

UV-B 辐射增强对大豆叶绿素荧光特性的影响

李涵茂¹, 胡正华^{1*}, 杨燕萍¹, 陈书涛¹, 李岑子¹, 索福喜¹, 申双和²

(1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044; 2. 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044)

摘要: 利用脉冲振幅调制叶绿素荧光仪测定大豆不同生育期叶片的荧光参数和快速光曲线, 以研究 UV-B 辐射增强对大豆叶绿素荧光特性的影响. 结果表明, UV-B 辐射增强 20% 条件下, 大豆幼苗期、分枝-开花期和结荚期的叶绿素含量分别降低了 5.03%、7.70% 和 10.38%; 分枝-开花期, F/F_m 值降低了 6.13%; 幼苗期和分枝-开花期, 有效量子产量 (Y) 在 $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时显著降低, 最大潜在相对电子传递速率 (P_m) 分别降低了 28.92% 和 15.49%; 但对三叶期和结荚期的 Y 和 P_m 无显著影响. UV-B 辐射增强使三叶期和幼苗期半饱和光强 (I_k) 分别降低了 21.18% 和 23.17%; 使分枝-开花期的初始斜率 (α) 降低了 21.05%; 并显著降低了幼苗期 $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 的非光化学淬灭 (NPQ) 和分枝-开花期 $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 的光化学淬灭 (qP). 本研究意味着 UV-B 辐射增强抑制了 PSII 的电子传递活性, 损伤了捕光系统和耗散保护机制, 破坏了大豆光合系统, 使其光合效率下降.

关键词: UV-B 辐射增强; 大豆; 叶绿素荧光; 快速光曲线; 荧光淬灭

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)12-3669-07

Influence of Enhanced UV-B Radiation on Chlorophyll Fluorescence Characteristics of Soybean

LI Han-mao¹, HU Zheng-hua¹, YANG Yan-ping¹, CHEN Shu-tao¹, LI Cen-zi¹, SUO Fu-xi¹, SHEN Shuang-he²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: To investigate the influence of enhanced UV-B radiation on chlorophyll fluorescence characteristics of soybean, pulse amplitude modulation fluorometer was employed to measure the fluorescence parameters and rapid light curves during different growth stages under the condition of simulating 20% enhancement of UV-B. Results showed that enhanced UV-B radiation reduced the chlorophyll contents by 5.03%, 7.70% and 10.38% in seedling, branching-flowering and pod-setting periods, respectively. In branching-flowering period, the value of F/F_m decreased by 6.13%. In seedling and branching-flowering periods, effective quantum yield (Y) diminished significantly during $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$, the maximal potential relative electron transport rate (P_m) diminished by 28.92% and 15.49%, respectively. But Y and P_m had no significant difference in 3-leave and pod setting periods. Semi-light saturation points (I_k) were diminished by 21.18% and 23.17% in 3-leave and seedling period. Initial slope (α) was decreased by 21.05% in branching-flowering period. Enhanced UV-B radiation also significantly reduced non-photochemical quenching (NPQ) during $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ in seedling period and photochemical quenching (qP) during $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ in branching-flowering period. The results of this study suggested that enhanced UV-B radiation inhibited electron transport activity of PSII, injured light harvesting systems and dissipative protection mechanisms, damaged photosynthesis system, thus diminished photosynthetic efficiency of soybean.

Key words: enhanced UV-B radiation; soybean; chlorophyll fluorescence; rapid light curves; fluorescence quenching

由于氟氯烷烃 (CFCs) 和氮氧化物的大量排放, 平流层臭氧层正不断变薄. 臭氧层的消耗导致到达地表的太阳紫外辐射比 1980 年前增加了 6% ~ 14%^[1]. Albritton 等^[2] 预计未来 60 a 内, 地表紫外辐射强度将增加 4% ~ 20%. 由于大量淘汰的旧冰箱中 CFCs 的释放^[3], 加之 CFCs 半衰期较长 (50 ~ 150 a), 使平流层臭氧在短时间内难以完全修复^[4], 温室气体 N_2O 的作用也将会使这一修复过程变得更加缓慢^[5], 地表 UV-B 辐射强度在今后相当长的一段时间内还将处于较高水平^[6].

