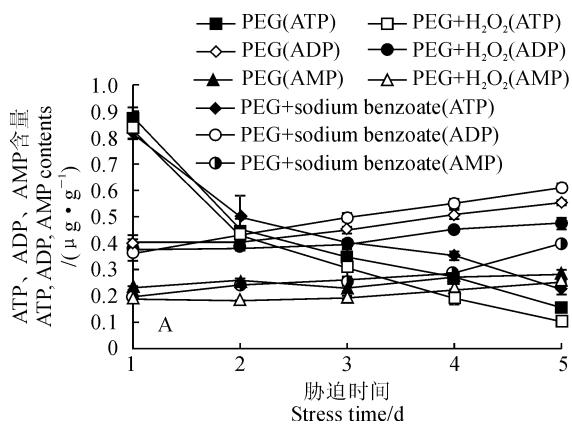


图 2 活性氧调控 PEG 胁迫下德景天叶片能量水平的变化

Fig. 2 The change of energy level in leaves of *S. hybridum* under PEG stress with the regulation of active oxygen

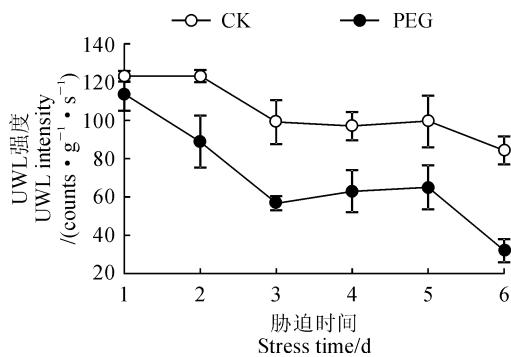


图 3 PEG 胁迫下德景天叶片 UWL 强度的变化

Fig. 3 The change of UWL intensity in leaves of *S. hybridum* under PEG stress

理则高于同期 PEG 处理(图 2,A、B)。可见,施加外源活性氧 H_2O_2 加剧了以 ATP 为代表的能量水平下降,施加外源苯甲酸钠缓减了能量水平的下降。

2.2 干旱胁迫下德景天叶片超微弱发光强度的变化特征

2.2.1 PEG 模拟干旱胁迫处理 随着干旱胁迫时间的延长,对照和 PEG 处理的德景天叶片的超微弱发光(UWL)强度均呈下降趋势,并以 PEG 处理的 UWL 强度下降更快,而对照的 UWL 强度下降较缓慢,胁迫结束时 PEG 处理和对照的 UWL 强度分别比第 1 天降低了 71.88% 和 31.60%;同时,在整个干旱胁迫期间,PEG 处理的 UWL 强度均始终明显低于同期对照(图 3)。可见,干旱胁迫明显降低了德景天叶片超微弱发光强度,且胁迫时间越长降幅越大。

2.2.2 活性氧调控干旱胁迫处理 随着胁迫时间的延长,PEG、PEG+ H_2O_2 和 PEG+苯甲酸钠 3 种处理的德景天叶片的 UWL 强度整体也呈下降趋势。

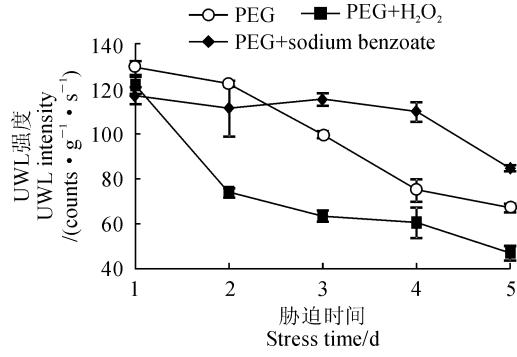


图 4 活性氧调控 PEG 胁迫下德景天叶片 UWL 强度的变化

Fig. 4 The change of UWL intensity in leaves of *S. hybridum* under PEG stress with the regulation of active oxygen

在整个干旱胁迫期间,PEG 处理的 UWL 强度降低了 48.21%;PEG+ H_2O_2 处理的 UWL 强度降低了 61.34%,且始终低于同期 PEG 处理;而苯甲酸钠处理的 UWL 强度降低了 27.52%,并基本高于同期 PEG 处理(图 4)。以上结果说明施加外源活性氧 H_2O_2 加剧了德景天叶片超微弱发光强度下降,施加外源苯甲酸钠缓减了超微弱发光强度的下降幅度。

