



# 干旱胁迫下景天植物光合作用 与超微弱发光的关系

郭金丽<sup>1</sup>, 梁爽<sup>1</sup>, 邵长芬<sup>2</sup>, 白杨<sup>1</sup>, 闫宇彤<sup>1</sup>, 李连国<sup>1\*</sup>

(1 内蒙古农业大学 农学院, 呼和浩特 010019; 2 重庆旅游职业学院, 重庆 409000)

**摘要:** 该试验以德景天幼苗为试材, 设计 PEG、PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、PEG+苯甲酸钠、蒸馏水(CK)4 个处理, 分析 20% PEG 模拟干旱胁迫、以及活性氧调控干旱胁迫下超微弱发光(UWL)和光合作用参数的变化特征及其两者的关系, 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 处理的德景天叶片的净光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、胞间二氧化碳浓度( $C_i$ )、气孔导度( $G_s$ )和叶绿素 a(Chla)、叶绿素 b(Chlb)、叶绿素总量(Chl)以及 UWL 强度均随处理时间呈下降趋势, 但 PEG 处理的以上所有指标的下降较 CK 更快、降幅更大。 (2) H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和苯甲酸钠调控 PEG 干旱胁迫过程中, PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>、PEG+苯甲酸钠处理的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、Chla、Chlb、Chl 以及 UWL 强度的变化趋势与 PEG 处理基本一致, 均随处理时间呈下降趋势, 但 PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理的上述光合指标和 UWL 强度均低于 PEG 处理, PEG+苯甲酸钠处理的光合指标和 UWL 强度却均高于 PEG 处理。说明苯甲酸钠处理具有缓解干旱胁迫并提高 UWL 强度的作用。 (3) 相关分析显示, 干旱胁迫及活性氧调控干旱胁迫下 UWL 强度均与各光合指标呈显著正相关关系。研究发现, 在干旱胁迫和活性氧调控干旱胁迫下德景天光合作用参数较 CK 均明显下降, UWL 强度也随之明显降低; 德景天叶片 UWL 强度随着光合作用效率的下降而降低, 说明植物 UWL 的产生与其光合作用的强弱显著相关, 植物 UWL 强度能够反映植物受到的逆境胁迫的程度。

**关键词:** 德景天; 干旱胁迫; 活性氧调控; 超微弱发光; 光合作用

**中图分类号:** Q945.78      **文献标志码:** A

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

GUO Jinli<sup>1</sup>, LIANG Shuang<sup>1</sup>, SHAO Changfen<sup>2</sup>, BAI Yang<sup>1</sup>, YAN Yutong<sup>1</sup>, LI Lianguo<sup>1\*</sup>

(1 College of Agronomy, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010019, China; 2 Chongqing Vocational Institute of Tourism, Chongqing 409000, China)

**Abstract:** The dynamic variation of ultraweak luminescence(UWL) and photosynthetic characteristics, and their relationship under drought stress of 20% PEG treatment and drought stress with regulating of reactive oxygen by carrying out four treatments of PEG, PEG + hydrogen peroxide (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), 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, net photosynthesis ( $P_n$ ), transpiration rate ( $T_r$ ), intercellular CO<sub>2</sub> concentration ( $C_i$ ), stomatal conductance

收稿日期: 2017-04-04; 修改稿收到日期: 2017-09-10

基金项目: 内蒙古自然科学基金(2012MS0324)

作者简介: 郭金丽(1972—), 女, 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

\* 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。E-mail: nmndllg@qq.com

( $G_s$ ), chlorophyll a (Chla), chlorophyll b (Chlb), chlorophyll (Chl) and UWL intensity all decreased; above photosynthetic characteristics and UWL intensity of PEG treatment decreased more quickly and had a bigger drop. (2) In drought stress with regulating by  $H_2O_2$  and sodium benzoate,  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$ ,  $C_i$ , Chla, Chlb, Chl and UWL intensity of treatments of PEG +  $H_2O_2$  and PEG + sodium benzoate all decreased along with stress time as well as PEG treatment. However, above photosynthetic characteristics and UWL intensity of PEG +  $H_2O_2$  were lower than those of PEG treatment, while above photosynthetic characteristics and UWL intensity of PEG + sodium benzoate were higher than those of PEG treatment. The results indicated that sodium benzoate treatment played the role of relieving drought stress and increasing UWL intensity. (3) Correlation analysis showed UWL intensity was positively correlated with photosynthetic index under drought stress and drought stress with regulating of reactive oxygen. In conclusion, under drought stress and drought stress with regulating, photosynthesis parameters decreased more quickly than that of CK, UWL intensity decreased more quickly than that of CK too; UWL intensity decreased along with the decline of photosynthetic efficiency. Which stated that the generation of UWL in plants positively related to extent of photosynthesis of plants, UWL intensity reflected the extent of adversity stress in plants.

