

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2014.09.008

花生幼苗对 UV-B 辐射增强的生理生化响应^①

杜照奎^{1,2,3}, 李钧敏^{2,3}, 钟章成¹

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

2. 浙江省植物进化生态学与保护重点实验室, 浙江 台州 318000; 3. 台州学院 生态研究所, 浙江 台州 318000

摘要:以“小京生”花生幼苗为材料,通过大田栽培试验,旨在探明花生对增强的 UV-B 辐射($54\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$)响应的生理生化机制。结果表明:在补增 UV-B 辐射处理下,叶片相对电导率,超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)、类黄酮和可溶性蛋白质的含量,以及过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性较对照显著升高;超氧化物歧化酶(SOD)活性先显著升高后降低;过氧化氢(H_2O_2)、丙二醛(MDA)、抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)含量,以及抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性没有显著变化。可见增强的 UV-B 能显著提高花生叶片内的活性氧(ROS), $\text{O}_2^{\cdot-}$ 是对花生产生氧化胁迫的主要因素,花生幼苗主要通过提高类黄酮含量以及 SOD、CAT 和 POD 活性来抵制 ROS 的胁迫,AsA-GSH 循环系统在花生清除 ROS 中效果不明显。

关键词:花生;紫外线 B;活性氧;抗氧化酶;非酶抗氧化物质

中图分类号: S565.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2014)9-0049-08

氯氟烃(CFCs)和氮氧化物 NO_x 可引起平流层臭氧的损耗,使到达地球表面紫外线-B(UV-B, 280~320 nm)辐射水平升高。当前地表每天 UV-B 的辐射水平在 $2\sim 12\ \text{kJ}/\text{m}^2$,比 1980 年增加了 $6\%\sim 14\%$,而且 UV-B 辐射在未来还将继续增加^[1]。植物依赖于太阳光进行光合作用,同时也不可避免暴露于 UV-B 辐射之中,UV-B 辐射对农作物的影响是多方面的。除直接破坏植物 DNA 和蛋白质等外,UV-B 还通常诱发活性氧(reactive oxygen species, ROS)的产生,如单线态氧($^1\text{O}_2$)、超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)、过氧化氢(H_2O_2)和羟基自由基($\cdot\text{OH}$)^[2]。植物细胞内存在着活性氧清除系统,正常情况下细胞内活性氧的产生与清除是一个动态平衡状态,细胞内活性氧处于较低水平;但这种平衡一旦被打破,就可能对植物产生伤害,因为自由基的累积可直接攻击膜系统中不饱和脂肪酸,导致膜脂过氧化,其产物丙二醛(MDA)又可与细胞膜上的蛋白质、酶类等交联并使之活性丧失。

在长期的进化适应中,高等植物产生了一系列保护机制应对 UV-B 辐射,它们可以通过抗氧化酶类或非酶抗氧化系统来清除自由基,从而保证植物细胞内生命代谢活动处理正常状态。清除自由基的抗氧化酶类包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等, SOD 是 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的清除剂,它能将 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 转化成 H_2O_2 , H_2O_2 在 CAT、APX 和 POD 的催化下变成 H_2O ^[3];非

① 收稿日期: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270461); 浙江省教育厅科研项目(Y201223322); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(XDJK2011D009)。

作者简介: 杜照奎(1979-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 讲师, 主要从事植物生态学研究。

通信作者: 钟章成, 教授。

酶抗氧化剂包括抗坏血酸(AsA)和谷胱甘肽(GSH)等, AsA 可在 APX 的作用下清除 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 , 同时 AsA 被氧化成单脱氢抗坏血酸(MDHA), MDHA 很不稳定, 能被单脱氢抗坏血酸还原酶(MDAR)还原为 AsA, 也可进一步氧化生成脱氢抗坏血酸(DHA). DHA 以还原型谷胱甘肽(GSH)为底物, 在脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)的作用下生成 AsA^[4].

花生(*Arachis hypogaea* L.)是豆科落花生属一年生草本植物, 为主要食用植物油来源, 富含脂肪和蛋白质, 也是一个种植较为普遍的油料作物. 我们前期研究发现, 增强 UV-B 处理 3 d 的花生幼苗净光合速度显著下降, 超微结构显示叶绿体膜系统遭到明显破坏. 本研究以“小京生”花生为试验材料, 分析其幼苗叶片在 UV-B 辐射增强下自由基含量、电导率、抗氧化酶活性、抗氧化物质含量等的变化, 旨在获知“小京生”幼苗对增强的 UV-B 胁迫的抗性生理响应特征, 以期从自由基产生和清除的角度阐明花生适应 UV-B 胁迫的生理机制.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试花生品种为“小京生”(龙生型), 该品种为浙江省优异花生, 种子购自新昌县种子分公司.

