

# CaCl<sub>2</sub> 对 UV-B 辐射下菠菜叶片光合特性的影响

洪 鸿, 马红群, 胡丽涛, 周忆堂, 吴能表\*

(西南大学 生命科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

**摘要:** 以“丹麦旺盛菠菜”为材料, 通过 UV-B 和 CaCl<sub>2</sub> 复合处理, 测定光合色素含量、Hill 反应活力、叶绿素荧光、MDA 含量和抗氧化酶活性等参数, 探讨了 CaCl<sub>2</sub> 对 UV-B 辐射下菠菜叶片电子传递链和光合膜酶保护系统的影响。结果表明, UV-B 处理下, 光合色素含量、chl/car、类囊体膜上 PSII 潜在活性(F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>)、光化学淬灭系数(qP)、非光化学淬灭系数(qN)、PSII 光量子产量(ΦPSII)、原初光能转化效率(F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>), 以及 Hill 反应活力等降低, chl<sub>a</sub>/chl<sub>b</sub> 和 MDA 含量升高; 喷洒 CaCl<sub>2</sub> 可不同程度缓解 UV-B 的伤害。不同处理下, POD、SOD 和 CAT 活性的变化呈现补偿效应。UV-B 强度与菠菜叶片 PSII 功能受损程度呈正相关, CaCl<sub>2</sub> 则主要通过提高 chl<sub>b</sub> 含量、类囊体膜上的光量子产量和 POD 活性, 以缓解伤害。重度 UV-B 辐射下, CaCl<sub>2</sub> 使 chl<sub>b</sub> 含量显著提高可能是导致 PSII 捕光效率提高的重要因素。

**关键词:** 菠菜; UV-B; CaCl<sub>2</sub>; 光合膜; 电子传递链

**中图分类号:** Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3142(2010)06-0859-06

## Effect of CaCl<sub>2</sub> on photosynthetic characteristic of *Spinacia oleracea* under enhanced UV-B radiation

HONG Hong, MA Hong-Qun, HU Li-Tao,  
ZHOU Yi-Tang, WU Neng-Biao\*

(The key laboratory of Evo-environments in Three Gorge Reservoir Region (Ministry of Education),  
School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715, China)

**Abstract:** In order to reveal the effect of CaCl<sub>2</sub> on photosynthetic characteristic of *Spinacia oleracea* under the enhanced UV-B radiation, the photosynthetic pigments, chlorophyll fluorescence, Hill reaction activity and MDA content were determined. The results showed that the treatments could decrease the content of chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, potential activity of PSII (F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>), photochemical quenching (qP) and non-photochemical quenching (qN), light quantum yield of PSII (ΦPSII), efficiency of primary conversion of light energy (F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>) on thylakoid membrane, and the activity of Hill reaction, whereas, the treatments could increase chl/car, and the content of MDA. The damage of spinach leaves caused by UV-B was relieved by CaCl<sub>2</sub>. With different treatments the change of the activity of SOD, POD, CAT was compensatory effect. The relationship between the UV-B intensity and the damaged degree of PSII function of spinach leaves was positive correlation. It appeared that the most primary action by CaCl<sub>2</sub> radiation occurred at the chl<sub>b</sub> content in total photosynthetic pigments, the light quantum yield and the activity of POD. Under the high UV-B stress, CaCl<sub>2</sub> caused the chlorophyll b increase, which was the most important reason that efficiency of PSII capture light could raise.

**Key words:** *Spinacia oleracea*; UV-B radiation; CaCl<sub>2</sub>; photosynthetic membrane; electron transport chain

收稿日期: 2008-11-21 修回日期: 2009-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(30500041); 三峡库区重点实验室资助项目[Supported by the National Natural Science Foundation of China(30500041); Item of the Key Laboratory of Evo-environments in Three Gorge Reservoir Region(Ministry of Education)]

作者简介: 洪鸿(1984-), 女, 贵州黔西人, 硕士研究生, 研究方向为植物激素调控与信号转导, (E-mail) hairs@swu.edu.cn.

\* 通讯作者(Author for correspondence): 吴能表, 男, 博士, 教授, (E-mail) wunb@swu.edu.cn.