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

所有的生命有机体都有自发的超微弱发光 (ultra-weak 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  $100 \sim 10^3 \text{ hv}/(\text{s} \cdot \text{cm}^2)$ , 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<sup>[1]</sup>。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<sup>[2]</sup>, 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 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, 可得到发光强度及其二维分布信息, 使超微弱发光的研究进入到一个新的阶段<sup>[3-6]</sup>。研究表明, 生物系统的超微弱发光与生物体的氧化代谢、信息传递、光合作用、细胞分裂、应激反应、生长及死亡等基本生命过程密切相关<sup>[7-10]</sup>, 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<sup>[11]</sup>。目前, UWL 在农业领域的研究还极少, 主要涉及 UWL 与植物种子生活力、植物在不同发育阶段的 UWL 表现、UWL 与果实品质、UWL 与花芽分化、UWL 与植物的抗逆性的关系等方面的研究<sup>[12-17]</sup>。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。

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。目前对景天植物的抗旱性及干旱胁迫对光合作

用的影响进行了较多的研究<sup>[18-19]</sup>, 但对于干旱胁迫下景天植物 UWL 与光合作用的关系未有相关报道。本试验以德景天为研究对象, 通过研究干旱胁迫下及促进活性氧和清除活性氧情况下德景天 UWL 和光合作用的变化, 探讨光合作用与 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 (*Sedum hybridum*) 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、效果明显) 中进行培养, 以等量体积的蒸馏水作为对照。培养室温度为 25 ℃ 左右, 相对湿度为 60% 左右, 重复 5 次, 每个重复 5 株景天, 之后每 1 d 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** 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, 分别置于 1 mmol/L  $H_2O_2$  + 20% PEG 溶液和 10 mmol/L 苯甲酸钠 + 20% PEG 溶液中进行培养, 以 20% PEG 溶液为对照, 3 种处理溶液体积均为 3 L。培养室温度为 25 ℃ 左右, 相对湿度为 60% 左右, 重复 5 次, 每个重复 5 株景天, 之后每 1 d 取样 1 次, 连续取样 5 d 进行相关指标测定。

3 L 1 mmol/L  $H_2O_2$  + 20% PEG 溶液的配制: 30%  $H_2O_2$  溶液 303  $\mu\text{L}$  + PEG 固体 600 g。

3 L 10 mmol/L 苯甲酸钠 + 20% PEG 溶液的

配制:苯甲酸钠 4.323 g+PEG 固体 600 g。

1.2 指标测定

UWL 的测定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。样品测定在暗室及恒温(20 ℃)、恒湿[RH(75%±2%)]环境下进行。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。

另外,选取供试德景天植株中上部成熟叶片,使用便携式光合仪(CIRAS-3,汉莎科学仪器有限公司)测定  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  等光合气体交换参数。同时,采用张宪政的方法测定叶绿素含量<sup>[20]</sup>。

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光合作用与超微弱发光的关系

2.1.1 叶片光合特性 图 1 显示,随着干旱胁迫时间的延长,对照和 PEG 处理的德景天叶片的  $P_n$ 、

$T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均呈下降趋势,且 PEG 处理的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  均明显低于同期对照(图 1)。其中,与干旱胁迫 1 d 时相比,PEG 处理德景天叶片的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  在胁迫 6 d 时分别下降了 67.32%、74.05%、73.74%、83.64%,同期对照叶片则分别下降了 26.11%、45.83%、13.76%、13.76%,即干旱胁迫处理各参数的降幅明显大于对照。

由图 2 可以看出,随着干旱胁迫程度的加重,对照和 PEG 处理德景天叶片的 Chla、Chlb、Chl 含量也基本呈逐渐下降趋势;在整个干旱胁迫过程中,PEG 处理的 Chla、Chlb 和 Chl 含量均始终低于同期对照,且胁迫时间越长,两者差异越明显(图 2)。其中,与干旱胁迫 1 d 时相比,PEG 处理的 Chla、Chlb 和 Chl 含量在胁迫 6 d 时分别下降了 43.24%、76.69% 和 62.58%,而同期对照分别下降了 24.61%、14.23%和 17.79%,PEG 处理叶片叶绿素含下降幅度均明显大于对照。