1.2 试验设计

试验在浙江省临海市进行, 土壤为沙性土, 其基本理化性质为: pH 7.57、有机质 26.21 g/kg、全氮 1.08 g/kg、全磷 1.55 g/kg、全钾 15.20 g/kg、碱解氮 36.15 mg/kg、有效磷 112.26 mg/kg、速效钾 155.62 mg/kg. 2012 年 5 月 1 日挑选健康饱满、大小均匀的花生种子于 25 °C 自来水中浸泡 24 h, 穴播, 每穴 4 粒, 行距 40 cm, 穴距 20 cm.

花生萌发后, 每穴保留 2 棵幼苗, 待主茎 4 对真叶全部展开时开始进行补增 UV-B 辐射处理, UV-B 光源采用北京电光源研究所生产的紫外灯管(发射波段为 280~320 nm, 峰值为 308 nm). 将紫外灯具悬挂在试验组花生上方, 维持 UV-B 辐射强度在 $54 \mu W/cm^2$ 左右(相当于试验地太阳光 UV-B 的 20%, UV enhanced, UV_E), 每天辐射时间为 8 h, 共处理 3 d; 为保证两组接受太阳光照射条件尽可能一致, 对照组(CK)花生上方也悬挂灯架, 但不安装灯管. 分别在处理 1, 2, 3 d 后, 取顶端往根部第 2 片叶片进行指标测定, 5 个重复.

1.3 测定方法

$O_2^{\cdot-}$ 含量按文献[5]的方法测定; H_2O_2 含量按文献[6]的方法测定; 丙二醛(MDA)的含量按文献[7]的方法测定; 相对电导率、可溶性蛋白质含量、SOD 活性、CAT 活性和 POD 活性按文献[8]的方法测定; APX 活性按文献[9]的方法测定; 抗坏血酸(AsA)含量按文献[10]的方法测定; 还原型谷胱甘肽(GSH)含量按文献[11]的方法测定; 类黄酮含量按文献[12]的方法测定.

1.4 数据处理

采用 SPSS 17.0 软件分别对相同处理时间内增强 UV-B 辐射处理与对照之间进行 t 检验, 并对试验所取得的所有数据采用 $\bar{x} \pm SD$ 值绘图.

2 结果与分析

2.1 UV-B 辐射增强对花生叶片 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 含量的影响

由图 1 可知, UV-B 辐射增强处理 1 d 和 2 d 后, $O_2^{\cdot-}$ 含量与自然光照处理(对照)相比并没有显著变化, 但 UV-B 辐射增强处理 3 d 后, $O_2^{\cdot-}$ 含量较对照提高了 53.70%, 显著高于对照($p < 0.05$); 而在 UV-B 辐射增强处理 3 d 时间内, H_2O_2 含量与对照相比, 均没有显著变化($p > 0.05$).

2.2 UV-B 辐射增强对花生叶片相对电导率和 MDA 含量的影响

由图 2 可知, UV-B 辐射增强处理 1 d 和 2 d 后, 花生叶片相对电导率与对照相比并没有显著变化, 但 UV-B 辐射增强处理 3 d 后, 相对电导率则较对照提高了 39.13%, 显著高于对照 ($p < 0.05$). UV-B 辐射增强处理 3 d 内, MDA 含量与对照相比并没有显著变化 ($p > 0.05$);