2.3 干旱胁迫下德景天叶片能量水平与超微弱发光强度的关系

在 PEG 模拟干旱胁迫期间,PEG 处理的德景天叶片 ATP 含量与 UWL 强度之间呈极显著正相关关系($P < 0.01$),能荷与 UWL 强度呈显著正相关关系($P < 0.05$),而其 ADP 含量与 UWL 强度呈显著负相关关系($P < 0.05$)。对照德景天叶片的 ATP 含量与 UWL 之间也呈极显著正相关关系,能荷与 UWL 强度呈显著正相关;而其 ADP 含量与

表 1 PEG 胁迫下德景天叶片能量与 UWL 的相关分析

Table 1 The correlation analysis between UWL and energy level in leaves of *S. hybridum* under PEG stress

处理 Treatment	能量水平 Energy level	回归方程 UWL regression equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient R^2
对照 Control	能荷 Energy change(X_1)	$Y = 132.931 X_1 + 25.610$	0.832 *
	ATP(X_2)	$Y = 57.769 X_2 + 74.124$	0.893 **
	ADP(X_3)	$Y = 139.231 X_3 + 179.107$	-0.956 **
	AMP(X_4)	$Y = -180.703 X_4 + 160.340$	-0.762 *
PEG	能荷 Energy change(X_1)	$Y = 182.462 X_1 - 25.501$	0.885 *
	ATP(X_2)	$Y = 89.654 X_2 + 36.940$	0.892 **
	ADP(X_3)	$Y = 251.382 X_3 + 187.399$	-0.756 *
	AMP(X_4)	$Y = -210.873 X_4 + 120.235$	-0.281

注: Y. UWL 强度; X_i 为对应能量水平; * 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 水平的显著性相关关系。表 2 同Note: Y. mean UWL intensity; while X_i . for corresponding energy level. * and ** indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level respectively. The same as Table 2

表 2 活性氧调控 PEG 胁迫下德景天叶片能量水平与 UWL 的相关分析

Table 2 The correlation analysis between UWL and energy level in leaves of *S. hybridum* under PEG stress with the regulation of active oxygen

处理 Treatment	能量水平 Energy level	回归方程 UWL regression equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient R^2
PEG	能荷 Energy change(X_1)	$Y = 230.239 X_1 - 28.695$	0.950 **
	ATP(X_2)	$Y = 86.041 X_2 + 62.424$	0.865 **
	ADP(X_3)	$Y = -406.300 X_3 + 286.302$	-0.985 **
	AMP(X_4)	$Y = -813.992 X_4 + 304.686$	-0.716 *
$\text{PEG} + \text{H}_2\text{O}_2$	能荷 Energy change(X_1)	$Y = 196.696 X_1 - 24.440$	0.990 **
	ATP(X_2)	$Y = 99.869 X_2 + 36.162$	0.989 **
	ADP(X_3)	$Y = -328.741 X_3 + 224.815$	-0.766 *
	AMP(X_4)	$Y = -791.137 X_4 + 273.547$	-0.672 *
$\text{PEG} + \text{sodium benzoate}$	能荷 Energy change(X_1)	$Y = 102.269 X_1 + 44.980$	0.783 *
	ATP(X_2)	$Y = 41.075 X_2 + 88.694$	0.701 *
	AMP(X_3)	$Y = -165.975 X_3 + 153.341$	-0.952 *
	ADP(X_4)	$Y = 102.269 X_4 + 44.980$	-0.775 *

UWL 强度呈极显著负相关, AMP 与 UWL 强度呈显著负相关(表 1)。以上结果说明干旱胁迫下 UWL 强度与以 ATP 为代表的能量水平存在显著正相关关系。

同时, 在活性氧调控干旱胁迫期间, $\text{PEG} + \text{H}_2\text{O}_2$ 处理的德景天叶片 ATP 含量和能荷均与

UWL 之间呈极显著正相关($P < 0.01$), 而其 ADP、AMP 含量与 UWL 强度呈显著负相关($P < 0.05$); PEG 处理的德景天叶片 ATP 含量和能荷均与 UWL 之间也呈极显著正相关, 其 ADP 含量与 UWL 强度呈极显著负相关, AMP 含量与 UWL 强度呈显著负相关; $\text{PEG} + \text{sodium benzoate}$ 处理的德景天叶

