

干旱胁迫下德景天叶片超微弱发光与活性氧的关系

梁爽, 白杨, 闫宇彤, 李连国, 郭金丽*

(内蒙古农业大学农学院, 呼和浩特 010019)

摘要: 以德景天为试材, 研究其在聚乙二醇 (PEG6000) 模拟干旱胁迫处理及施加过氧化氢 (H_2O_2) 和苯甲酸钠处理 PEG 模拟干旱胁迫下的超微弱发光 (UWL) 和活性氧的变化及二者之间的关系。结果表明, 在干旱胁迫过程中, PEG 处理和对照的德景天叶片超氧阴离子 (O_2^-) 产生速率、丙二醛 (MDA) 含量和相对电导率均持续上升, UWL 均下降; 在整个干旱胁迫过程中, PEG 处理的 O_2^- 产生速率、MDA 含量和相对电导率均高于对照, UWL 强度均低于对照。施加 H_2O_2 和苯甲酸钠处理 PEG 模拟干旱胁迫过程中, PEG+ H_2O_2 处理、PEG+苯甲酸钠处理和 PEG 处理 (对照) 的 O_2^- 产生速率、MDA 含量和相对电导率均持续上升, UWL 均下降。在整个干旱胁迫过程中, H_2O_2 处理的 O_2^- 产生速率、MDA 含量和相对电导率均高于对照, 苯甲酸钠处理后三者均低于对照; H_2O_2 处理的 UWL 强度均低于对照, 苯甲酸钠处理的 UWL 强度均高于对照。在德景天干旱胁迫及活性氧处理干旱胁迫过程中, UWL 强度均随着活性氧的积累而下降; 干旱胁迫下, 施加 H_2O_2 处理加剧了活性氧的上升积累, 同时加剧了 UWL 强度下降; 施加苯甲酸钠处理减缓了活性氧的上升积累, 同时减缓了 UWL 强度的下降。以上结果说明, 干旱胁迫引发 UWL 强度降低, 活性氧积累不是引起 UWL 变化的主要来源。有可能活性氧是 UWL 的来源之一, 但存在其他因素对 UWL 的影响更强, 导致活性氧的变化并不能体现 UWL 的变化趋势。

关键词: 德景天; PEG 干旱胁迫; 超微弱发光; 活性氧

中图分类号: Q945

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)04-0695-07

The relationship between ultraweak luminescence and reactive oxygen under drought stress in the *Sedum hybridum* leaf

LIANG Shuang, BAI Yang, YAN Yutong, LI Lianguo, GUO Jinli

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

Abstract: The dynamic variation of ultraweak luminescence (UWL) and its relationship with reactive oxygen were studied during the simulated drought stress with PEG6000 solution and hydrogen peroxide (H_2O_2) treatment, and sodium benzoate treatment under the PEG simulated drought stress process in *Sedum hybridum*. The results showed that the superoxide anion radical (O_2^-) production rate, malondialdehyde (MDA) content and relative electric conductivity of the PEG treatment and CK in the drought stress process increased continually, while the UWL intensity decreased. Meanwhile, the O_2^- production rate, MDA content and relative electric conductivity of the PEG treatment were all higher than those of CK except that the UWL intensity was lower than that of CK in the whole drought stress process. During H_2O_2 treatment and sodium benzoate treatment under the PEG simulated drought stress process, the O_2^- production rate, MDA content and relative electric conductivity under PEG+ H_2O_2 treatment, PEG+sodium benzoate treatment and PEG (CK) increased continually, while the UWL intensity decreased. In whole drought stress process, the O_2^- production rate, MDA content and relative electric conductivity under H_2O_2 treatment were all higher than those of CK, except that the UWL intensity was lower than that of CK. However, the O_2^- production rate, MDA content and relative electric conductivity under benzoate treatment were all lower than those of CK, except that the UWL intensity was higher than that of CK. During the PEG simulated drought stress with H_2O_2 treatment and sodium benzoate treatment under the simulated drought