有关 UV-B 辐射增强对农作物生长的影响, 科

学家开展了大量的模拟实验, 如 Breznik 等^[7] 模拟了 O_3 衰减 17% 的 UV-B 辐射增强试验, 李元等^[8] 在昆明地区进行了 O_3 衰减 20% 的 UV-B 辐射增强试验. 大量实验结果表明, UV-B 辐射增强显著影响农作物生长: 破坏叶绿体结构^[9], 降低叶绿素含量^[10, 11], 降低 Hill 反应活力^[12]、Rubisco 含量^[13] 和光合速率^[14],

收稿日期: 2008-12-16; 修订日期: 2009-06-10

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40605029); 中国博士后科学基金项目 (20070420195)

作者简介: 李涵茂 (1983~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化生态学. E-mail: lh_1010@yeah.net

* 通讯联系人, E-mail: zhhu@nuist.edu.cn

导致作物生物量和产量减少^[15]。

快速光曲线是研究植物光合作用的新技术^[16]。这种方法在不同 PAR 梯度下的光适应时间只需要 10 s, 有关稳定的电子传递信息就可以获得^[17]。与传统方法相比, 测量快速且对样品自然光合状态的干扰小^[18]。快速光曲线基于植物的瞬间光适应状态, 能很好地反映植株 1 d 光合作用变化过程^[19], 而且能提供详细的光合系统 II (PS II, photosynthetic system II) 功能变化信息, 植物的光合能力、光适应状态、光响应能力, 以及植物对光强环境的适应范围^[16]。如今, 快速光曲线在植物生理生态学领域得到了广泛应用^[20~22]。

本研究分析了 UV-B 辐射增强下大豆不同生育期叶绿素荧光的变化特征, 旨在探讨 UV-B 辐射增强对大豆光合机制的影响规律, 以期客观评价紫外辐射生态效应和探索 UV-B 辐射胁迫下作物生长响应机制提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

田间试验于 2008 年大豆生长季在南京信息工程大学生态与农业气象试验站(32.0°N, 118.8°E)进行。土壤为潜育型水稻土, 灰马肝土属, 耕层土壤质地为壤质黏土, 黏粒含量为 26.1%, 土壤 pH(H₂O) 值为 6.2, 有机碳、全氮的含量分别为 19.4 g·kg⁻¹、1.45 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

采用人工增加紫外辐射的方法, 将 UV-B 灯管(40 W, 峰值 313 nm, 上海华德电光源厂生产)悬挂于作物上方, 用于模拟 UV-B 辐射增强。设对照(CK)与 UV-B 辐射增强 20%(T) 2 个水平处理, 各 4 重复, 计 8 个试验小区。T 与 CK 均悬挂 UV-B 灯管, 但 CK 的灯管包裹 Mylar 膜(厚度 125 μm, 美国杜邦公司), 以滤掉 320 nm 以下的波段, 保证 T 与 CK 相比仅仅是 UV-B 增强, 而其它环境条件(UV-A 和 PAR)相同。采用 UV-B 监测装置(SKU430, 280~315 nm, 英国 Skye 公司)和数据采集器(Skye-Dataglog, 英国 Skye 公司)自动记录 CK 和 T 的 UV-B 强度, 通过调节灯管高度和电流输出强度保证 T 比 CK 的 UV-B 辐射强度高 20%。

大豆品种为八月白, 2008 年 7 月 6 日播种, 7 月 9 日出苗。从大豆出苗开始进行 UV-B 辐射增强处理, 直至大豆收获, 每天辐照时间为 08:00~16:00。

1.3 叶绿素含量的测定

在测量叶片快速光曲线前, 用 SPAD-502 型叶绿素计(Chlorophyll SPAD-502 Meter, Konica Minolta, 日本)测量大豆叶片的叶绿素含量相对值, 单位为仪器自设的 SPAD。