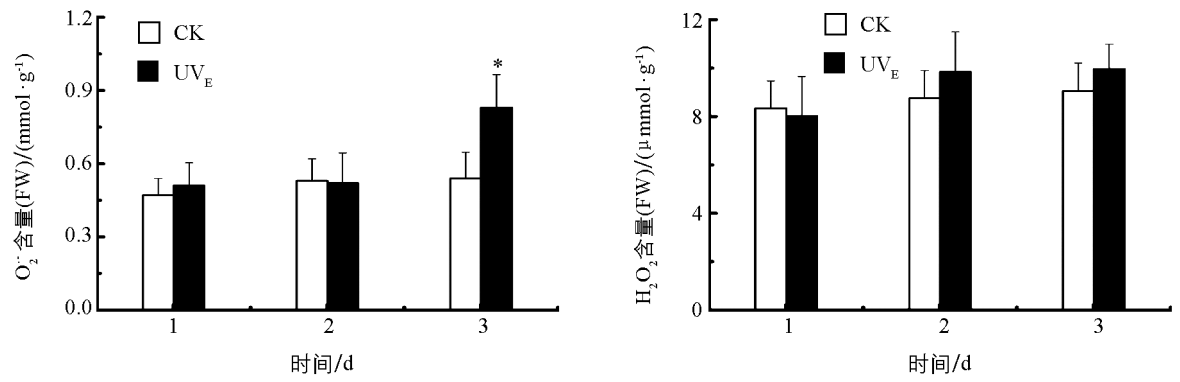


图 1 UV-B 辐射增强对花生叶片 O₂⁻ 和 H₂O₂ 含量的影响

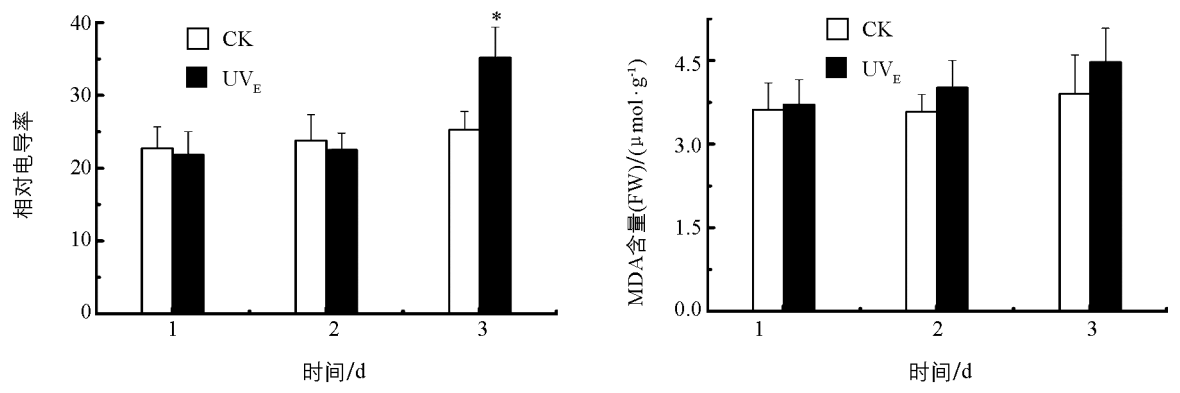


图 2 UV-B 辐射增强对花生叶片 MDA 含量和相对电导率的影响

2.3 UV-B 辐射增强对花生叶片抗氧化酶活性的影响

由图 3 可知, UV-B 辐射增强处理 1 d 和 3 d 后, SOD 活性与对照相比并没有显著变化, 但 UV-B 辐射增强处理 2 d 后, SOD 活性较对照提高了 34.22%, 显著高于对照 ($p < 0.05$). UV-B 辐射增强处理 1 d, CAT 活性与对照相比并没有显著变化, 但 UV-B 辐射增强处理 2 d 和 3 d 后, CAT 活性较对照分别提高了 44.08% 和 61.16%, 均显著高于对照 ($p < 0.05$). UV-B 辐射增强处理 1 d 和 2 d 后, POD 活性与对照相比并没有显著变化, 但 UV-B 辐射增强处理 3 d 后, POD 活性较对照提高了 34.87%, 显著高于对照 ($p < 0.05$). UV-B 辐射增强处理 3 d 内, APX 活性与对照相比并没有显著变化 ($p > 0.05$).

2.4 UV-B 辐射增强对花生叶片 AsA 和 GSH 含量的影响

由图 4 可知, UV-B 辐射增强处理 3 d 内, AsA 和 GSH 含量与对照相比均没有显著变化 ($p > 0.05$).

2.5 UV-B 辐射增强对花生叶片类黄酮和可溶性蛋白质含量的影响

由图 5 可知, UV-B 辐射增强处理 1 d 后, 类黄酮含量与对照相比并没有显著变化, 但 UV-B 辐射增强处理 2 d 和 3 d 后, 类黄酮含量较对照分别提高了 21.22% 和 26.71%, 均显著高于对照 ($p < 0.05$). 而 UV-B 辐射增强处理 1 d 和 2 d 内, 可溶性蛋白质含量与对照相比并没有显著变化 ($p > 0.05$), 但处理 3 d 后, 含量提高了 26.70%, 显著高于对照 ($p < 0.05$).