随着工业发展,空气中氯氟烃增加,大气臭氧层衰减,到达地面的有害紫外线 UV-B(波长 280~320 nm)增强。植物的生长、发育和许多重要生理生化过程直接或间接地受 UV-B 辐射的影响(杨景宏等,2000)。光合作用是植物最敏感的生理过程之一(吴韩英等,2001)。UV-B 对植物光合作用的影响引起越来越多研究者的关注。近年来,对单一的 UV-B(师生波等,2001),以及 UV-B 与 NaCl、SO<sub>2</sub>、干旱等复合处理对植物光合作用的研究已大量报道(贺军明等,2004;冯虎元等,2003;孙振令等,2002)。贺军明等(2004)的研究表明,增强 UV-B 辐射和 NaCl 胁迫同时作用对绿豆幼苗光合作用的抑制程度明显大于两因子单独作用时。增强 UV-B 辐射或 NaCl 两胁迫因子造成光合下降的原因在某些方面具有一定的相似性,其中有气孔因素和非气孔因素。同时 Ca<sup>2+</sup> 和 Cl<sup>-</sup> 对于植物的光合作用极其重要(陈晓亚等,2007),施用外源钙能减轻环境胁迫如干旱、盐害、低温、水分胁迫等对植物细胞膜的伤害,提高植物抗逆性(卢少云等,1995;宴斌等,1995;黄建昌等,2004)。但研究 UV-B 胁迫与适宜浓度的 CaCl<sub>2</sub> 复合处理对植物光合作用的影响并不多,特别是对光合膜和电子传递链的影响还未见报道。因此,本文以菠菜 (*Spinacia oleracea*) 为材料,主要探讨 UV-B 辐射下,菠菜光合膜和电子传递链的变化动态以及 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 对它们的保护机理。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料及处理

试材为“丹麦旺盛菠菜”(山东省昌邑市蔬菜种子子公司生产),2007年11月6日种于西南大学生命科学学院植物生理学苗圃内,用装满蛭石的黑色营养袋(12 cm×13 cm)培养,萌发出苗以后浇以 Hoagland 完全营养液,待长出 4 片真叶后选取长势一致的幼苗,于 2008 年 1 月 8 日开始进行处理。

辐射源为紫外灯管(购自北京光电源研究所),辐射剂量用北京师范大学光学仪器厂的 UV-B 辐照计测定(297nm 探头)。将紫外灯光平行悬挂于植株上方,测定的辐射强度以植株叶尖为准。2008 年 1 月 8~12 日,每天 12:00~13:00,对材料进行为期 5d 的 5 种处理,即:自然条件生长(CK);照射强度为 0.1 W/m<sup>2</sup> 的 UV-B(Low, L);照射强度为 0.1 W/m<sup>2</sup> 的 UV-B,同时喷洒浓度为 5 mmol/L 的

CaCl<sub>2</sub>(L+CaCl<sub>2</sub>);照射强度为 0.3 W/m<sup>2</sup> 的 UV-B(High, H);照射强度为 0.3 W/m<sup>2</sup> 的 UV-B,同时喷洒浓度为 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub>(H+CaCl<sub>2</sub>)。

2008 年 1 月 13 日 10:00 左右,每一组处理都取厚度及颜色相近的叶片作为材料,进行指标测定。

### 1.2 研究内容与方法

光合色素测定采用李得孝等(2005)的方法,略有修改:称取 0.2 g 新鲜菠菜叶片浸泡于 10 mL 提取液(80%丙酮:无水乙醇:水=4.5:4.5:1),叶片发白后用 UV-2450 测定含量;Hill 反应活力的测定采用叶济宇(中国科学院上海植物研究所,1999)的方法;第一天选取长势相近的叶片作标记,每天晚上 19:30(暗适应 2 h 后)用便携式叶绿素荧光仪 PAM-2100 测定: Fo、Fm、Fv/Fm、Ft、F' o、F' m、qP、qN、ΦPS II 由公式:(F' m-Ft)/F' m 算出(李绍长等,2004),PSII 潜在活性由公式:(Fm-Fo)/Fo 算出(赵春江等,1999)。MDA 含量测定采用 Kang 等(2003)的方法,SOD 的测定采用 NBT 法,POD 的测定采用愈创木酚法,CAT 的测定采用紫外分光光度法(王建华等,1989)。所有指标均重复测定 3 次,数据用 SPSS11.5 和 Excel2003 处理分析,其结果以平均值±标准误差表示。