收稿日期: 2017-01-30

基金项目: 内蒙古自然科学基金 (2012MS0324) 资助。

作者简介: 梁爽, 硕士。E-mail: 514952303@qq.com

* 通信作者: 郭金丽, 博士, 副教授。E-mail: guojinli1111@163.com

stress process in *Sedum hybridum*, UWL intensity decreased with the accumulation of active oxygen. H_2O_2 treatment aggravated the accumulation of reactive oxygen as well as the decline of UWL. Sodium benzoate treatment slowed down the accumulation of reactive oxygen as well as the decline of UWL. Based on the results, we concluded that drought stress could cause the decrease of UWL intensity, and the accumulation of reactive oxygen species was not the main source of UWL. It is possible that reactive oxygen species is one of the sources of UWL, but other factors have more influence on UWL, and the change of reactive oxygen species could not reflect the change trend of UWL.

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

所有的生物都会发射一种光谱范围很宽的超微弱光 (ultraweak luminescence, UWL), 它是一种极微弱的连续光子辐射, 是生物在生命活动中出现的一种机体自发发光, 其强度为 $100 \sim 10^3 \text{ hv} \cdot (\text{s} \cdot \text{cm}^2)^{-1}$, 波长范围为 $180 \sim 800 \text{ nm}$, 被科学家称之为生物系统的代谢超微弱发光^[1-2]。研究表明, UWL 与生物体的氧化代谢、信息传递、光合作用、细胞分裂、癌变、死亡及生长调控等基本生命过程密切相关^[3-6]。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的超微弱发光现象^[7], 直到 20 世纪 80 年代发展起来的一种超高灵敏度的弱光图像探测器—微通道板像增强器, 使得超微弱发光的研究进入到一个新的阶段。生物超弱发光已成为生物光子学的重要研究方向之一, 涉及到农业、医学、食品、药理学和环境科学等许多领域^[8-9]。

目前, UWL 在农业领域中的研究还较少, 主要涉及植物在不同发育阶段的 UWL 表现、UWL 与果实品质、UWL 与植物种子生活力的关系、UWL 与花芽分化、UWL 与农事管理以及 UWL 与植物的抗逆性的关系等方面的研究^[10-11], 其中 UWL 与抗逆性研究方面相对较多^[12-14], 但植物 UWL 的来源机制不十分清楚。有试验表明植物的 UWL 与环境的关系极为密切, 不同植物、不同的环境条件下超弱发光均有所不同, UWL 作为植物生长代谢的动态指标常常用来研究各种植物在不同环境胁迫下的抗性^[15]。以上研究基本停留在 UWL 与植物生长发育的关系上, 远未探清 UWL 与植物的关系, 更未涉及更深层次的研究, 如 UWL 产生的生物学机制。生物化学的观点认为, 生物系统中的 UWL 可能来源于活性氧^[16]。活性氧在生物体内积累, 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^[17]。UWL 的来源和机制还可能与 DNA 发光和能量转换等方面^[18]有关, 但以上观点目前仅局限于猜想和假设, 并无充分的试验证实。

德景天 (*Sedum hybridum*) 是景天科景天属多

年生植物, 是优良的园林地被植物, 具有极强的抗旱性。目前关于景天植物的抗逆性研究方面多集中在抗旱性^[19-21]。有研究表明植物的抗旱性与 UWL 有关, 王沛洪等^[22]研究发现, 在干旱条件下, 抗旱性强的小麦种子的萌发速度和发光强度高于不抗旱的小麦种子。同时也有学者发现, 低温下, 抗旱性强的玉米种子萌发时 UWL 的强度明显高于抗旱性差的种子^[23]。以上研究说明 UWL 与抗旱性有关系, 但有关 UWL 与抗旱性的生物学来源机制的研究还较少, 干旱胁迫下德景天的 UWL 与活性氧的关系还尚未有报道。

本试验以德景天为研究对象, 通过研究其在 PEG 模拟干旱胁迫和活性氧诱剂 H_2O_2 与清除剂苯甲酸钠处理 PEG 模拟干旱胁迫下的活性氧及 UWL 的变化及二者的关系, 旨在揭示德景天干旱胁迫下 UWL 的表现及 UWL 产生的来源和机制, 为研究 UWL 与抗旱性的关系及 UWL 的产生机制提供重要理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为株龄 2 年生的德景天 (*Sedum hybridum*) 植株, 种植于内蒙古农业大学教学与科研基地的。供试药品 PEG6000 由国内 Biosharp 公司生产, 过氧化氢溶液和苯甲酸钠由国药集团化学试剂有限公司生产。