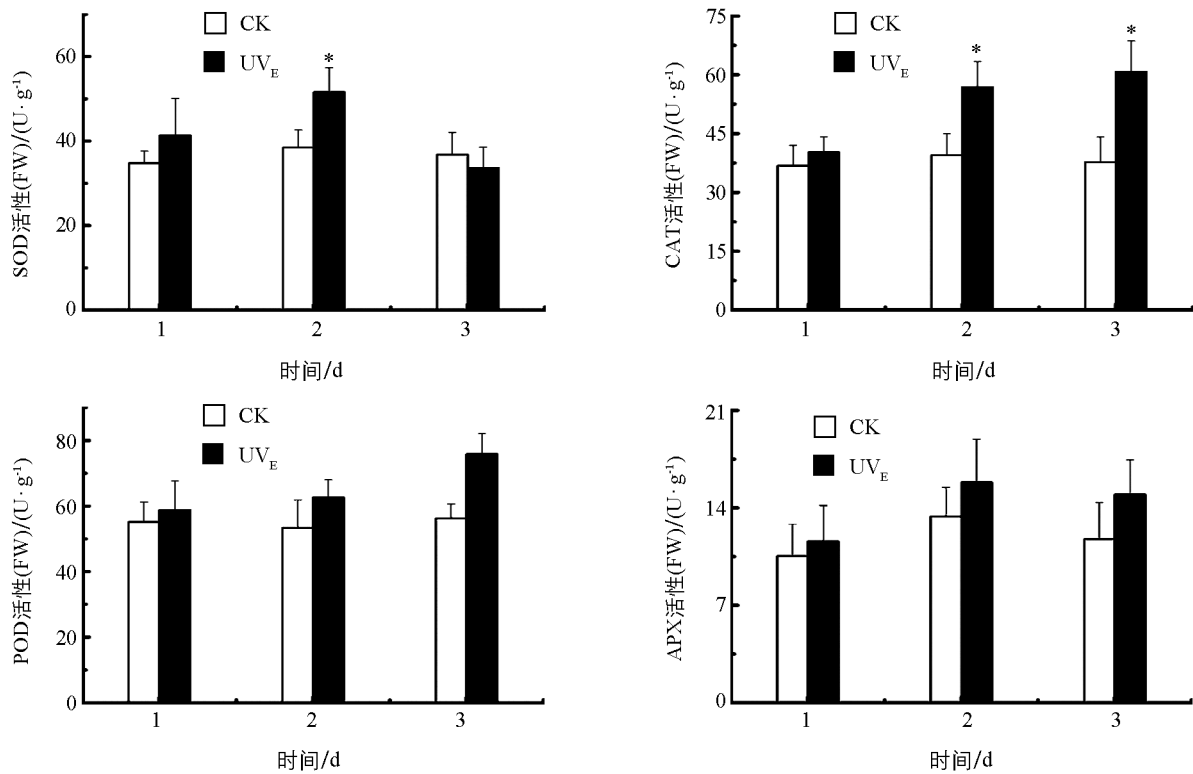


图 3 UV-B 辐射增强对花生叶片抗氧化酶活性的影响

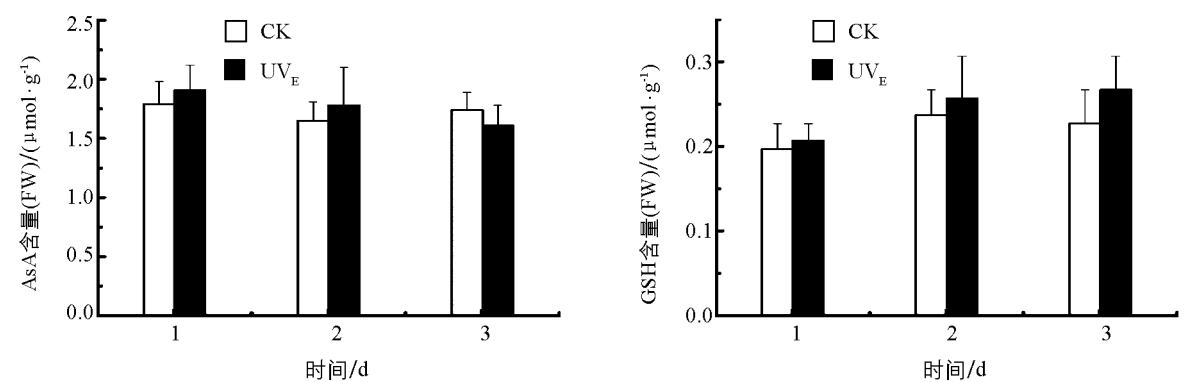


图 4 UV-B 辐射增强对花生叶片抗坏血酸和还原型谷胱甘肽含量的影响

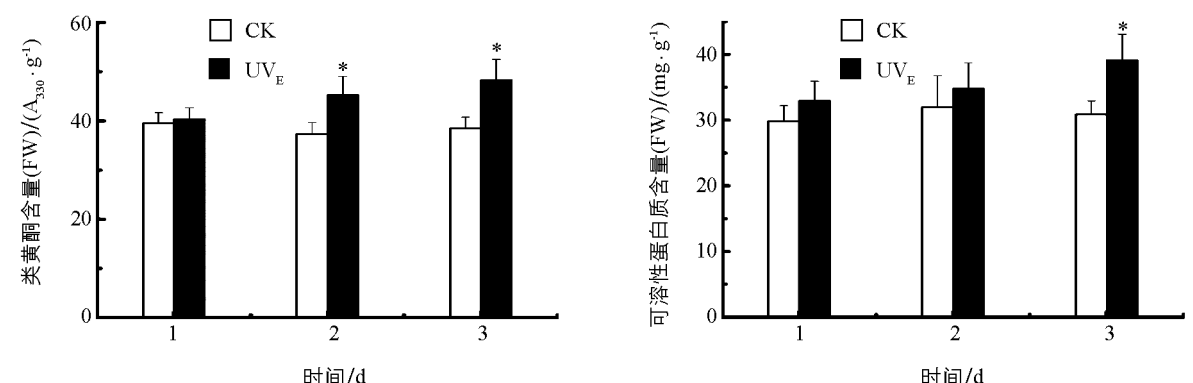


图 5 UV-B 辐射增强对花生叶片可溶性蛋白质和类黄酮含量的影响

3 讨 论

外界环境条件的胁迫(如: 冷、热、盐、重金属和臭氧等)诱发活性氧(ROS)的产生, 从而造成氧化胁迫已经是一种普遍的现象. 对花生幼苗补增 UV-B 辐射处理 3 d 后, H_2O_2 的含量没有显著变化, 但这并不意味着 UV-B 辐射不能增加 H_2O_2 的产生, 可能是 CAT 和 POD 酶活提高降低了 H_2O_2 的含量; 不过本研究发现 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的含量较对照却提高了 53.70%, 表明增强的 UV-B 能显著提高植物体内的 ROS, 而且 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 是对花生幼苗产生氧化胁迫的主要因素. SOD 是清除体内的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的主要酶类, 它可以将植物体内的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 歧化成 H_2O_2 和 O_2 , 从而减轻 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 对植物造成的氧化胁迫. POD 和 CAT 均具有酶促降解 H_2O_2 的功能, 降解产物为 H_2O 和 O_2 , 避免 H_2O_2 的蓄积对细胞膜产生伤害^[13].

我们的室外试验发现, 接受补增的 UV-B 辐射处理 2 d 后, 花生幼苗叶片 SOD 活性即显著上升, 此时, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的含量与对照相当; 但在 3 d 后 SOD 活性与对照无显著差异, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的含量却显著高于对照, 对细胞构成氧化胁迫, 说明 SOD 对花生较低水平 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的清除有效. SOD 活性对 UV-B 辐射的响应目前没有定论, 除了与受试材料相关外, 还受到各种试验条件的影响. 