2.1.2 叶片超微弱发光 图 3 显示,随着干旱胁迫时间的延长,对照和 PEG 处理的德景天叶片的 UWL 强度均呈下降趋势,并以 PEG 处理的 UWL 强度下降更快幅度更大,而对照的 UWL 强度下降幅度小而缓慢,胁迫结束时 PEG 处理和对叶片 UWL 强度分别降低了 71.88%和 31.60%;同时,在整个干旱胁迫期间,PEG 处理的 UWL 强度均始终低于同期对照(图 3)。

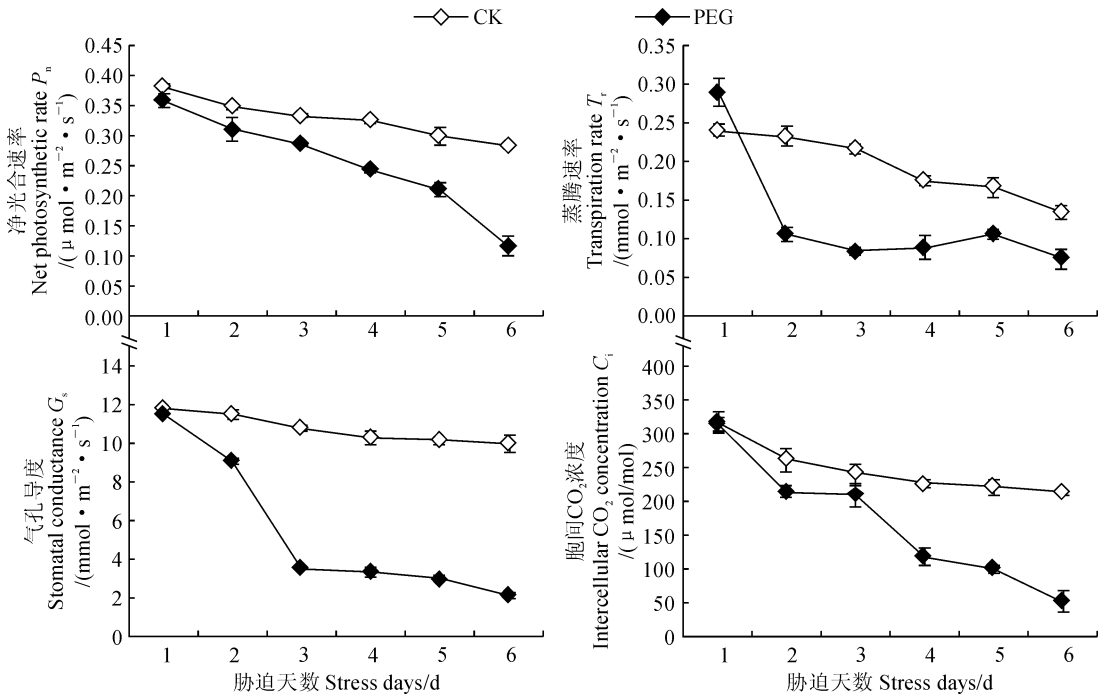


图1 干旱胁迫(PEG)下德景天叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  的变化  
Fig.1 The change of  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  in leaves of *Sedum hybridum* under drought (PEG) stress