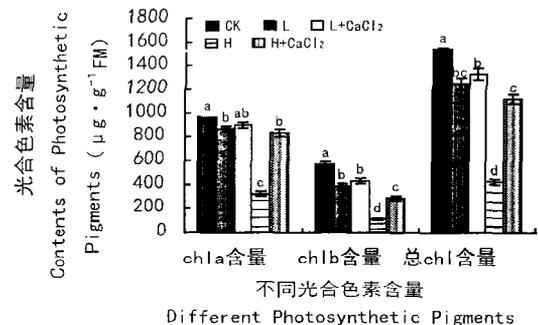


图 1 不同处理下菠菜光合色素的变化

Fig. 1 The change of photosynthetic pigments of *Spinacia oleracea* under different treatments

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理下菠菜光合色素含量的变化

由图 1,UV-B 辐射下,chl a、chl b 和总叶绿素含量随 UV-B 强度的增大而减小,喷洒 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 后,它们都相应提高。其中 L+CaCl<sub>2</sub>、H+CaCl<sub>2</sub> 的 chl a 含量较 L、H 分别提高:3.60%、162.70%,而 L+CaCl<sub>2</sub>、H+CaCl<sub>2</sub> 的 chl b 含量较

L、H 分别提高:12.79%、171.02%,说明 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 对重度紫外胁迫下菠菜 chl<sub>b</sub> 的保护作用更明显。如表 1 所示,紫外处理时 chl<sub>a</sub>/chl<sub>b</sub> 值较 CK 增大,而 L+CaCl<sub>2</sub> 和 L、H+CaCl<sub>2</sub> 和 H 间无显著差异,说明 UV-B 辐射下,菠菜可通过提高光能转

换能力来自我保护,而 CaCl<sub>2</sub> 对这种保护无明显促进作用。同时,L+CaCl<sub>2</sub> 的 chl/car 值比 L 的显著提高 9.41%,而重度胁迫之下 H 和 H+CaCl<sub>2</sub> 之间却没有明显差异,说明轻度胁迫下 CaCl<sub>2</sub> 可提高叶绿素在总色素中的相对含量,保证菠菜光合作用的

表 1 不同处理下菠菜 chl<sub>a</sub>/chl<sub>b</sub>、chl/car 的变化

Table 1 The change of chl<sub>a</sub>/chl<sub>b</sub> of *Spinacia oleracea* under different treatments

	CK	L	L+CaCl <sub>2</sub>	H	H+CaCl <sub>2</sub>
chl <sub>a</sub> /chl <sub>b</sub>	1.69±0.06c	2.31±0.09b	2.12±0.08b	3.01±0.11a	2.94±0.13a
chl/car	7.44±0.16a	5.63±0.11c	6.16±0.16b	5.02±0.13d	4.98±0.07d

注:同一列数据中不同字母 a,b,c 表示差异性显著( $P<0.05$ )。下同。

Note: Data with different letters a,b,c are significantly different( $P<0.05$ ) in the same column. The same below.

顺利完成,随着辐射的加深,缓解作用减弱。

## 2.2 不同处理下菠菜类囊体膜上 Hill 反应活力的变化

Hill 反应发生在植物类囊体膜的放氧复合体(OEC)上,一定程度上反映 H<sub>2</sub>O 光解后最终提供给电子传递链的电子多少。L、L+CaCl<sub>2</sub>、H、H+CaCl<sub>2</sub> 分别比 CK 下降 69.55%、59.57%、69.85%、61.95%。处理样品间存在显著性差异。说明 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 有效遏制 UV-B 辐射所导致的 Hill 活力下降,保护菠菜的电子传递链的氧化侧。

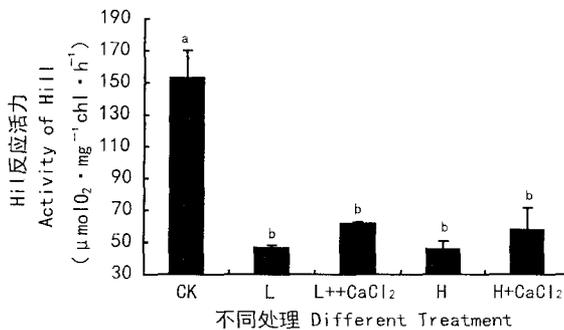


图 2 不同处理下菠菜 Hill 反应活力的变化

Fig. 2 The change of Hill reaction activity of *Spinacia oleracea* under different treatments