片 ATP 含量和能荷均与 UWL 之间呈显著正相关,而其 ADP、AMP 含量与 UWL 强度呈显著负相关(表 2)。以上结果说明活性氧调控干旱胁迫下,德景天叶片以 ATP 为代表的能量水平也与 UWL 强度呈显著正相关关系,二者关系密切。

3 讨 论

植物的 UWL 与环境的关系极为密切,植物在逆境胁迫中发光表现方面的探索已有一些报道。如对 NaCl 胁迫下绿豆种子早期萌发时 UWL 的研究发现,随着 NaCl 浓度的增加,绿豆胚根的生长速度减慢,生长受到明显抑制,UWL 强度明显下降^[22]。张新华等在研究干旱胁迫下苹果幼苗与幼树的 UWL 发现,严重干旱胁迫使幼苗发生代谢紊乱,生长活力下降,从而导致 UWL 强度下降^[23]。接玉玲等报道,随着干旱胁迫程度的加深,湖北海棠幼苗叶片 UWL 强度逐渐降低^[24]。综合以上研究结果可知,植物受到逆境胁迫时会导致 UWL 强度下降,且 UWL 强度能够反映植物受到的逆境胁迫的程度。本研究也发现,德景天叶片中 UWL 强度随着 PEG 模拟干旱胁迫程度加重而逐渐下降,与以上前人研究结果相一致。

目前,有关植物生长发育与 UWL 的关系远未搞清,植物中 UWL 的产生来源问题更是仅局限于猜想和假设,UWL 有可能来自于能量转换发光的能量观点为其中的一种推测,能量观点猜想高能产物 ATP 中的部分能量以光子的形式释放出来而形成 UWL。依据 UWL 发生可能来自于高能产物 ATP 的假设,ATP 的存在应该能激发 UWL;且促进 ATP 含量增加应该能促进 UWL 强度增强,而 ATP 含量减少则会相应地导致 UWL 强度降低。

迄今,对植物 UWL 与能量关系的研究寥寥可数。如对湖北海棠(*Malus hupehensis* Rehd.)根系体外线粒体 UWL 的研究发现,线粒体提取液的超弱发光强度与线粒体浓度正相关,而线粒体是细胞内进行生物氧化、能量转换的主要细胞器,因此推测植物中 UWL 的来源应与线粒体能量代谢有关^[25]。进一步研究发现杏(*Armeniaca vulgaris* Lam)盛花期后,ATP 含量迅速降低,UWL 强度下降,因此认为杏花的 UWL 与以 ATP 含量为标志的能量水平密切相关^[26]。

本试验研究了 PEG 模拟干旱胁迫条件下以及干旱胁迫后促进活性氧和清除活性氧情况下,德景天叶片 UWL 强度和能量水平的变化及二者之间的

关系,结果表明干旱胁迫下 UWL 强度随着 ATP 含量的下降而下降;干旱胁迫下促进活性氧加剧了德景天叶片 ATP 含量的下降,同时加剧了 UWL 强度的下降;干旱胁迫下清除活性氧则缓减了叶片 ATP 含量和 UWL 强度的下降。进一步的相关性分析也表明德景天叶片 UWL 强度与 ATP 含量呈显著正相关。由以上结果可知,干旱胁迫下德景天叶片 UWL 强度随着 ATP 含量的下降而降低,ATP 含量应与 UWL 的产生密切相关。笔者对草莓果实衰老过程中活性氧和能量与 UWL 的关系的研究也发现,在草莓果实衰老过程中,UWL 强度随着活性氧的积累而下降,随着 ATP 水平的下降而下降,初步表明活性氧并不是产生 UWL 的直接因子,而是间接影响了 UWL,而能量水平则与 UWL 的产生有关^[27-29]。