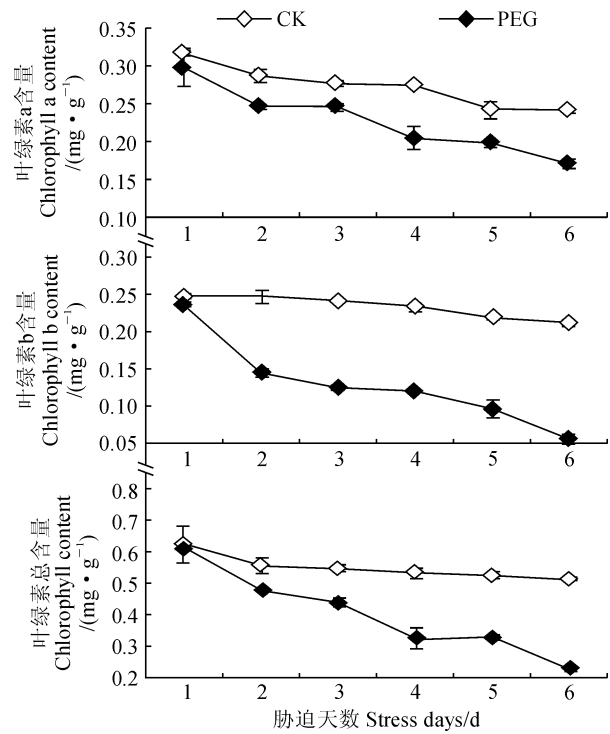


图 2 PEG 胁迫下德景天叶片 Chla、Chlb 和 Chl 总量的变化  
Fig. 2 The change of Chla, Chlb and Chl contents in leaves of *S. hybridum* under PEG stress

**2.1.3 叶片超微弱发光与光合作用的关系** 表 1 显示,在干旱胁迫期间,PEG 处理的德景天叶片的 Chlb、 $G_s$ 、Chl、Chla、 $C_i$ 、 $P_n$ 、 $T_r$  均与 UWL 强度呈显著正相关( $P<0.05$ ),其中 Chlb、 $G_s$ 、Chl 均与 UWL 之间还呈极显著正相关( $P<0.01$ );而对照叶片的  $G_s$ 、 $T_r$ 、 $P_n$ 、 $C_i$ 、Chlb、Chla、Chl 均与 UWL 之间也呈显著正相关,仅其中的  $G_s$  与 UWL 之间达到极显著正相关。以上结果说明干旱胁迫条件下德景天叶片 UWL 强度与其光合作用存在显著正相关关系。

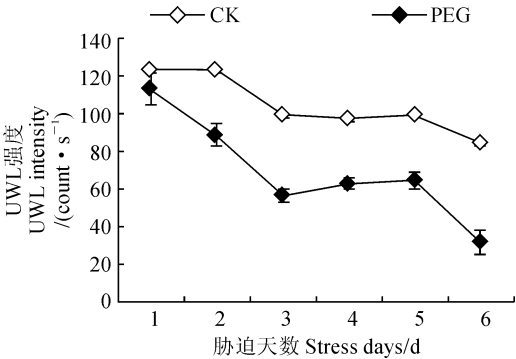


图 3 PEG 胁迫下德景天叶片 UWL 的变化  
Fig. 3 The change of UWL in leaves of *S. hybridum* under PEG stress

表 1 PEG 胁迫下德景天叶片 UWL 与光合作用参数的关系分析

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

| 处理<br>Treatment | 光合指标<br>Photosynthetic index | 回归方程<br>UWL regression equation | 相关系数<br>Correlation coefficient |
|-----------------|------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| CK              | 气孔导度 $G_s(X_1)$              | $Y=19.969 X_1+18.820$           | 0.941 **                        |
|                 | 蒸腾速率 $T_r(X_2)$              | $Y=332.956 X_2+39.700$          | 0.901 *                         |
|                 | 净光合速率 $P_n(X_3)$             | $Y=390.151 X_3-24.184$          | 0.888 *                         |
|                 | 胞间二氧化碳浓度 $C_i(X_4)$          | $Y=0.347 X_4+61.509$            | 0.863 *                         |
|                 | 叶绿素 b Chlb( $X_5$ )          | $Y=886.439 X_5-100.975$         | 0.837 *                         |
|                 | 叶绿素 a Chla( $X_6$ )          | $Y=442.820 X_6-16.049$          | 0.832 *                         |
|                 | 叶绿素总量 Chl( $X_7$ )           | $Y=326.173 X_7-74.973$          | 0.824 *                         |
| PEG             | 气孔导度 $G_s(X_1)$              | $Y=6.856X_1+32.481$             | 0.939 **                        |
|                 | 蒸腾速率 $T_r(X_2)$              | $Y=289.494 X_2+33.689$          | 0.837 *                         |
|                 | 净光合速率 $P_n(X_3)$             | $Y=307.532X_3-6.962$            | 0.854 *                         |
|                 | 胞间二氧化碳浓度 $C_i(X_4)$          | $Y=0.257 X_4+26.652$            | 0.877 *                         |
|                 | 叶绿素 b Chlb( $X_5$ )          | $Y=441.611 X_5+12.720$          | 0.946 **                        |
|                 | 叶绿素 a Chla( $X_6$ )          | $Y=549.307 X_6-53.820$          | 0.887 *                         |
|                 | 叶绿素总量 Chl( $X_7$ )           | $Y=190.959 X_7-7.025$           | 0.922 **                        |