## 2.3 不同处理下菠菜叶片叶绿素荧光参数的变化

2.3.1 不同处理下菠菜叶片叶绿素荧光参数 F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub>、ΦPSII、F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> 的变化 F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub> 可以较准确表示 PSII 潜在活性。L 下,F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub> 先升后降,而 H 下,F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub> 则明显下降。第 5 天,各处理样品的 F<sub>v</sub>/F<sub>o</sub> 不仅低于第 1 天,且都低于当天的 CK。轻度胁迫下前 3 天内菠菜 PSII 潜在活性的上升,应该是一种自身保护机制,但随着辐射时间的延长,保护作用减弱。5 天内 H+CaCl<sub>2</sub> 都明显高于 H,说明 5

mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 有利于提高菠菜叶片 PSII 活性,重度辐射下缓解作用较稳定和明显。

F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> 反映原初光能的转换效率,是植物受光抑制程度的重要指标。ΦPSII 则反映 PSII 反应中心部分关闭情况下实际 PSII 光能捕获的效率。处理的 5 天内,CK、L、L+CaCl<sub>2</sub> 的 F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub> 之间无显著性差异,H、H+CaCl<sub>2</sub> 分别比第 1 天下降 7.18%、5.44%,即 H+CaCl<sub>2</sub> 的下降幅度比 H 小。随 UV-B 辐射时间增长,ΦPSII 逐渐降低。第 5 天的 L、H 的值分别比第 1 天下降 14.19%、38.41%,5 天内 H+CaCl<sub>2</sub> 都比 H 高。说明在轻度 UV-B 胁迫下,菠菜仍能维持较高的原初光能转换率,但随辐射强度增加,原初光能转换效率明显降低,实际光能捕获效率也降低,5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 却可有效防止它们的下降趋势。且缓解作用在重度胁迫下表现更为明显。

2.3.2 不同处理下菠菜叶片叶绿素荧光参数 qP、qN 的变化 qP(光化学猝灭系数)反映了 PSII 反应中心的开放程度和参与 CO<sub>2</sub> 固定的电子数量。从表 3 可知,处理后的第 5 天 L、H 的 qP 比当天的 CK 和第 1 天的 L、H 均降低。第 1 天,L+CaCl<sub>2</sub> 比 L 增大 8%,H+CaCl<sub>2</sub> 比 H 增大 13%,意味着 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 使菠菜的 PSII 反应中心在紫外胁迫下维持较高的开放比例,将吸收的光能更多用于碳同化。后面 4 天这种缓解作用逐渐减小,第 5 天 L+CaCl<sub>2</sub> 比 L 增加 2%,而 H+CaCl<sub>2</sub> 则等于 H。说明由重度辐射引起的变化较剧烈。所有处理下的 qP 在第 5 天都大幅度下降,可能 UV-B 胁迫下,菠菜的光化学猝灭存在累积效应。qN(非光化学猝灭系数)反映 PSII 反应中心吸收的光能不能用于光合电子传递,而以热的形式耗散掉的光能部分,与 ATP

和 NADPH 形成和积累及光合膜的状态有关。处理后第 5 天 L、H 分别比当天的 CK 和第 1 天的 L、H 降低。但第 5 天 L+CaCl<sub>2</sub> 比第 1 天上升 10.64%, H+CaCl<sub>2</sub> 比第 1 天下降 32.76%, 说明轻度

UV-B 胁迫下, 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 可保护菠菜光合膜, 为碳同化积累更多 ATP 和 NADPH。在重度辐射下, 为了保证菠菜叶片更多的利用光能, CaCl<sub>2</sub> 的保护作用主要通过降低光能的热耗散实现。

表 2 不同处理下菠菜叶绿素荧光 Fo/Fv、ΦPSII、Fv/Fm 的变化 (日/月)  
Table 2 The change of Fo/Fv, ΦPSII, Fv/Fm of *Spinacia oleracea* under different treatments