1.2 方法

1.2.1 干旱胁迫下德景天超微弱发光及活性氧变化 取株龄为 2 年, 株高 20 cm, 生长状况相一致的德景天植株, 置于体积为 3 L 的 20%PEG 溶液中进行培养, 以等量体积的蒸馏水作为对照。室温为 25°C 左右, 相对湿度为 60%左右, 重复 5 次, 每个重复 10 株德景天, 之后每 1 d 取样 1 次, 连续取样 6 d 进行试验测定, 期间更换 3 次培养液。

1.2.2 活性氧处理干旱胁迫下德景天超微弱发光及活性氧变化 取株龄为 2 年, 株高 20 cm, 生长状况相一致的德景天植株, 分别置于体积为 3 L 的

H_2O_2 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ +20%PEG 溶液和苯甲酸钠 $10 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ +20%PEG 溶液中进行培养, 以 20%PEG 溶液为对照。室温为 25°C 左右, 相对湿度为 60% 左右, 重复 5 次, 每个重复 10 株景天, 之后每 1 d 取样 1 次, 连续取样 5 d 进行试验测定, 期间更换 3 次培养液。

1.3 项目测定

UWL 的测定使用的仪器为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 1050 V, 标准光源发光强度 $20000 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$, 采样时间 30 s, 采样间隔 1 s。样品测定时在暗室及室温 (20 ± 2) $^\circ\text{C}$, 相对湿度 (60 ± 5) % 下进行。取德景天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德景天叶片的 UWL 强度。 O_2^- 产生速率的测定参考李玲等的方法^[24]; MDA 含量采用李合生^[25]的硫代巴比妥酸 (TBA) 法、相对电导率的测定采用邹琪^[26]的电导率法。

1.4 数据分析

采用 Excel 统计软件进行处理, 用 SPSS 软件进行数据分析。

2 结果与分析

2.1 干旱胁迫下德景天叶片活性氧与超微弱发光的关系

2.1.1 干旱胁迫下德景天叶片活性氧的变化 在胁迫期内, PEG 处理和对照的德景天叶片的 O_2^- 产生速率均呈上升趋势。对照的 O_2^- 产生速率上升缓慢, 第 6 天上升到最大值, 为 $3.865 \text{ nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$; PEG 处理的 O_2^- 产生速率在第 2 天开始已经高于对照, 第 6 天为 $9.462 \text{ nmol}\cdot(\text{g}\cdot\text{min})^{-1}$, 比对照增加了 144.8%, 整体均高于对照 (图 1)。

随着胁迫时间的延长, PEG 处理和对照的德景天叶片的 MDA 含量均呈上升趋势。对照的 MDA 含量上升趋势缓慢, 在第 6 天达到最高值为 $2.211 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$; PEG 处理的 MDA 含量从第 2 天大幅度上升, 在第 3 天往后的上升幅度趋于平缓, 第 6 天到达最大值为 $3.657 \text{ nmol}\cdot\text{g}^{-1}$, 比对照增加了 65.4%, 整体均高于对照 (图 2)。

在胁迫期间, PEG 处理和对照的德景天叶片的相对电导率呈上升趋势。对照的相对电导率上升趋势不明显, 第 6 天达到最大值, 为 36.8%; PEG 处理的相对电导率在第 6 天到达最大值, 为 79.2%,

比对照高了 115.2%, 整体均高于对照 (图 3)。

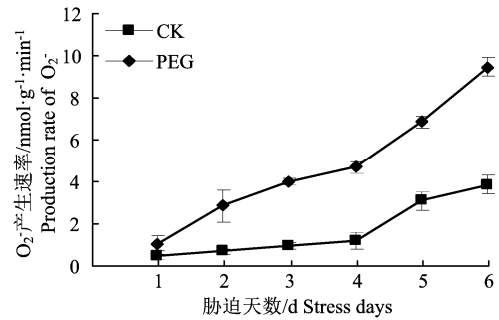


图 1 PEG 模拟干旱胁迫下德景天叶片 O_2^- 产生速率的变化
Figure 1 The changes of production rate of O_2^- under PEG simulated drought stress in leaves of *Sedum hybridum*