目前,还不能将 UWL 与植物的某一生理过程或某一化学反应联系起来而圆满解释植物超弱发光现象,但普遍认为植物的 UWL 和外界光激发有直接关系。有研究认为植物的 UWL 与植物光形态建成和光合作用等生长代谢过程有密切联系。如李德红等研究发现,植物叶片的 UWL 与其所处的生长发育阶段密切相关,成熟叶片的光合作用强,其 UWL 也较强;光合作用相对较弱的叶片 UWL 强度也较弱^[30]。谭石慈等报道,叶片和叶绿体的延时发光光谱很一致,二者在 485、560~590、650、685、725~735 nm 附近都有发射峰。叶片与叶绿体之间发光光谱的这种一致性说明叶片的 UWL 主要来自叶绿体^[31]。进一步研究白菜体外叶绿体 UWL 时发现,叶片叶绿体应与 UWL 来源有关,并认为叶绿体的 UWL 可能主要来自光合作用的电子传递链,而不能简单地归因于该过程的自由基^[32]。叶绿体是植物叶片中进行光合作用的细胞器,是进行光能吸收、转化、能量贮存的场所,叶绿体就像一个精致微观的换能器,通过光合磷酸化与电子传递偶联生成 ATP,不断地将光能转换为化学能贮存在有机分子中。因此,由植物叶绿体和光合作用与能量的关系、植物叶绿体和光合作用与 UWL 的关系来看,以 ATP 为代表的能量水平应与 UWL 的来源有某种联系。植物光合作用中能量吸收、转化、贮存是一个复杂的生理过程,本试验结果初步表明 ATP 与 UWL 的产生和来源有关,以 ATP 为代表的能量水平与 UWL 产生的关系究竟如何尚不明确,有待于进一步的试验来研究探索。

参考文献:

- [1] 袁佐清.生物超微弱发光研究进展[J].安徽农业科学,2008,36(8): 3 092-3 094.
YUAN Z Q. Progress in research on ultra weakbioluminescence[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36**(8): 3 092-3 094.
- [2] GURWITSCH A. Denature desspezifischenerregers der zellteilung[J]. *Development Genes and Evolution*, 1923, **100**(1): 11-40.
- [3] 王 畅,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 ultralweak bioluminescence of serum in dairy cow [J]. *Jiangsu Agricultural Science*, 2013, **41**(2): 187-189.
- [4] 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 ultraweak luminescence of strawberry[J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2016, **44**(3): 29-32.
- [5] RUTH B, POPP F A. Experimentelle untersuchungen zur ultraschwachen Photonenemission biologischer System / Experimental investigations on ultraweak photonemission from biological systems[J]. *Zeitschrift Für Naturforschung C*, 2014, **31**(11-12): 741-745.
- [6] POPP F A. Biophotonemission[J]. *Experientia*, 1988, **44**(7): 543-544.
- [7] 刘高峰,杨洪强,张 伟,等.水杨酸对湖北海棠活性氧代谢及超微弱发光的影响[J].园艺学报,2006,33(1): 118-121.
LIU G F, YANG H Q, ZHANG W, et al. Effects of salicylic acid on the active oxygen metabolism and ultraweak luminescence of *Malus hupehensis* Rehd[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2006, **33**(1): 118-121.
- [8] COSTANZO E, GULINO M, LANZANO L, et al. Single seed viability checked by delayed luminescence[J]. *European Biophysics Journal*, 2008, **37**(2): 235-238.
- [9] TRIGLIA A, MALFA G L, MUSUMECI F, et al. Delayed luminescence as an indicator of tomato fruit quality[J]. *Journal of Food Science*, 1998, **63**(3): 512-515.
- [10] YAN Y, POPP F A, ROTHE G M. Correlation between germination capacity and bio photon emission of barley seeds [J]. *Seed Science & Technology*, 2003, **31**(31): 249-258.
- [11] 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 physio-
- logical metabolism of chrysanthemum during floral differentiation[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2008, **35**(12): 1 819-1 824.
- [12] 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.
- [13] 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. Ultraweakbiophoton emission and its mechanism during seed germination of *Amaranthus hypochondriacus*[J]. *Seed*, 2004, **23**(7): 23-27.
- [14] 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.
LIU H M, LIAO X R, WU L F, et al. Effects of heat shock on seed germination, bioluminescence and antioxidant enzyme activities in wheat [J]. *Journal of Food and Biotechnology*, 2006, **25**(3): 75-78.
- [15] 张新华,杨洪强.植物的超微弱发光[J].山东农业大学学报,2003,34(4): 605-608.
ZHANG X H, YANG H Q. Ultraweakbioluminescence in plant [J]. *Journal of Shandong Agricultural University*, 2003, **34**(4): 605-608.
- [16] 朱冠宇,刘 欢,梁 爽,等.草莓果实发育成熟过程中超微弱发光的变化[J].内蒙古农业科技,2015,43(3): 9-11.
ZHU G Y, LIU H, LIANG S, et al. Changes of ultra-weak luminescence during the process of strawberry fruit development and maturation[J]. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology*, 2015, **43**(3): 9-11.
- [17] 张新华.苹果与桃杏超微弱发光及其生理生化机制[D].山东泰安:山东农业大学,2004.
- [18] 逆境胁迫下苹果及其砧木和生物发光与能量代谢[D].山东泰安:山东农业大学,2007.
- [19] 申艳梅.景天科植物耐旱性及其机理的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2010.
- [20] 刘国荣,王芳芳,徐振华,等.八宝景天等地被植物的抗旱光合特性研究[J].河北农业科学,2015,19(6): 47-51.
LIU G R, WANG F F, XU Z H, et al. The research of drought resistance photosynthesis characteristics of ground-cover plants as *Sedum spectabile* Boreaeutic[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2015, **19**(6): 47-51.
- [21] 刘 欢.活性氧和能量调控下草莓果实采后衰老过程中超微弱发光的变化及其激发机制[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [22] 曹晓兵,李 光,廖祥儒,等.盐胁迫下绿豆幼苗的超微弱发