处理方法 Treatment	9/1	10/1	11/1	12/1	13/1
Fv/Fo CK	5.263±0.242a	5.003±0.192ab	5.120±0.137ab	5.200±0.077a	5.107±0.284a
L	5.404±0.042a	5.409±0.144a	5.422±0.161ab	5.220±0.100a	5.059±0.126a
L+CaCl <sub>2</sub>	5.691±0.090a	5.575±0.098a	5.503±0.123a	4.884±0.336a	4.214±0.511ab
H	5.118±0.186a	4.677±0.176b	4.518±0.220c	4.242±0.032a	3.469±0.150b
H+CaCl <sub>2</sub>	5.497±0.229a	5.146±0.185ab	4.899±0.137bc	4.420±0.381a	3.674±0.038b
Fv/Fm CK	0.840±0.006a	0.840±0.006a	0.837±0.004a	0.833±0.006a	0.836±0.008a
L	0.847±0.003a	0.847±0.003a	0.844±0.004a	0.839±0.003a	0.822±0.013a
L+CaCl <sub>2</sub>	0.844±0.007a	0.847±0.003a	0.847±0.003a	0.829±0.011a	0.824±0.012a
H	0.836±0.005a	0.836±0.005a	0.818±0.007ab	0.795±0.014b	0.776±0.008b
H+CaCl <sub>2</sub>	0.846±0.006a	0.846±0.006a	0.830±0.004ab	0.814±0.013ab	0.800±0.013ab
ΦPSII CK	0.423±0.013b	0.486±0.037a	0.471±0.011a	0.462±0.003ab	0.393±0.010a
L	0.486±0.030ab	0.476±0.012a	0.459±0.016a	0.478±0.013a	0.417±0.015a
L+CaCl <sub>2</sub>	0.496±0.017a	0.520±0.005a	0.471±0.021a	0.495±0.006a	0.379±0.045a
H	0.440±0.029ab	0.477±0.002a	0.449±0.016a	0.373±0.003c	0.271±0.006b
H+CaCl <sub>2</sub>	0.499±0.011a	0.493±0.008a	0.473±0.011b	0.414±0.020bc	0.303±0.010ab

表 3 不同处理下菠菜叶绿素荧光 qP、qN 的变化 (日/月)  
Table 3 The change of qP, qN of *Spinacia oleracea* under different treatments

处理方法 Treatment	9/1	10/1	11/1	12/1	13/1
qP CK	0.59±0.024a	0.64±0.020a	0.65±0.022a	0.64±0.026a	0.58±0.005ab
L	0.62±0.026a	0.69±0.033a	0.62±0.036a	0.65±0.030a	0.49±0.110ab
L+CaCl <sub>2</sub>	0.67±0.014a	0.70±0.006a	0.64±0.013a	0.67±0.007a	0.50±0.060a
H	0.60±0.045a	0.65±0.007a	0.63±0.016a	0.61±0.004a	0.46±0.043ab
H+CaCl <sub>2</sub>	0.68±0.016a	0.67±0.016a	0.64±0.012a	0.57±0.022a	0.46±0.023b
qN CK	0.62±0.005a	0.56±0.058a	0.62±0.026a	0.61±0.026a	0.59±0.012a
L	0.55±0.001b	0.56±0.021a	0.53±0.010b	0.52±0.021a	0.50±0.084ab
L+CaCl <sub>2</sub>	0.47±0.017c	0.47±0.012b	0.52±0.041b	0.50±0.026a	0.52±0.051b
H	0.56±0.001b	0.57±0.006a	0.51±0.009b	0.53±0.041a	0.48±0.024ab
H+CaCl <sub>2</sub>	0.58±0.013ab	0.57±0.011a	0.43±0.010c	0.39±0.010a	0.39±0.015c

### 2.3 不同处理下菠菜 MDA 含量和 SOD、POD、CAT 活性的变化

从图 3 可知, 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 降低了 UV-B 辐射下增加的 MDA 含量(A)。POD 活性变化趋势和 MDA 含量呈现负相关(B)。且两指标 CK 和 H 都存在显著性差异。各种处理下, POD、SOD、CAT 不同程度的升高(B、C、D), 可能正是菠菜通过体内酶系统防止自身代谢紊乱的一种适应性反应。SOD 活性在不同处理下都比 CK 显著升高(C)。L+CaCl<sub>2</sub> 的 SOD 活性较 L 上升, H+CaCl<sub>2</sub> 的 SOD 活性较 H 下降; 而 CAT 与 SOD 变化趋势相反, 也许这是在 UV-B 辐射下, CaCl<sub>2</sub> 对菠菜叶片 SOD 和 CAT 活性的保护存在互补效应(C、D)。

### 3 讨论

叶绿素含量随着 UV-B 的增大而降低, 而 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 可以提高 chl<sub>a</sub>、chl<sub>b</sub>、总 chl 含量和 chl/car(图 1, 表 1)。此与龙明华等(2005)的研究结果有相似之处。本研究中 CaCl<sub>2</sub> 主要提高了菠菜叶片 chl<sub>b</sub> 的含量。PSII 上的捕光色素蛋白 LH-CII 结合了类囊体膜上 50% 的叶绿素, 特别 chl<sub>b</sub> 对 LHCII 的含量和稳定性影响很大(徐培洲等, 2006)。我们推测, CaCl<sub>2</sub> 提高 chl<sub>b</sub> 含量的同时, 增加了 LHCII 的含量和稳定性, 使 PSII 更稳定, 有利于光能的吸收和传递, 为菠菜叶片进行光反应提供