注:Y 为 UWL 强度,  $X_i$  为对应光合指标; \* 和 \*\* 分别表示 0.05 和 0.01 水平显著性相关关系。表 2 同

Note: Y means UWL intensity; while  $X_i$  for corresponding photosynthetic index; \* and \*\* indicate significant correlation at 0.05 and 0.01 level, respectively. The same as Table 2

2.2 活性氧调控干旱胁迫下德景天叶片光合作用与超微弱发光的关系

2.2.1 叶片光合特性 图 4 显示,在干旱胁迫期间,PEG、PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 PEG+苯甲酸钠 3 种处理的德景天叶片光合参数  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  整体均呈下降趋势(图 4)。其中,处理结束时(处理后 5 d)PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理叶片的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  分别比处理初始(处理后 1 d)下降了 85.20%、71.17%、88.87%和 80.29%,此时 PEG+苯甲酸钠处理叶片则分别下降了 61.31%、56.15%、62.27%和 51.87%%,而同期 PEG 处理则分别下降了 75.53%、69.47%、74.54%和 71.24%,即 PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理的降幅最大,PEG 处理居中,而 PEG+苯甲酸钠处理降幅最低。在干旱胁迫过程中,PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  基本低于 PEG 处理,而 PEG+苯甲酸钠处理的  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  基本高于 PEG 处理。

由图 5 可知,,在干旱胁迫期间,PEG、PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 PEG+苯甲酸钠 3 种处理的德景天叶片的 Chla、Chlb、Chl 也同样呈逐渐下降趋势,且同期的叶片叶绿素含量均始终表现为 PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>>PEG>PEG+苯甲酸钠处理(图 5)。其中,干旱胁迫结束时,PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理叶片的 Chla、Chlb、Chl 含量分别下降了 57.69%、69.89%和 66.28%,PEG+苯甲酸钠处理分别相应下降了 37.93%、50% 和

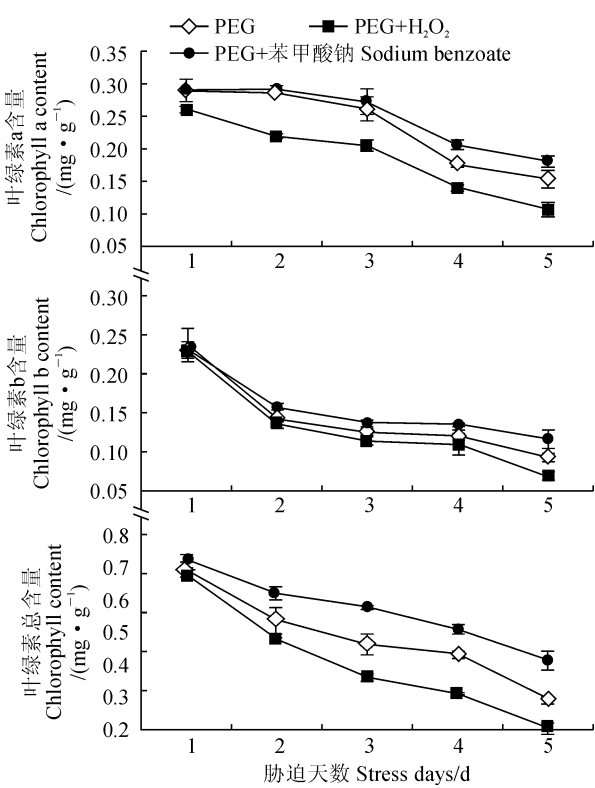


图 5 活性氧调控 PEG 胁迫下德景天叶片 Chla、Chlb、Chl 总量的变化  
Fig.5 The change of Chla,Chlb and Chl contents in leaves of *Sedum hybridum* under PEG stress with the regulation of active oxygen