室内试验表明豌豆和小麦、拟南芥、大豆、水稻和黄瓜^[14]等接受增强的 UV-B 辐射后, SOD 活性大幅提高; 但荞麦和大豆却并没有受到影响; 反之, 向日葵和栝楼^[15]中 SOD 活性却降低了. 而在大田种植中, 补增的 UV-B 增加了小麦和大豆 SOD 活性, 但对大麦 SOD 活性没有影响, 而 ZU 等人^[16]发现不同大豆品种 SOD 活性受 UV-B 辐射影响变化不一致. 还有一些试验表明, 人为补增 UV-B 辐射对 SOD 活性的影响受到随温度^[17]、辐照时间^[18]和叶龄^[19]的影响, 比如, TAKEUCHI 等人^[17]研究发现, UV-B 在 20 °C 时增加黄瓜子叶 SOD 的活性, 而在 25 °C 时却降低了 SOD 的活性. BALAKUMAR 等人^[20]报道, 番茄植株经 UV-B 照射后 CAT 活性增加, 大麦、向日葵、长春花和菠菜等经补增 UV-B 辐射处理后, POD 活性也均显著增加. 然而, 当 UV-B 辐照剂量过高时, POD 活性也会下降^[21]. 本试验中花生幼苗处理 3 d 后, 虽然 CAT 和 POD 活性显著提高, 但 SOD 活性却显著下降, 因而还是面临较为严重的 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 氧化胁迫. 这说明只有 SOD、CAT 和 POD 等 ROS 清除酶类活性的协调一致, 才能在一定程度上减轻 UV-B 引起的膜脂过氧化作用对细胞的伤害. 一些研究表明, 在接受补增 UV-B 辐射处理后, 植物 APX 活性会增强. 由于叶绿体中 CAT 含量极低, 因此, 叶绿体中 H_2O_2 的清除主要依赖于 APX-AsA 清除系统, APX 对其底物 AsA 有极高的专一性, 催化 AsA 与 H_2O_2 的反应生成单脱氢抗坏血酸(MDHA)和 H_2O ^[22]. 但在本研究中, UV-B 辐射增强处理 3 d 内并没有增加 APX 的活性和 AsA 的含量, 这与 COSTA 等人^[23]研究发现, 向日葵接受 UV-B 辐射处理后, APX 活性没有受到影响, 以及 WILLEKENS 等人^[24]发现, 烟草中 APX 的表达也没有受到 UV-B 辐射的影响相一致.