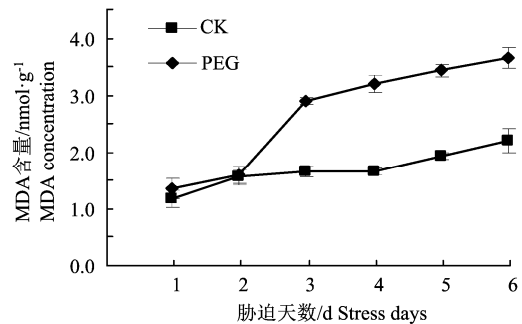


图 2 PEG 模拟干旱胁迫下德景天叶片丙二醛的变化
Figure 2 The changes of MDA content under PEG simulated drought stress in leaves of *Sedum hybridum*

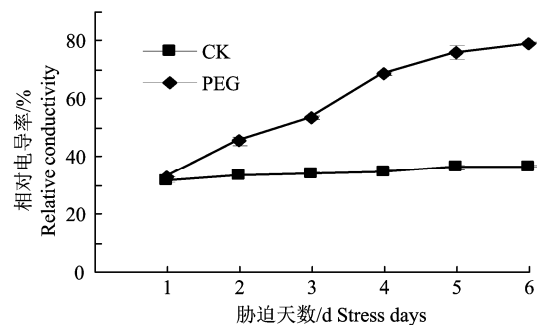


图 3 PEG 模拟干旱胁迫下德景天叶片相对电导率的变化
Figure 3 The changes of relative conductivity under PEG simulated drought stress in leaves of *Sedum hybridum*

2.1.2 干旱胁迫下德景天叶片 UWL 的变化 胁迫期间, PEG 处理和对照的德景天叶片的 UWL 强度均呈下降的趋势, 对照的 UWL 强度在胁迫的第 2 天上升到最高值 $123.247 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$, 之后开始缓慢下降, 第 6 天下降到 $84.227 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$; PEG 处理的 UWL 强度下降较明显, 第 6 天下降到最低值 $31.93 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$, 比对照低了 62.1%, 整个胁迫过程中, UWL 强度均低于对照 (图 4)。

2.1.3 干旱胁迫下德景天叶片超微弱发光与活性氧的关系 PEG 处理的德景天叶片的 MDA、 O_2^- 和相

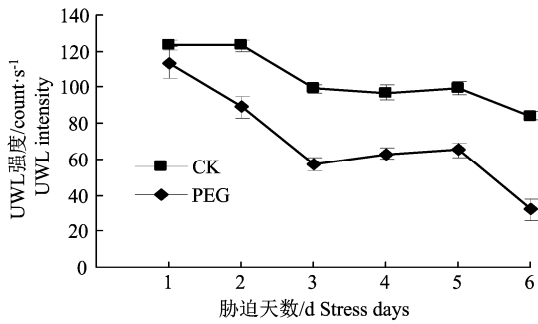


图 4 PEG 模拟干旱胁迫下德景天叶片 UWL 的变化
Figure 4 The changes of UWL under PEG simulated drought stress in leaves of *Sedum hybridum*

对电导率与 UWL 之间呈高度负相关, 相关性依次降低, 差异性显著; 对照德景天叶片的相对电导率、MDA、O₂⁻与 UWL 之间呈高度负相关, 相关性依次降低, 差异性极显著。以上 UWL 与活性氧的相关