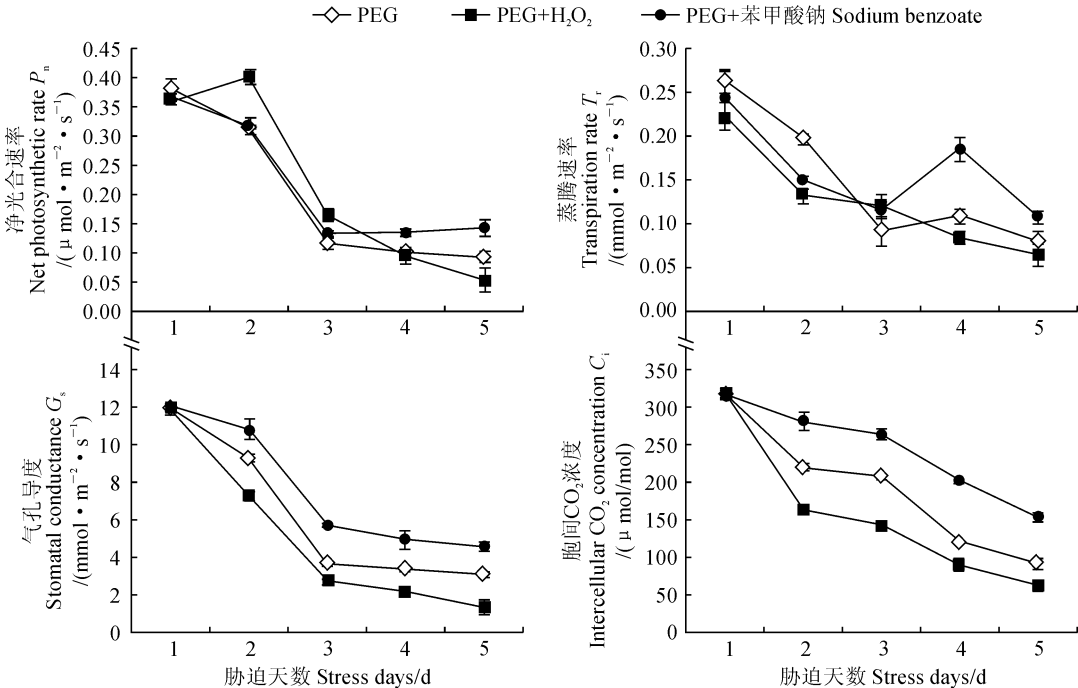


图 4 活性氧调控 PEG 胁迫下德景天叶片  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$  的变化  
Fig.4 The change of  $P_n$ ,  $T_r$ ,  $G_s$  and  $C_i$  in leaves of *S. hybridum* under PEG stress with the regulation of active oxygen

40.88%。PEG 处理则分别相应下降了 48.28%、61.18% 和 54.79%，即 PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理的降幅最大，PEG 处理次之，PEG+苯甲酸钠处理降幅最小。

**2.2.2 叶片超微弱发光** 随着干旱胁迫时间的延长，PEG、PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 和 PEG+苯甲酸钠 3 种处理的德景天叶片的 UWL 强度也整体呈下降趋势(图 6)。

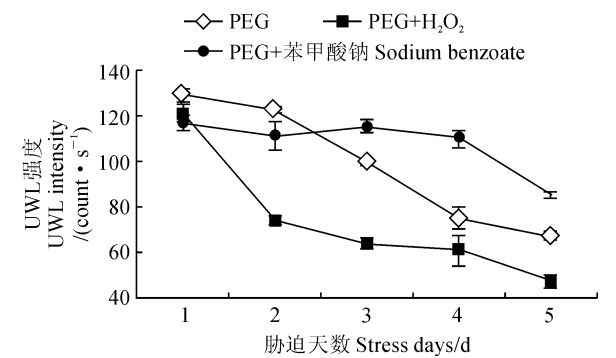


图 6 活性氧调控 PEG 胁迫下德景天叶片 UWL 的变化

Fig. 6 The change of UWL in leaves of *S. hybridum* under PEG stress with the regulation of active oxygen

在干旱胁迫期间，PEG 处理叶片的 UWL 强度降低了 48.21%；PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理的 UWL 强度降低了 61.34%，且始终低于同期 PEG 处理；而 PEG+苯甲酸钠处理的 UWL 强度降低了 27.52%，并基本上高于同期 PEG 处理。

**2.2.3 叶片超微弱发光与光合作用的关系** 由表 2 可以看出，在干旱胁迫期间，PEG+H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 处理的德景天叶片 Chlb、C<sub>i</sub>、T<sub>r</sub>、Chl、G<sub>s</sub>、Chla、P<sub>n</sub> 均与 UWL 之间呈显著高度正相关关系( $P<0.05$ )，其中的 Chlb、Chl、T<sub>r</sub>、C<sub>i</sub> 还均与 UWL 之间呈极显著正相关( $P<0.01$ )；PEG 处理的德景天叶片的 Chla、C<sub>i</sub>、P<sub>n</sub>、Chl、G<sub>s</sub>、Chlb、T<sub>r</sub> 也均与 UWL 之间呈高度显著正相关，其中 Chla 与 UWL 之间呈极显著正相关；PEG+苯甲酸钠处理的德景天叶片 Chl、C<sub>i</sub>、Chla 与其 UWL 之间呈高度显著正相关，且其中的 Chlb、T<sub>r</sub>、G<sub>s</sub>、P<sub>n</sub> 与 UWL 之间呈显著中度正相关。以上结果说明活性氧调控干旱胁迫条件下，德景天叶片光合作用与 UWL 强度呈显著正相关关系，且二者存在着非常密切的关系。