GSH 是植物组织中含有丰富的三肽(谷氨酰胺-半胱氨酸-甘氨酸), 存在于几乎所有的细胞器, 如线粒体、叶绿体、内质网、液泡和细胞质等, GSH 在维持细胞内氧化还原平衡状态方面具有重要作用. 中央的亲核半胱氨酸赋予 GSH 高还原力, 可以清除细胞内的 H_2O_2 , 也可以与其他 ROS(如 $^1\text{O}_2$, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 $\cdot\text{OH}$) 发生非酶反应降解. 谷胱甘肽的另一重要作用是通过 AsA-GSH 循环, 在脱氢抗坏血酸还原酶(DHAR)的作用下将脱氢抗坏血酸(DHA)再生为水溶性的强抗氧化剂 AsA. 关于 UV-B 辐射增强处理下 GSH 含量变化已经有较多研究, 向日葵、大豆、水稻、豌豆和拟南芥等在补增较高剂量 UV-B 处理下 GSH 含量明显上升, 松树中则减少, 但 TAULAVUORI 等人^[25]在室外长期用增强的 UV-B 处理欧洲越桔发现叶和茎中 GSH 含量均没有受到影响. 同样, UV-B 辐射增强下植物 AsA 含量的变化也各不相同, 大豆、水稻和拟南芥等中 AsA 含量在 UV-B 补增处理下大幅上升, 而玉米幼苗 AsA 含量却没有受到增强 UV-B 辐射的影响, 长期室外补增 UV-B 处理也没有影响欧洲越桔 AsA 的含量^[25]. 本研究发现补增 UV-B 处理 3 d 内, 花生幼苗 GSH 和 AsA 的含量均没有受到影响, 这有可能是补增的 UV-B 强度还不够的原因^[25], 同时植株体内 ROS 代谢主要通过抗氧化酶或其它方式代谢, GSH-AsA 代谢途径处理 ROS 的量可能很少.

类黄酮、黄酮醇和花色素苷等酚类化合物以及类胡萝卜素等萜类化合物是重要的紫外吸收物质^[26],

其中类黄酮是最主要的吸收物质. 师生波等人^[27]认为类黄酮主要集中在叶表皮层中, 因而它们能吸收进入植物叶片内的紫外光子, 减轻 UV-B 辐射对植物细胞的伤害. 而 PENG 等人^[28]认为类黄酮可以调节 ROS, 比如 $\cdot\text{OH}$ 和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的代谢, 因为其环上的羟基能作为质子供体参与氧化还原反应, 此外, 芳香环上的多不饱和双键也有助于清除自由基. 研究表明, 豌豆、拟南芥和大麦类黄酮含量与 UV-B 耐性显著正相关. 葡萄、大豆、仙客来和水仙^[29]等许多植物叶片类黄酮含量均随 UV-B 辐射强度的增加而显著增加. 董新纯等人^[30]发现补增 0.1 W/m^2 和 0.5 W/m^2 的 UV-B 处理后, 荞麦叶片类黄酮含量均显著提高, 3 d 达峰值, 之后下降. 本试验表明增强 UV-B 辐射处理 2 d 后, 花生叶片类黄酮含量显著升高, 这表明花生可以通过类黄酮含量的升高来吸收部分 UV-B 辐射或清除体内 ROS, 从而减轻 UV-B 辐射带来的危害. 但魏晓雪等人^[31]的研究结果却不同, 他们发现 $3.25\text{ }\mu\text{W/cm}^2$, $6.51\text{ }\mu\text{W/cm}^2$ 和 $9.76\text{ }\mu\text{W/cm}^2$ 的 UV-B 辐射增强处理均降低了红松叶片类黄酮含量. 这可能是因为植物种类不同, 也或许是试验地纬度不同, 自然 UV-B 辐射强度有也差异, 长期的进化, 使得植物应对 UV-B 辐射的方式也不同.

芳香族氨基酸赋予蛋白质紫外吸收的特性, 其最大吸收波长在 280 nm 附近, 正好处在 UV-B 辐射波长范围内, 因此, 蛋白质本身会受到 UV-B 辐射的影响较大. UV-B 辐射可对蛋白质作多种修饰, 这些修饰可引起植物体内蛋白质结构的改变和酶活性的改变, 从而影响植物的生长. 不仅如此, UV-B 辐射还会对植物蛋白质的含量产生影响. HE 等人^[32]在补增 0.68 W/m^2 的 UV-B 的辐射处理 8 d 后, 发现豌豆可溶性蛋白含量和核酮糖-1,5-二磷酸羧化/加氧酶(Rubisco)活性均显著降低. CAO 等人^[33]对大豆补增 0.15 W/m^2 和 0.45 W/m^2 的 UV-B 辐射处理, 发现可溶性蛋白质含量下降, 原因是因为氮代谢相关的酶类(硝酸还原酶、谷氨酰胺合酶和谷氨酸合酶)活性下降导致自由氨基酸含量下降, 类似的情况在蚕豆中也有出现^[34]. 不过, TEVINI 等人^[35]的研究发现, 补增强度为 2.30 W/m^2 的 UV-B 处理 7 d 后, 大麦可溶性蛋白质含量下降, 但强度为 0.60 W/m^2 和 1.16 W/m^2 的 UV-B 处理却增强了可溶性蛋白的含量. 可溶性蛋白质含量受补增 UV-B 影响变化不一的原因可能与植物种类有关, 也有可能和植物的生长发育阶段有关, 或者与 UV-B 辐射剂量有关. 本研究中, 处理 3 d 的花生叶片可溶性蛋白质含量显著提高, 这可能是花生对环境的适应性反应, 因为生长后期 UV-B 辐射可能会使蛋白质的分解代谢加强, 蛋白质含量减少, 因而, 前期蛋白质含量增加有利于植物抵抗增强的 UV-B 辐射.