- 光[J]. 热带亚热带植物学报, 2004, 12(3): 261-264.
- CAO X B, LI G, LIAO X R, et al. Ultraweak photon emission in mung bean seedlings under salt stress[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2004, 12(3): 261-264.
- [23] 张新华, 杨洪强. 水分胁迫下苹果幼苗与幼树的超微弱发光[C]//. 中国植物生理学会第九次全国会议论文摘要汇编. 2004: 262.
- [24] 接玉玲, 赵海洲, 张伟, 等. 甜菜碱对干旱胁迫下湖北海棠超微弱发光及抗氧化能力的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2394-2398.
- JIE Y L, ZHAO H Z, ZHANG W, et al. Effects of betaine on ultra weak luminescence and antioxidant capacity of Hubei Begonia under drought stress[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(12): 2394-2398.
- [25] 张新华, 杨洪强. 植物叶绿体和线粒体的超微弱发光[J]. 植物生理学通讯, 2004, 40(1): 111-114.
- ZHANG X H, YANG H Q. Ultraweak bioluminescence of chloroplast and mitochondria in plants[J]. *Plant Physiology Communication*, 2004, 40(1): 111-114.
- [26] 张新华, 杨洪强, 李富, 等. 杏花开放过程中超弱发光和ATP及活性氧含量的变化[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2004, 30(1): 41-44.
- ZHANG X H, YANG H Q, LI F, et al. Changes in ultraweak luminescence, ATP and active oxygen contents during apricot fluorescence[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2004, 30(1): 41-44.
- [27] 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 UPE and reactive oxygen during the ageing process of strawberry fruit [J]. *Northern Horticulture*, 2016, (11): 1-4.
- [28] 郭金丽, 刘欢, 梁爽, 等. 活性氧调控下草莓果实衰老过程中活性氧与超微弱发光的关系[J]. 果树学报, 2017, 34(3): 363-369.
- GUO J L, LIU H, LIANG S, et al. Relationship between reactive oxygen species and ultraweak luminescence in strawberry fruit during senescence under various reactive oxygen regulation treatments[J]. *Journal of Fruit Science*, 2017, 34(3): 363-369.
- [29] 郭金丽, 陈贵华, 樊丽, 等. 草莓果实采后衰老过程中能量代谢的变化[J]. 北方园艺, 2016, (20): 18-21.
- GUO J L, CHEN G H, FAN L, et al. Dynamic variation of energy metabolism during aging process in strawberry fruit [J]. *Northern Horticulture*, 2016, (20): 18-21.
- [30] 李德红, 邢达, 谭石慈, 等. 绿豆和花生的超弱发光[J]. 植物生理学报, 1998, 24(2): 177-182.
- LI D H, XING D, TAN S C, et al. Ultraweakbiophoton emission in mung bean and pean[J]. *Plant Physiology Journal*, 1998, 24(2): 177-182.
- [31] 谭石慈, 邢达, 唐永红, 等. 植物叶片超微弱发光光谱研究[J]. 光子学报, 2000, 29(11): 961-965.
- TAN S C, XING D, TANG Y H, et al. Spectral studies of ultraweakbiophoton emission from plant's leaves [J]. *Aata Photonic Sinica*, 2000, 29(11): 961-965.
- [32] 李德红, 唐永红, 何永红, 等. 白菜叶绿体的超弱发光机理初探[J]. 激光生物学报, 2002, 11(1): 64.
- LI D H, TANG Y H, HE Y H, et al. The mechanism of ultraweakbiophoton emission of chloroplast in Chinese cabbage [J]. *Journal of Laser Biology*, 2002, 11(1): 64.

(编辑:裴阿卫)