必备条件。另外, Hill 反应活力是类囊体膜上 OEC 活性的重要指标(赵新西等, 2005), OEC 上有光合电子传递中的最终电子供体 H<sub>2</sub>O。研究表明 CaCl<sub>2</sub>

可提高还原态 OEC 活性, 增强 H<sub>2</sub>O 放出 O<sub>2</sub>, 提供电子的能力, 为电子传递奠定基础。

叶绿素荧光是研究和探测植物光合生理及各种

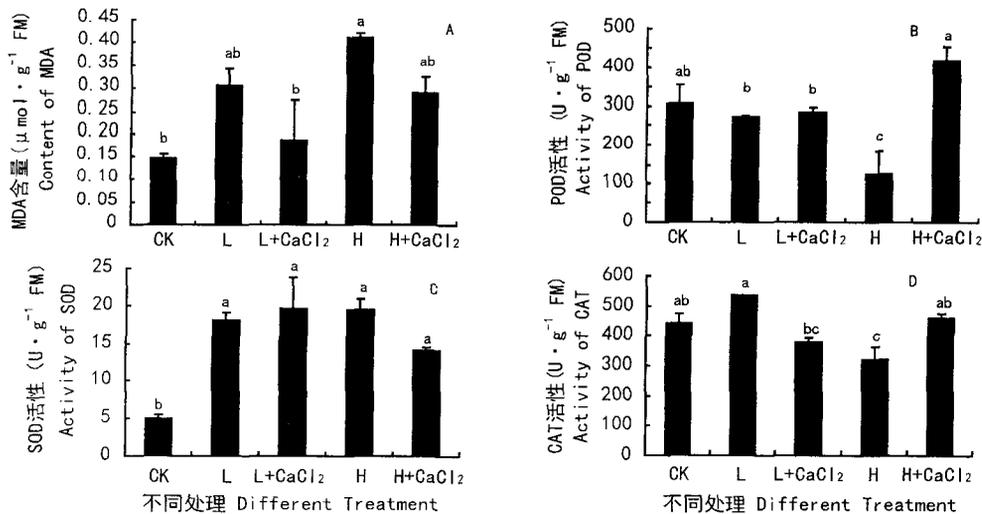


图 3 不同处理下菠菜 MDA 含量(A)和 POD(B)、SOD(C)、CAT(D)活性的变化

Fig. 3 The change of the content of MDA(A) and POD(B), SOD(C),

CAT(D) activity of *Spinacia oleracea* under different treatments

外界因子对微细结构影响的植物活体测定和诊断技术, 为研究菠菜 PSII 及其电子传递提供可行性(王宏伟等, 2008)。UV-B 增强时, Fv/Fo、qP、Fv/Fm 和 ΦPS II 第 5 天均比第 1 天下降(表 2、3), 说明 UV-B 在一定程度上影响了 PSII 的功能, 然而 5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 增加菠菜实际捕获的激发光能和参加光化学反应的光能, 让 PSII 反应中心维持较高的开放比例, 原初光能转换效率增大, 类囊体膜上 PSII 光量子产量提高, 从而推动电子传递。这也可能是重度辐射下 CaCl<sub>2</sub> 降低光能热耗散, 继而菠菜光能利用率提高的主要原因。UV-B 辐射下, Fv/Fm 的下降表示菠菜叶片出现了“光抑制”现象。徐志防等(1999)认为光抑制是由于光能转换过程中, P680 到 QA 电子传递受阻。qP 的降低表示光合电子传递能力减弱, 即 Q-A 重新氧化为 QA 的能力减弱(邱栋梁等, 2000)。5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 可以帮助 P680 传递电子到 Q-A, 重新氧化为 QA, 缓解光抑制, 保护菠菜电子传递链的完整性。

叶绿素含量降低和电子传递受阻一方面可以将过剩的光能转化成 Mehler 激发能, 导致活性氧产生; 另外一方面以分子态氧为受体的光合电子传递支路反应不可避免地提高活性氧的积累量。这些活性氧不能及时清除, 或者清除不完整, 导致膜系统遭