参考文献:

- [1] MADRONICH S, MCKENZIE R L, BJ RN L O, et al. Changes in Biologically Active Ultraviolet Radiation Reaching the Earth's Surface [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1998, 46(1-3): 5-19.
- [2] YANNARELLI G G, NORIEGA G O, BATLLE A, et al. Heme Oxygenase Up-Regulation in Ultraviolet-B Irradiated Soybean Plants Involves Reactive Oxygen Species [J]. *Planta*, 2006, 224(5): 1154-1162.
- [3] RADYUKINA N L, SHASHUKOVA A V, MAKAROVA S S, et al. Exogenous Proline Modifies Differential Expression of Superoxide Dismutase Genes in UV-B-Irradiated *Salvia Officinalis* Plants [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2011, 58(1): 51-59.
- [4] TANG K, ZHAN J C, YANG H R, et al. Changes of Resveratrol and Antioxidant Enzymes During UV-Induced Plant Defense Response in Peanut Seedlings [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2010, 167(2): 95-102.
- [5] 李忠光, 龚 明. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进 [J]. *云南植物研究*, 2005, 27(2): 211-216.
- [6] SHI S, WANG G, WANG Y, et al. Protective Effect of Nitric Oxide Against Oxidative Stress Under Ultraviolet-B Radiation [J]. *Nitric Oxide*, 2005, 13(1): 1-9.
- [7] 赵世杰, 许长成, 邹 琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进 [J]. *植物生理学通讯*, 1994, 30(3): 207-210.
- [8] 高俊凤. 植物生理学实验指导 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 74-75.
- [9] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen Peroxide is Scavenged by Ascorbate-Specific Peroxidase in Spinach Chloroplasts [J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.

- [10] LAW M, CHARLES S A, HALLIWELL B. Glutathione and Ascorbic Acid in Spinach (*Spinacia oleracea*) Chloroplasts [J]. Biochemical Journal, 1983, 210: 899—903.
- [11] 林植芳, 李双顺, 张东林, 等. 采后荔枝果实中氧化和过氧化作用的变化 [J]. 植物学报: 英文版, 1988, 30(4): 382—387.
- [12] LOIS R. Accumulation of UV-Absorbing Flavonoids Induced by UV-B Radiation in *Arabidopsis thaliana* L [J]. Planta, 1994, 194(4): 498—503.
- [13] 张扬欢, 孙金春, 温 泉, 等. 乙酰水杨酸对增强 UV-B 辐射下长春花光合作用及抗氧化酶活性的影响 [J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2011, 33(2): 17—22.
- [14] 胡丽涛, 吴能表, 陈凤娟, 等. 水杨酸对 UV-B 胁迫下黄瓜荧光特性和抗氧化力的影响 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 35(3): 191—196.
- [15] 刘 芸, 钟章成, WERGER M J, 等. α -NAA 和 UV-B 辐射对柃楼幼苗光合色素及保护酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2003, 23(1): 8—13.
- [16] ZU Y, LI Y, CHEN H, et al. Intraspecific Differences in Physiological Response of 20 Soybean Cultivars to Enhanced Ultraviolet-B Radiation Under Field Conditions [J]. Environmental and Experimental Botany, 2003, 50(1): 87—97.
- [17] TAKEUCHI Y, MURAKAMI M, NAKAJIMA N, et al. Induction and Repair of Damage to DNA in Cucumber Cotyledons Irradiated with UV-B [J]. Plant and Cell Physiology, 1996, 37(2): 181—187.
- [18] DAI Q, YAN B, HUANG S, et al. Response of Oxidative Stress Defense Systems in Rice (*Oryza sativa*) Leaves with Supplemental UV-B Radiation [J]. Physiologia Plantarum, 1997, 101(2): 301—308.
- [19] KRIZEK D T, KRAMER G F, UPADHYAYA A, et al. UV-B Response of Cucumber Seedlings Grown Under Metal Halide and High Pressure Sodium/Deluxe Lamps [J]. Plant Physiology, 1993, 88(2): 350—358.
- [20] BALAKUMAR T, GAYATHRI B, ANBUDURAI P. Oxidative Stress Injury in Tomato Plants Induced by Supplemental UV-B Radiation [J]. Biologia Plantarum, 1997, 39(2): 215—221.
- [21] RAO M V, PALIYATH G, ORMROD D P. Ultraviolet-B-and Ozone-Induced Biochemical Changes in Antioxidant Enzymes of *Arabidopsis thaliana* [J]. Plant Physiology, 1996, 110(1): 125—136.
- [22] GILLHAM D, DODGE A. Hydrogen-Peroxide-Scavenging Systems Within Pea Chloroplasts [J]. Planta, 1986, 167(2): 246—251.
- [23] COSTA L B, RANGEL D E N, MORANDI M A B, et al. Impact of UV-B Radiation on Clonostachys Rosea Germination and Growth [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2012, 28(7): 2497—2504.
- [24] WILLEKENS H, VAN CAMP W, VAN MONTAGU M, et al. Ozone, Sulfur Dioxide, and Ultraviolet B Have Similar Effects on mRNA Accumulation of Antioxidant Genes in *Nicotiana plumbaginifolia* L [J]. Plant Physiology, 1994, 106(3): 1007—1014.
- [25] TAULAVUORI E, BCKMAN M, TAULAVUORI K, et al. Long-Term Exposure to Enhanced Ultraviolet-B Radiation in the Sub-Arctic Does Not Cause Oxidative Stress in *Vaccinium myrtillus* [J]. New Phytologist, 1998, 140(4): 691—697.
- [26] COCKELL C S, KNOWLAND J. Ultraviolet Radiation Screening Compounds [J]. Biological Reviews of the Cambridge Philosophical Society, 1999, 74(3): 311—345.
- [27] 师生波, 贲桂英, 韩 发. 不同海拔地区紫外线 B 辐射状况及植物叶片紫外线吸收物质含量的分析 [J]. 植物生态学报, 1999, 23(6): 529—535.
- [28] PENG Z F, STRACK D, BAUMERT A, et al. Antioxidant Flavonoids from Leaves of *Polygonum hydropiper* L [J]. Phytochemistry, 2003, 62(2): 219—228.
- [29] 何会流. 增强 UV-B 对凤仙花部分生理指标和总黄酮质量分数的影响 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2013, 38(8): 41—45.
- [30] 董新纯, 赵世杰, 郭珊珊, 等. 增强 UV-B 条件下类黄酮与苦荞逆境伤害和抗氧化酶的关系 [J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2006, 37(2): 157—162.