1.4 叶绿素荧光与快速光曲线的测量

在三叶期、幼苗期、分枝-开花期和结荚期的晴天, 每试验小区随机选取 4 株大豆植株作为重复。在日落后 2 h, 叶片完全暗适应后, 用 Diving-PAM (WALZ, 德国) 叶绿素调制式荧光仪对成型新叶进行光-暗适应快速光曲线的测量^[23]。先测量最小荧光 F_0 和暗适应下的最大荧光 F_m , 随后打开 112、234、366、557、771、1146、1561 和 2351 μmol·(m²·s)⁻¹ 等 8 个 PAR 梯度。每个梯度持续 10 s, 打开饱和脉冲测量瞬时荧光 F 和光适应下的最大荧光 F'_m 。

荧光参数的定义见 Van-Kooten 等^[24], 计算公式按文献[24~27]进行: 光系统 II 的最大量子产量 $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$; 光系统 II 的有效量子产量 $Y = (F'_m - F)/F'_m$; 相对电子传递速率 $rETR = Y \times PAR \times 0.84 \times 0.5$, 其中 0.84 是植物经验性吸光系数, 0.5 是假设植物吸收的光能被 2 个光系统均分; 光化学淬灭 $qP = (F'_m - F)/(F'_m - F_0)$; 非光化学淬灭 $NPQ = (F_m - F'_m)/F'_m$ 。式中, F_0 为固定荧光, F_m 为最大荧光产量, F'_m 为光适应下的最大荧光, PAR 为光合有效辐射。

1.5 快速光曲线拟合

曲线拟合采用最小二乘法, 快速光曲线拟合采用 Smith^[28] 的公式:

$$P = P_m \cdot \alpha \cdot PAR / \sqrt{P_m^2 + (\alpha \cdot PAR)^2}$$

式中, P 代表光合速率, 即相对电子传递速率, P_m 为无光抑制时的最大潜在相对电子传递速率, α 是快速光曲线的初始斜率, PAR 为光合有效辐射, sqrt() 为平方根函数。

半饱和光强 $I_k = P_m / \alpha$ 。

1.6 统计分析

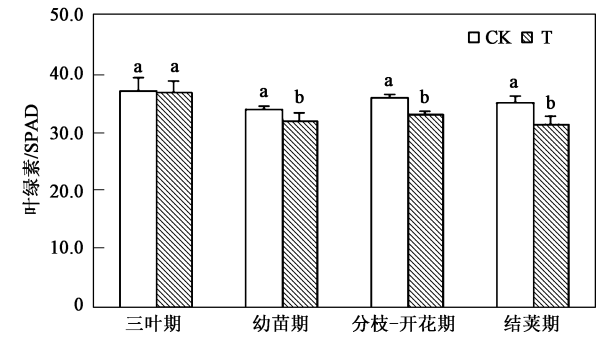
数据的统计分析应用 Statistica 软件完成。

2 结果与分析

2.1 UV-B 辐射增强对叶绿素含量的影响

由图 1 可见, 在三叶期, UV-B 辐射增强对叶绿素含量无明显影响($p = 0.451$)。在幼苗期、分枝-开花期和结荚期, UV-B 辐射增强显著降低了叶绿素含量(p 为 0.024、0.001、0.003), 降幅分别为 5.03%、7.70% 和 10.38%。说明随着 UV-B 辐照时间的增加,

UV-B 对叶绿素含量胁迫的累积效应愈加明显.



图中相同字母表示对照与处理无明显差异, 不同字母表示对照与处理有显著差异性 ($p < 0.05$), 下同

图 1 UV-B 辐射增强对大豆叶片叶绿素含量的影响

Fig. 1 Effects of enhanced UV-B on chlorophyll content in soybean leaves

2.2 UV-B 辐射增强对 F_v/F_m 的影响

如图 2 所示, 在三叶期和幼苗期, CK 的 F_v/F_m 值均稍高于 T, 但差异性并不显著 (p 为 0.089、0.116). 在分枝-开花期和结荚期, T 的 F_v/F_m 值均显著低于 CK (p 为 0.001、0.009), 降低比例分别