表 2 活性氧调控 PEG 胁迫下德景天叶片光合作用与 UWL 的相关分析

| 处理<br>Treatment                              | 光合指标<br>Photosynthetic index              | 回归方程<br>UWL regression equation | 相关系数<br>Correlation coefficient |
|--|---|---------------------------------|---------------------------------|
| 20%PEG                                       | 叶绿素 a Chla(X <sub>1</sub> )               | $Y = 415.221 X_1 + 2.038$       | 0.971 **                        |
|  | 胞间二氧化碳浓度 C <sub>i</sub> (X <sub>2</sub> ) | $Y = 0.294 X_2 + 42.518$        | 0.950 *                         |
|  | 净光合速率 P <sub>n</sub> (X <sub>3</sub> )    | $Y = 188.263 X_3 + 60.720$      | 0.923 *                         |
|  | 叶绿素总量 Chl(X <sub>4</sub> )                | $Y = 209.519 X_4 + 7.855$       | 0.918 *                         |
|  | 气孔导度 G <sub>s</sub> (X <sub>5</sub> )     | $Y = 6.180 X_5 + 60.077$        | 0.911 *                         |
|  | 叶绿素 b Chlb(X <sub>6</sub> )               | $Y = 375.228 X_6 + 48.179$      | 0.885 *                         |
|  | 蒸腾速率 T <sub>r</sub> (X <sub>7</sub> )     | $Y = 309.831 X_7 + 52.866$      | 0.881 *                         |
| 20%PEG + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>       | 叶绿素 b Chlb(X <sub>1</sub> )               | $Y = 453.815 X_1 + 12.788$      | 0.998 **                        |
|  | 胞间二氧化碳浓度 C <sub>i</sub> (X <sub>2</sub> ) | $Y = 0.285 X_2 + 29.024$        | 0.988 **                        |
|  | 蒸腾速率 T <sub>r</sub> (X <sub>3</sub> )     | $Y = 458.045 X_3 + 16.347$      | 0.982 **                        |
|  | 叶绿素总量 Chl(X <sub>4</sub> )                | $Y = 180.665 X_4 + 6.100$       | 0.975 **                        |
|  | 气孔导度 G <sub>s</sub> (X <sub>5</sub> )     | $Y = 6.170 X_5 + 42.125$        | 0.958 *                         |
|  | 叶绿素 a Chla(X <sub>6</sub> )               | $Y = 394.087 X_6 + 0.010$       | 0.861 *                         |
|  | 净光合速率 P <sub>n</sub> (X <sub>7</sub> )    | $Y = 135.220 X_7 + 44.289$      | 0.741 *                         |
| 20%PEG + 苯甲酸钠<br>20%PEG +<br>sodium benzoate | 叶绿素总量 Chl(X <sub>1</sub> )                | $Y = 130.592 X_1 + 42.200$      | 0.873 *                         |
|  | 胞间二氧化碳浓度 C <sub>i</sub> (X <sub>2</sub> ) | $Y = 0.172 X_2 + 65.650$        | 0.863 *                         |
|  | 叶绿素 a Chla(X <sub>3</sub> )               | $Y = 206.181 X_3 + 56.367$      | 0.815 *                         |
|  | 叶绿素 b Chlb(X <sub>4</sub> )               | $Y = 164.427 X_4 + 81.845$      | 0.597 *                         |
|  | 蒸腾速率 T <sub>r</sub> (X <sub>5</sub> )     | $Y = 131.826 X_5 + 86.418$      | 0.564 *                         |
|  | 气孔导度 G <sub>s</sub> (X <sub>6</sub> )     | $Y = 2.039 X_6 + 92.072$        | 0.552 *                         |
|  | 净光合速率 P <sub>n</sub> (X <sub>7</sub> )    | $Y = 51.667 X_7 + 96.223$       | 0.448 *                         |