到破坏(汪炳良等, 2004)。在 UV-B 辐射之下, SOD 活性一直显著高于 CK, 但 POD、CAT 都有不同程度的下降, 导致 MDA 上升(图 3), 正好符合这点。5 mmol/L 的 CaCl<sub>2</sub> 提高了两种 UV-B 强度下 POD 活性, 在轻度、重度辐射下分别提高 SOD、CAT 活性, 反映 Ca<sup>2+</sup> 对各种酶的调控使它们形成了补偿效应, 降低了 MDA 含量, 相互协同保护了膜系统。喷洒 CaCl<sub>2</sub> 后 POD 活性显著提高, 与 MDA 含量变化呈负相关, 说明 POD 在保护膜系统过程中非常关键。光合作用的光反应发生在类囊体膜上, 而类囊体膜是细胞膜系统中最脆弱的膜(盛瑞艳等, 2004), 所以 UV-B 辐射下, MDA 含量增加, 使类囊体膜易被破坏, 影响光合电子的传递和光能转化效率, 而 CaCl<sub>2</sub> 对膜保护的同时提高了电子传递链的完整性, 保证光反应能够顺利进行, 有利于 ATP 和 NADPH 的积累, 以及光合磷酸化, 推动碳反应。这是 CaCl<sub>2</sub> 对光合作用保护重要的内在原因。

综上所述, UV-B 胁迫下, 5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> 同时保护了 PSII 的氧化侧和还原侧, 推动电子传递。重度 UV-B 辐射下, 它使 chl b 显著提高, 可能是导致 PSII 捕光效率提高的重要原因之一。另一方面, 5 mmol/L CaCl<sub>2</sub> 提高菠菜叶片对活性氧的耗散能力, 保护光合膜系统, 给电子传递链提供了一个相对