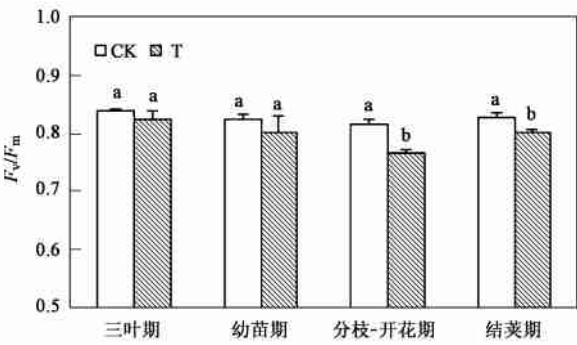


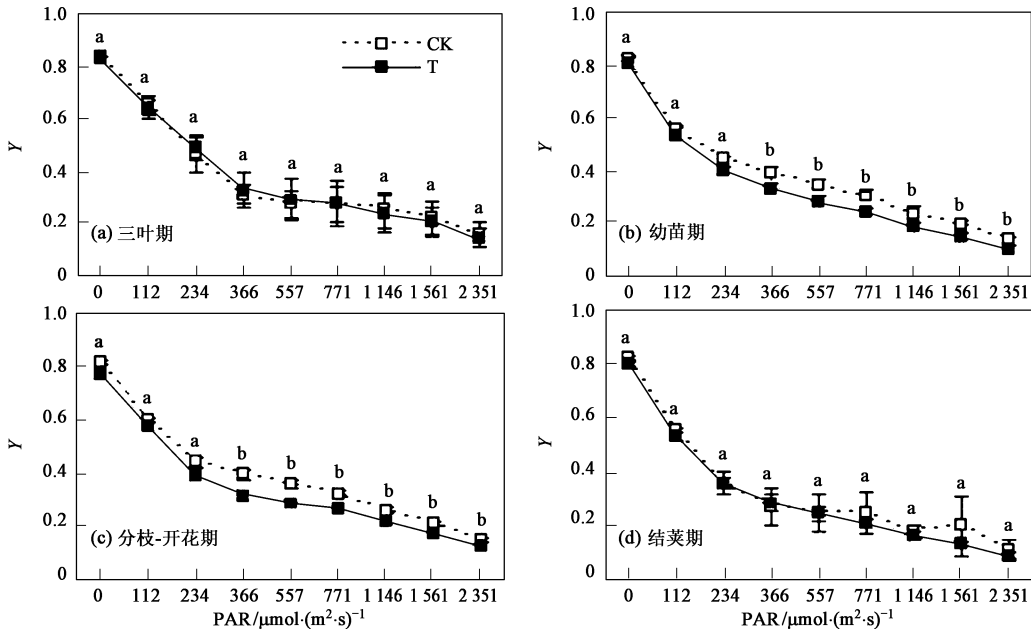
图 2 UV-B 辐射增强对大豆 F_v/F_m 的影响

Fig. 2 Effects of enhanced UV-B on F_v/F_m of soybean

为 6.13% 和 3.03%.

2.3 UV-B 辐射增强对 Y 的影响

图 3 为大豆不同生育期 Y 随 PAR 的变化. 在三叶期, 各梯度 PAR 下, CK 和 T 的 Y 没有明显差异. 在幼苗期和分枝-开花期, PAR 从 $366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 开始, CK 的 Y 均显著高于 T. 在结荚期, 各梯度 PAR 下, Y 没有明显差异. 从图 3 还可看出, 各生育期 Y 随 PAR 梯度变化的趋势相似. 从 $366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 开始, Y 随 PAR 增加而变化的速率都趋于平缓.



图中 a、b 代表对照与处理的方差分析结果, 其中 a 表示 $p > 0.05$, b 表示 $p < 0.05$, 下同

图 3 大豆有效量子产量随 PAR 的变化

Fig. 3 Changes of effective quantum yield with PAR of soybean

2.4 UV-B 辐射增强对快速光曲线相关参数的影响

表 1 是快速光曲线的光合参数. 在整个生育期, CK 的 P_m 都高于 T, 其中幼苗期和分枝-开花期差异显著, T 比 CK 分别降低了 28.92% 和 15.49%. 对 α

的影响主要在分枝-开花期, T 比 CK 降低了 21.05%. I_k 值在整个生育期都是 CK 高于 T, 特别是在三叶期和幼苗期, 有显著差异, T 比 CK 分别降低了 21.18% 和 23.17%.