3 讨 论

植物的超微弱发光是与植物的能量代谢及生理变化相联系的低水平光子辐射,能灵敏反映生物系统的生理状态,有望作为植物体内物质代谢和能量转换活动的一项灵敏指标来检测植物种子生活力、鉴定植物抗逆性、检测果实品质无损等。植物的 UWL 与环境的关系极为密切,植物在逆境胁迫中的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,同时 UWL 强度明显下降<sup>[21]</sup>。张新华等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<sup>[22]</sup>。接玉玲等<sup>[23]</sup>研究干旱胁迫下湖北海棠幼苗 UWL 变化发现,随着胁迫程度的加深,叶片 UWL 强度逐渐降低。本试验研究发现,干旱胁迫下德景天叶片的 UWL 强度低于未胁迫处理,且随着干旱胁迫时间延长,UWL 强度逐渐下降。综合以上研究结果推测,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。

目前,有关植物生长发育与 UWL 的关系尚未搞清,植物中 UWL 的产生来源问题更是仅局限于猜想和假设。生物化学的观点认为,UWL 有可能来自于活性氧发光、DNA 发光和能量转换发光几个方面<sup>[24]</sup>。笔者对活性氧和能量与 UWL 产生来源的关系进行了初步研究,研究结果显示,在草莓果实衰老过程中,UWL 强度随着活性氧的积累而下降,随着以 ATP 为代表的能量水平的下降而下降,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<sup>[25-28]</sup>。但 UWL 产生机制方面的研究刚刚起步,有待于更多的、大量的试验来研究验证。另外,有关植物光合作用与 UWL 产生的关系的研究迄今鲜见报道。

本试验研究了 PEG 模拟干旱胁迫下德景天叶片 UWL 与其光合作用的变化特征及其二者之间的关系,发现干旱胁迫下德景天叶片 UWL 强度随着光合作用的下降而下降;同时,试验进一步探讨了干旱胁迫下促进活性氧和清除活性氧情况下德景天叶片 UWL 与光合作用的变化特征及其二者之间的关系,发现促进活性氧加剧了光合作用的下降程度,同时加剧了 UWL 强度的下降幅度,而清除活性氧则缓减了光合作用和 UWL 强度的下降幅度。进一步的相关性分析也表明德景天叶片 UWL 强度与其  $P_n$ 、 $T_r$ 、 $G_s$ 、 $C_i$ 、Chla、Chlb、Chl 均呈显著高度正相关。

综上所述,干旱胁迫下德景天叶片 UWL 强度随着光合作用的下降而降低,光合作用应与 UWL 的产生和来源有关。从本试验中 UWL 强度与光合作用各指标的相关性分析结果来看,干旱胁迫下 UWL 似乎与 Chla、Chlb、Chl 等光合色素含量的相关性更高,但在干旱胁迫与未胁迫、活性氧调控与未调控等情况下,UWL 与 Chla、Chlb、Chl 的关系又不尽相同。植物的光合作用是一个复杂的生理过程,本试验结果只表明光合作用与 UWL 产生有关,但光合作用究竟如何影响 UWL 的产生尚不明确,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 weak bioluminescence[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2008, **36** (8): 3 092-3 094.

[2] GURWITSCH A. Denature desspezifischen erregers der zellteilung[J]. *Development Genes and Evolution*, 1923, **100**(1): 11-40.

[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 ultralweak bioluminescence of serum in dairy cow[J]. *Jiangsu Aricultural 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. Experiment elle untersuchungen zur ultraschwachen photonen emission 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. Biophoton emission[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] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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. Ultraweak bioluminescence in plant[J]. *Journal of Shandong Agricultural*, 2003, **34**(4): 605-608.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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 boreau etc[J]. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 2015, **19**(6): 47-51.
- [20] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 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): 2 394-2 398.
- 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): 2 394-2 398.
- [24] 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, **12**(1): 220-222.
- ZHANG J P, ZHANG X Z, GONG Z H. Application of ultraweak bioluminescence in vegetable research[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, **12**(1): 220-222.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 梁 爽, 刘 欢, 李巧玲, 等. 能量调控对草莓果实采后衰老过程中活性氧及保护酶活性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2016, **43**(5): 810-814.
- LIANG S, LIU H, LI Q L, *et al.* The effects of energy regulating on reactive oxygen and protective enzyme activity in ageing process of strawberry fruit[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2016, **43**(5): 810-814.
- [28] 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.

(编辑: 裴阿卫)