性分析说明, 德景天在干旱胁迫过程中 UWL 的强度随着活性氧的积累而下降 (表 1)。

2.2 活性氧处理干旱胁迫下德景天叶片活性氧与超微弱发光的关系

2.2.1 活性氧处理干旱胁迫下德景天叶片活性氧的变化 在胁迫期间, PEG+H₂O₂ 处理、PEG+苯甲酸钠处理和 PEG 对照 3 种处理的德景天叶片的 O₂⁻产生速率均呈上升趋势。对照的 O₂⁻产生速率在第 5 天上升幅度最大, 达到最高值 6.781 nmol·(g·min)⁻¹; H₂O₂ 处理的 O₂⁻产生速率在第 2 天开始已经高于对照, 第 5 天为 7.497 nmol·(g·min)⁻¹, 比对照增加了 10.6%, 整体高于对照; 苯甲酸钠处理的 O₂⁻产生速率在第 3 天上升幅度最大, 第 5 天为 4.567 nmol·(g·min)⁻¹, 比对照减少了 32.7%, 整体低于对照 (图 5)。

表 1 PEG 模拟干旱胁迫下德景天叶片 UWL 与活性氧的相关分析

Table 1 The correlation analysis between UWL and active oxygen under PEG simulated drought stress in leaves of *Sedum hybridum*

处理 Treatment	活性氧 Active oxygen	回归方程 UWL regression equation	相关系数 R ² Correlation coefficient R ²
对照 CK	相对电导率	$Y = -7.199X_1 + 352.947$	-0.864*
	MDA	$Y = -38.048X_2 + 169.004$	-0.852*
	O ₂ ⁻	$Y = -8.500X_3 + 118.936$	-0.767*
PEG	MDA	$Y = -26.406X_4 + 140.965$	-0.916**
	O ₂ ⁻	$Y = -8.499X_5 + 110.906$	-0.899**
	相对电导率	$Y = -1.328X_6 + 148.555$	-0.868**

注: Y: UWL 强度; X₁~X₆为对应活性氧指标; “*”表示 P<0.05 下的差异性相关, “**”表示 P<0.01 的极显著性相关。

Note: Y means UWL intensity; X₁-X₆ stand for corresponding active oxygen levels; “*” indicates significant correlation at 0.05 level, and “**” indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

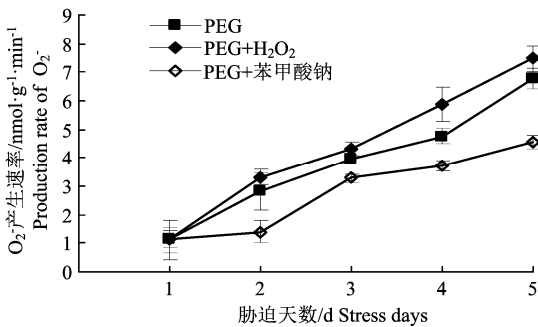


图 5 活性氧处理下德景天叶片 O₂⁻产生速率的变化
Figure 5 The changes of production rate of O₂⁻ with the conduct of active oxygen in leaves of *Sedum hybridum*

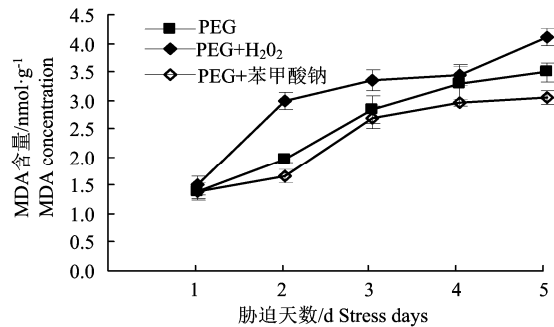


图 6 活性氧处理下德景天叶片 MDA 含量的变化
Figure 6 The changes of MDA content with the conduct of active oxygen in leaves of *Sedum hybridum*

在胁迫期间, PEG+H₂O₂ 处理、PEG+苯甲酸钠处理和 PEG 对照 3 种处理的德景天叶片的 MDA 含量均呈上升趋势。对照的 MDA 含量在第 5 天达到最高值, 为 3.496 nmol·g⁻¹; H₂O₂ 处理的 MDA 含量在第 2 天开始已经高于对照, 第 5 天为

4.119 nmol·g⁻¹, 比对照增加了 17.8%, 整体均高于对照; 苯甲酸钠处理的 MDA 含量在第 3 天上升幅度最大, 随后缓慢上升, 第 5 天为 3.052 nmol·g⁻¹, 比对照减少 12.7%, 整体低于对照 (图 6)。随着胁迫时间的延长, PEG+H₂O₂ 处理、PEG+苯甲酸钠处