表 1 大豆快速光曲线光合参数的变化¹⁾
Table 1 Changes of photosynthetic parameters of soybean

时期	处理水平	最大潜在相对电子传递速率 P_m $/\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$	初始斜率 α	半饱和光强 I_k
三叶期	CK	176.16±23.08	0.14±0.02	1259.86±25.24*
	T	153.09±41.87	0.15±0.04	993.99±12.92
幼苗期	CK	142.89±11.86*	0.18±0.02	794.02±97.78*
	T	101.56±12.51	0.17±0.01	610.04±79.12
分枝-开花期	CK	151.63±7.36*	0.19±0.01*	845.81±114.03
	T	128.14±16.09	0.15±0.01	806.36±54.94
结荚期	CK	127.38±63.76	0.13±0.02	932.12±74.21
	T	88.11±9.29	0.15±0.02	606.70±101.57

1) * 表示 CK 与 T 有显著差异($p < 0.05$)

2.5 UV-B 辐射增强对大豆荧光淬灭的影响

图 4 是不同生育期 qP 和 NPQ 随 PAR 的变化。三叶期, CK 与 T 的 qP 在各 PAR 梯度下都无显著差异。NPQ 从 1516 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 开始, T 明显低于 CK。幼苗期, qP 从 557 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 开始, T 明显低

于 CK; NPQ 从 366 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 开始, T 明显低于 CK。分枝-开花期, qP 从 366 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 开始, T 明显低于 CK; 从 771 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 开始, T 的 NPQ 明显低于 CK。结荚期, CK 与 T 的 qP 在各 PAR 梯度下无显著差异; 而 NPQ 从 771 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{s})^{-1}$ 开始,

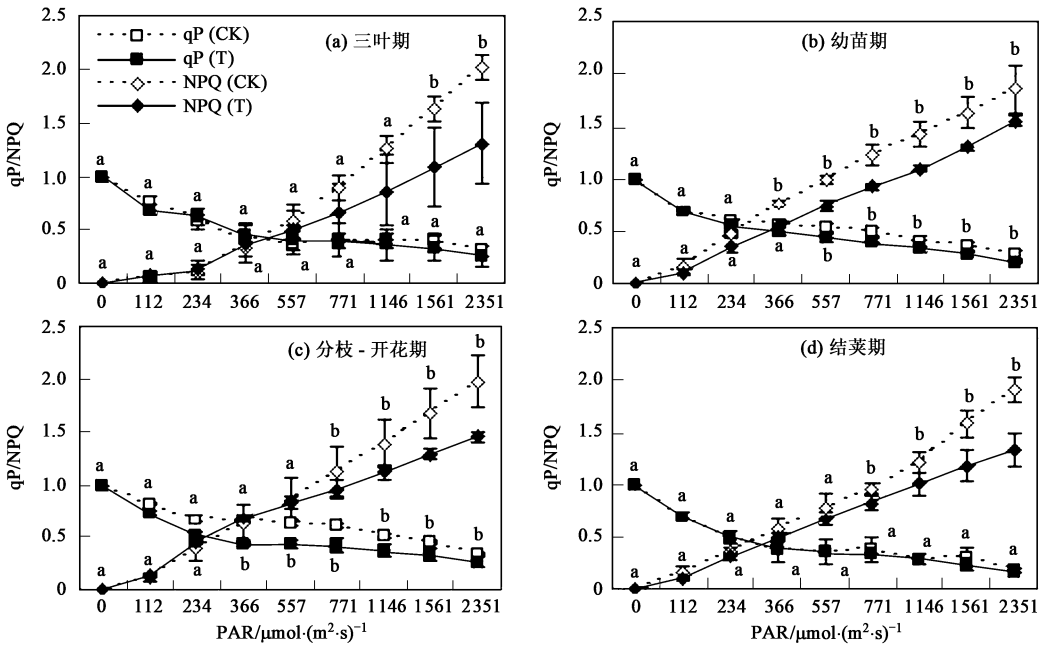


图 4 大豆荧光淬灭随 PAR 的变化
Fig. 4 Changes of fluorescence quenching with PAR of soybean

T 明显低于 CK。

3 讨论

叶绿素是植物进行光合作用的重要色素, 对环境胁迫十分敏感, 这种敏感性也表现在对 UV-B 辐射胁迫的响应上。本实验中, 大豆从幼苗到结荚期, 在 UV-B 增强胁迫下, 叶绿素含量都显著低于对照。可能是 UV-B 辐射抑制光合色素的合成^[10], 破坏叶绿体结构^[9], 诱导膜脂过氧化, 破坏叶绿体膜系统,