稳定的环境,促进光合作用,提高了菠菜对紫外线的抗性。

### 参考文献:

- 陈晓亚,汤章城. 2007. 植物生理与分子生物学[M]. 第3版. 北京:高等教育出版社:155
- 中国科学院上海植物生理研究所,上海市植物生理学会编委会. 1999. 现代植物生理学实验指南[M]. 北京:科学出版社:108
- Feng HY(冯虎元), An LZ(安黎哲), Chen SY(陈书燕), et al. 2002. The interactive effects of enhanced UV-B irradiation and water deficit on physiological properties of spring wheat seedling (增强 UV-B 辐射与干旱复合处理对小麦幼苗生理特性的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 22(9):1 564-1 568
- Huang JC(黄建昌), Xiao Y(肖艳), Zhou HG(周厚高). 2004. Effect of  $Ca^{2+}$  on some physiological characteristics of papaya under water stress( $Ca^{2+}$  对水分胁迫下番木瓜若干生理指标的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), 24(4):373-375
- He JM(贺军民), She XP(余小平), Liu C(刘成), et al. 2004. Stomatal and nonstomatal limitations of photosynthesis in mung bean leaf under the combination of enhanced UV-B radiation and NaCl stress(增强 UV-B 辐射和 NaCl 复合胁迫下绿豆光合作用的气孔和非气孔限制)[J]. *J Plant Mol Biol*(植物生理与分子生物学报), 30(1):53-58
- Kang GZ, Wang ZX, Sun GC. 2003. Rarticipation of  $H_2O_2$  in enhancement of cold chilling by salicylic acid in banana seedlings [J]. *Acta Bot Sin*, 45(5):567-573
- Li DX(李得孝), Guo YX(郭月霞), Yun HY(员海燕), et al. 2005. Determined methods of chlorophyll from maize(玉米叶绿素含量测定方法研究)[J]. *Chin Agric Sci Bull*(中国农学通报), 21(6):153-155
- Long MH(龙明华), Tang XF(唐小付), Yu WJ(于文进), et al. 2005. Effects of different calcium levels on photosynthesis and protective enzyme activities of melon levels(不同钙素水平对厚皮甜瓜叶片光合作用和保护酶活性的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), 25(1):77-82
- Li SC(李绍长), Hu CH(胡昌浩), Gong J(龚江), et al. 2004. Effects of low phosphorus stress on the chlorophyll fluorescence of different phosphorus use efficient maize(*Zea mays*)(低磷胁迫对磷不同利用效率玉米叶绿素荧光参数的影响)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), 30(4):365-370
- Qiu DL(邱栋梁), Liu XH(刘星辉). 2000. Effect of simulated acid rain on the chlorophylla fluorescence characteristic of longan(*Dioscorea longana*) leaves(模拟酸雨对龙眼叶片叶绿素 a 荧光特性的影响)[J]. *Acta Hort Sin*(园艺学报), 27(3):177-181
- Sheng RY(盛瑞艳), Li PM(李鹏民), Xue GX(薛国希), et al. 2006. Choline chloride protects cell membrane and the photosynthetic apparatus in cucumber seedling leaves at low temperature and weak light(氯化胆碱对低温弱光下黄瓜幼苗叶片细胞膜和光合机构的保护作用)[J]. *J Plant Physiol Mol Biol*(植物生理与分子生物学报), 32(1):87-93
- Shi SB(师生波), Ben GY(贲桂英), Zhao XQ(赵新全), et al. 2001. Effects of supplementary UV-B radiation on net photosynthetic rate in the alpine plant *Gentiana straminea*(增强 UV-B 辐射对高山植物麻花苕净光合速率的影响)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), 25(5):520-524
- Sun ZL(孙振令), Peng CL(彭长连), Sun ZJ(孙梓健), et al. 2003. Photosynthetic responses of plants to supplementary UV-B radiation and sulfite and their resistances(增强 UV-B 辐射和  $SO_2$  作用下植物光合响应及其相对抗性)[J]. *Acta Phytoecol Sin*(植物生态学报), 27(3):285-29
- Wang BL(汪炳良), Xu M(徐敏), Shi QH(史庆华), et al. 2004. Effects of high temperature stress on antioxidant systems, chlorophyll and chlorophyll fluorescence parameters in early cauliflower leaves(高温胁迫对早熟花椰菜叶片抗氧化系统和叶绿素及其荧光参数的影响)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), 37(8):1 245-1 250
- Wang HW(王宏伟), Shi YQ(史亚琪), Huang F(黄峰), et al. 2008. Effect of  $HgCl_2$  short time treatment on photosynthesis in broad bean leaves( $HgCl_2$  短时处理对蚕豆叶片光合作用的效应)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), 34(1):157-162
- Wang JH(王建华), Liu HX(刘鸿先), Xu T(徐同). 1989. The role of superoxide dismutase(SOD) in stress physiology and senescence physiology of plant(超氧化物歧化酶(SOD)在植物逆境和衰老生理中的作用)[J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯), (1):1-7
- Xu PZ(徐培洲), Li Y(李云), Yuan S(袁澍), et al. 2006. Studies of photosystem complexes and chlorophyll synthesis in chlorophyll-deficient rice mutant W1(叶绿素缺乏水稻突变体中光系统蛋白和叶绿素合成特性的研究)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), 39(7):1 299-1 305
- Xun ZF(徐志防), Luo GH(罗广华), Wang AG(王爱国), et al. 1999. Photoinhibition of photosynthesis and the metabolism of active oxygen in photosynthetic organs(光合作用的光抑制与广和器官的活性氧代谢)[J]. *Plant Physiol Commun*(植物生理学通讯), 35(4):325-332
- Lu SY(卢少云), Li YC(黎用朝), Guo ZF(郭振飞), et al. 1999. Enhancement of drought resistance of rice seedlings by calcium(钙提高水稻幼苗抗旱性的研究)[J]. *Chin J Rice Sci*(中国水稻科学), 13(3):161-164
- Yan B(晏斌), Dai QJ(戴秋杰), Liu XZ(刘晓忠), et al. 1995. The study on increasing salt resistance of rice by calcium(钙提高水稻耐盐性的研究)[J]. *Acta Agron Sin*(作物学报), 21:55-57
- Yang JH(杨景宏), Chen T(陈拓), Wang XL(王勋陵). 2000. Effect of enhanced UV-B radiation on endogenous ABA and free proline contents in wheat leaves(增强 UV-B 辐射对小麦叶片内源 ABA 和游离脯氨酸的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), 20(1):39-42
- Zhao CJ(赵春江), Guo XW(郭晓维), Zhang QD(张其德), et al. 1999. Fluorescence induction transient and emission spectrum characteristics of winter wheat leaves of different spike type(不同穗型冬小麦叶片荧光诱变及光谱特性)[J]. *Sci Agric Sin*(中国农业科学), 32(2):43-46
- Zhao XX(赵新西), Ma QQ(马千全), Yang XH(杨兴洪), et al. 2005. Effects of root-applied glycinebetaine on the composition and function of wheat thylakoid membrane under drought stress(根施甜菜碱对干旱胁迫下小麦幼苗类囊体膜组成和功能的影响)[J]. *J Plant Mol Biol*(植物生理与分子生物学报), 31(2):135-142