理和 PEG 对照 3 种处理的德景天叶片的相对电导率均呈上升趋势。对照的相对电导率在第 5 天达到最高值, 为 76.1%; H_2O_2 处理的相对电导率在第 5 天为 94.1%, 比对照高了 23.7%, 整体均高于对照; 苯甲酸钠处理的相对电导率在第 5 天为 65.2%, 比对照低了 14.3%, 整体低于对照 (图 7)。

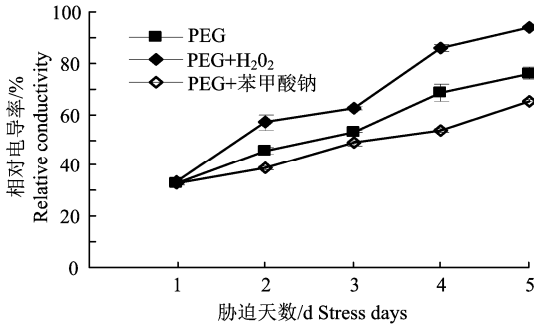


图 7 活性氧处理下德景天叶片相对电导率的变化

Figure 7 The changes of relative conductivity with the conduct of active oxygen in leaves of *Sedum hybridum*

2.2.2 活性氧处理干旱胁迫下德景天叶片超微弱发光的变化 随着胁迫时间的延长, PEG 对照、PEG+ H_2O_2 处理和 PEG+苯甲酸钠 3 种处理的德景天叶片的 UWL 强度整体呈下降趋势。对照的 UWL 强度第 4 天下降幅度最大, 第 5 天达到最低值为 $66.893 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$; H_2O_2 处理的 UWL 强度在第 2 天开始已经明显低于对照, 第 5 天达到最低值, 为 $46.963 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$, 比对照减少了 19.93%, 整体低于对照; 苯甲酸钠处理的 UWL 强度在第 2 天低于对

照, 第 5 天下降到最低值, 为 $84.7 \text{ count}\cdot\text{s}^{-1}$, 比对照增加了 26.8%, 整体高于对照。说明促进活性氧爆发和积累加剧了 UWL 强度下降, 清除活性氧减缓了 UWL 强度下降 (图 8)。

2.2.3 活性氧处理干旱胁迫下德景天叶片超微弱发光与活性氧的关系 H_2O_2 处理的德景天叶片的相对电导率、 O_2^- 、MDA 与 UWL 之间呈高度负相关, 相关性依次降低, 差异性显著; 苯甲酸钠处理的德景天叶片的相对电导率、 O_2^- 与 UWL 之间呈高度负相关, 相关性依次降低, 差异性显著, MDA 与 UWL 之间呈中度负相关, 差异性显著; 对照的德景天叶片的相对电导率、MDA 和 O_2^- 与 UWL 之间呈高度负相关, 相关性依次降低, 差异性显著, 其中相对电导率、MDA 与 UWL 之间差异性极显著。以上 UWL 与活性氧的相关性分析说明 UWL 强度会随着活性氧的积累而下降 (表 2)。

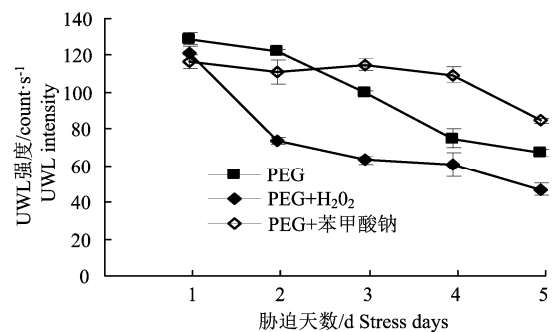


图 8 活性氧处理下德景天叶片超微弱发光的变化

Figure 8 The changes of UWL with the conduct of active oxygen in leaves of *Sedum hybridum*