- [31] 魏晓雪, 于景华, 李德文, 等. UV-B 辐射增强对红松幼苗针叶脂质过氧化及抗氧化系统的影响 [J]. 林业科学, 2011, 47(5): 54—59.
- [32] HE J, HUANG L, CHOW W, et al. Effects of Supplementary Ultraviolet-B Radiation on Rice and Pea Plants [J]. Functional Plant Biology, 1993, 20(2): 129—142.
- [33] CAO R, HUANG X H, ZHOU Q, et al. Effects of Lanthanum (III) on Nitrogen Metabolism of Soybean Seedlings Under Elevated UV-B Radiation [J]. Journal of Environmental Sciences, 2007, 19(11): 1361—1366.
- [34] 张红霞, 吴能表, 胡丽涛, 等. 不同强度 UV-B 辐射胁迫对蚕豆幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响 [J]. 西南师范大学学报: 自然科学版, 2010, 35(1): 105—110.
- [35] TEVINI M, IWANZIK W, THOMA U. Some Effects of Enhanced UV-B Irradiation on the Growth and Composition of Plants [J]. Planta, 1981, 153(4): 388—394.

Physiological and Biochemical Responses of *Arachis hypogaea* Seedlings to Enhanced UV-B

DU Zhao-kui^{1,2,3}, LI Jun-min^{2,3}, ZHONG Zhang-cheng¹

1. MOE Key Laboratory of Eco-Environments of Three Gorges Reservoir Region,

School of Life Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Plant Evolutionary Ecology and Conservation, Taizhou Zhejiang 318000, China;

3. Institute of Ecology, Taizhou University, Taizhou Zhejiang 318000, China

Abstract: A field experiment was conducted to explore the physiological and biochemical mechanisms of the responses of the seedlings of peanut (*Arachis hypogaea* L.) cv. Xiaojingsheng to enhanced UV-B radiation ($54 \mu\text{W}/\text{cm}^2$). In the treatment of supplementary ultraviolet-B (UV-B), the contents of superoxide anion (O_2^-), flavonoids and soluble proteins, the activities of catalase (CAT) and peroxidase (POD) and the relative electrical conductivity in the peanut leaves were increased significantly, the activity of superoxide dismutase (SOD) increased at first and then decreased; nevertheless, the contents of hydrogen peroxide (H_2O_2), malondialdehyde (MDA), ascorbic acid (AsA) and glutathione (GSH) and the activities of ascorbate peroxidase (APX) showed no significant changes in the leaves. These results indicated that elevated UV-B could significantly increase the content of reactive oxygen species (ROS) in peanut leaves, O_2^- was the principal factor for oxidative stress, and peanut seedlings resisted the stress of ROS mainly through increasing the content flavonoids and the activities of SOD, CAT and POD, and that the AsA-GSH circulatory system had no obvious effect on clearing ROS.

Key words: peanut; ultraviolet-B; reactive oxygen species; antioxidant; nonenzymatic antioxidant

责任编辑 潘春燕