表 2 活性氧处理 PEG 模拟干旱胁迫下德景天叶片 UWL 与活性氧的相关分析

Table 2 The correlation analysis between UWL and active oxygen with the conduct of active oxygen under PEG simulated drought stress in leaves of *Sedum hybridum*

处理 Treatment	活性氧 Active oxygen	回归方程 UWL regression equation	相关系数 R^2 Correlation coefficient R^2
PEG 对照 PEG CK	相对电导率	$Y = -1.571X_1 + 185.277$	-0.983^{**}
	MDA	$Y = -30.239X_2 + 177.132$	-0.977^{**}
	O_2^-	$Y = -12.447X_3 + 146.946$	-0.948^*
PEG+ H_2O_2	相对电导率	$Y = -1.081X_4 + 145.059$	-0.915^*
	O_2^-	$Y = -10.890X_5 + 121.403$	-0.926^*
	MDA	$Y = -43.613X_6 + 216.189$	-0.914^*
PEG+苯甲酸钠	相对电导率	$Y = -0.856X_7 + 148.534$	-0.828^*
PEG+sodium benzoate	O_2^-	$Y = -6.156X_8 + 124.888$	-0.706^*
	MDA	$Y = -9.853X_9 + 130.709$	-0.581^*

注: Y: UWL 强度; $X_1 \sim X_9$ 为对应活性氧; “*”表示 $P < 0.05$ 下的差异性相关, “**”表示 $P < 0.01$ 的极显著性相关。

Note: Y means UWL intensity; $X_1 \sim X_9$ stand for corresponding active oxygen level, “*” indicates significant correlation at 0.05 level, and “**” indicates extremely significant correlation at 0.01 level.

3 讨论与结论

在正常情况下, 细胞内活性氧的产生与清除是

处于动态平衡状态, 但在干旱胁迫下, 植物体内活性氧含量增加, 清除活性氧的保护酶系统活性降低, 抗氧化物质受到破坏, 导致活性氧积累, 引起膜脂

过氧化,使膜结构和功能受到伤害,从而使植株受到伤害^[17]。生物化学观点认为,生物机体内存在的活性氧与UWL有着紧密的联系,生活细胞在生化过程中,特别是不饱和脂肪酸氧化产生的过氧化自由基复合后形成的三重激发态过氧化物退激所形成各种可辐射的活化状态可能是UWL的来源之一^[2,15-16,27-28]。如张菊平等^[18]发现,当植物处于各种污染的环境中时,细胞或组织中的活性氧代谢增强,导致UWL增强。但接玉玲等^[29]研究干旱胁迫下湖北海棠幼苗UWL和活性氧的关系发现,随着胁迫程度的加深,活性氧积累而叶片UWL强度逐渐降低,这一结论与张菊平等^[18]的研究结果不一致。张新华等^[30]研究也认为严重的干旱胁迫会使幼苗发生代谢紊乱,生长活力下降,从而导致UWL强度下降。

本试验研究了干旱胁迫过程中UWL和活性氧的变化及二者之间的关系。在干旱胁迫过程中,对照和PEG处理的德景天UWL强度整体呈下降趋势, O_2^- 产生速率、MDA含量、相对电导率整体呈上升积累;UWL与 O_2^- 、MDA、相对电导率均呈高度负相关,说明活性氧水平整体上升积累,UWL强度下降,UWL强度并没有随着活性氧的积累而增强。本试验进一步研究了干旱胁迫下采用 H_2O_2 处理和苯甲酸钠处理德景天过程中UWL和活性氧的变化及二者之间的关系。对照的德景天叶片的相对电导率、MDA和 O_2^- 与UWL之间呈高度负相关,相关性依次降低; H_2O_2 处理的德景天叶片的相对电导率、 O_2^- 、MDA与UWL之间呈高度负相关,相关性依次降低;苯甲酸钠处理的德景天叶片的相对电导率、 O_2^- 与UWL之间呈高度负相关,相关性依次降低,MDA与UWL之间呈中度负相关。以上研究表明UWL强度会随着活性氧的积累而下降,UWL强度并没有随着活性氧的积累而增强,活性氧并不是UWL的直接来源。植物体中UWL的降低可能是干旱胁迫时活性氧大量积累引发或加剧膜脂质过氧化产生MDA,造成细胞膜系统的破坏,使膜透性增高,对植物产生严重的伤害,使其植株代谢发生紊乱,组织结构受到破坏,生长活力下降,从而导致UWL的减弱^[17],这有待于进一步试验来研究证实。该试验结果与本试验研究团队之前对草莓果实衰老过程中UWL随着活性氧的积累而下降,清除活性氧有利于UWL强度的增强,活性氧并不是UWL的直接来源的研究结果相符合^[31],进一步为UWL与活性氧的关系及UWL的产生机制提供理论依据。

综合以上情况,在干旱胁迫及活性氧处理德景天干旱胁迫过程中活性氧的积累并没有引起UWL的变化;或并不是引起UWL变化的主要来源,有可能活性氧是UWL的来源之一,但存在其他因素对UWL的影响更强,导致活性氧的变化并不能体现UWL的变化趋势。目前只有极少试验探索UWL与活性氧的关系,远不足以探清二者之间的关系,有待于进行大量的试验来研究证实。

参考文献:

- [1] 李淑丽,郑新亮,任兆玉.生物超微弱发光研究进展[J].激光杂志,2004,25(4):4-6.
- [2] 陈胜,黄楚云,李默然.生物超微弱发光及其应用[J].黄石理工学院学报,2006,22(4):82-84.
- [3] 刘高峰.生物超微弱发光的研究进展[J].生物学教学,2013,38(6):2-3.
- [4] COSTANZO E, GULINO M, LANZANÒ L, et al. Single seed viability checked by delayed luminescence[J]. Eur Biophys J, 2008, 37(2): 235-238.
- [5] TRIGLIA A, MALFA G L, MUSUMECI F, et al. Delayed luminescence as an indicator of tomato fruit quality[J]. J Food Sci, 1998, 63(3): 512-515.
- [6] YAN Y, Popp F A, ROTHE G M. Correlation between germination capacity and biophoton emission of barley seeds (*Hordeum vulgare* L.) [J]. Seed Sci Technol, 2003, 31(2): 249-258.
- [7] GURWITSCH A. Die Natur des spezifischen Erregers der Zellteilung [J]. Dev Genes Evol, 1923, 100(1): 11-40.
- [8] 周禾,杨起简.生物发光与生物超微弱发光[J].北京农学院学报,1995(2):84-93.
- [9] 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.
- [10] 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):1819-1824.
- [11] 李群,田茜,贾文斌,等.生物超弱发光特性在种质资源保存中的应用研究[J].种子科技,2016,34(1):34-37.
- [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(农业与生命科学版),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):24-27.
- [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.
- [15] 张新华,杨洪强.植物的超微弱发光[J].山东农业大学学报(自然科学版),2003,34(4):605-608.
- [16] 程海鹏,薛建华,王君晖.生物中的超微弱发光[J].生物学通报,1999,34(11):15-17.
- [17] 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.

- [18] 张菊平, 张兴志, 巩振辉. 超微弱发光在蔬菜研究中的应用[J]. 中国农学通报, 2006, 22(1): 220-222.
- [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] 吴永华, 许宏刚, 廖伟彪, 等. 5种景天植物抗旱性比较研究[J]. 甘肃林业科技, 2009, 34(3): 15-17.
- [21] 高小燕. 几种景天科植物抗旱性及其生理机制的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009.
- [22] 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.
- [23] 杨起简. 大豆、小麦、玉米的超弱发光与干旱条件下种子萌发的关系[J]. 生物化学与生物物理进展, 1989, 16(6): 452-454.
- [24] 李玲. 植物生理学模块实验指导[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 83.
- [25] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [26] 邹琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [27] 张新华, 杨洪强, 李富军. 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[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2003, 29(4): 353-356.
- [28] 胡天喜. 血清的超弱发光与疾病诊断[J]. 生物化学与生物物理进展, 1988, 15(1): 20-24.
- [29] 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.
- [30] 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. 中国植物生理学会第九次全国会议论文摘要汇编. 贵阳: 2004.
- [31] 郭金丽, 朱冠宇, 刘艳, 等. 草莓果实采后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.