导致叶绿素分解的结果^[29]。最大光化学量子产量 F_v/F_m , 反映 PS II 反应中心内禀光能转换效率(intrinsic PS II efficiency) 或称最大 PS II 的光能转换效率(optimal/ maximal PS II efficiency), 在叶暗适应后测得。非胁迫条件下该参数的变化极小, 胁迫条件下该参数明显下降^[30]。 F_v/F_m 下降包含两重意思: PS II 反应中心的光化学伤害和系统提高热耗散, 后者实际上就是保护机制^[31]。本研究中, UV-B 辐射胁迫显著降低了大豆分

枝开花期和结荚期的 F_v/F_m 值. 说明在 UV-B 辐射胁迫下, 大豆 PS II 反应中心内禀光能转化效率受到抑制, PS II 反应中心受到了光化学伤害^[31]. 这可能是 UV-B 辐射胁迫下 PS II 中初级电子受体 Q_A 的双还原导致三线态叶绿素形成, 后者与附近 O_2 反应生成 1O_2 , 由于 1O_2 的破坏作用而引起光抑制^[32]. 并且, 在分枝-开花期, UV-B 辐射胁迫下大豆的 qP 和 NPQ 都显著低于对照. qP 偏小, 说明 PS II 原初电子受体 Q_A^- 重新氧化形成 Q_A 的量减少, 即 PS II 的电子传递活性受抑制^[33]. NPQ 偏小, 说明大豆用于热耗散的机制严重损伤, 以提高热耗散来保护光合系统的功能已失效.

有效光化学量子产量 Y , 反映了 PS II 反应中心在部分关闭情况下的实际原初光能捕获效率, 不需经过暗适应在光下直接测定^[27]. 在幼苗期和分枝-开花期, UV-B 辐射增强对大豆在 $PAR < 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 的 Y 影响不显著, 而显著降低了 $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时的 Y , 但 UV-B 辐射增强没有改变大豆 Y 对 PAR 的响应趋势. 在幼苗期和分枝-开花期, $PAR > 366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, T 的 qP 也显著低于 CK. 说明 PS II 原初电子受体 Q_A^- 重新氧化形成 Q_A 的量减少^[33]. 而氧化态 Q_A 是 PS II 电子传递的原初醌受体, 它决定 PS II 的激发能捕获速率^[34]. PS II 的激发能捕获速率受到抑制, 造成 Y 的降低.

快速光曲线中荧光参数的变化可以提供受损植物光合作用的信息^[24]. 通过快速光曲线不仅能够判断当前状态下植物的光合作用能力, 而且能够评估环境中光强对植物潜在的光合作用能力的影响^[16]. P_m 和 l_k 反映了光耐受能力和电子传递能力, α 反映了光能利用效率^[28]. 本研究中, 快速光曲线反映出 UV-B 辐射胁迫抑制了大豆的光合作用. P_m 、 l_k 的显著下降, 说明大豆光耐受能力和电子传递能力在 UV-B 辐射胁迫下显著减弱. 电子传递能力下降的可能原因是 UV-B 辐射胁迫破坏了电子醌受体功能、酪氨酸氧化还原能力、放氧化合物以及 D_1 蛋白^[35]. P_m 的改变还认为与光合碳同化的关键酶 Rubisco 有很大关系^[34]. UV-B 辐射胁迫可能降低了大豆的 Rubisco 酶活性, 使其羧化速率下降. 在分枝-开花期, CK 的初始斜率 α 显著高于 T, 而在其他生育期, CK 和 T 间的初始斜率 α 差异不显著. 幼苗期, UV-B 辐射增强对大豆的捕光系统未造成伤害, 但 T 的 Y 和 qP 却显著低于 CK. 其可能原因是类囊体光系统和捕光色素系统未受到破坏^[36], 而是 PS II 电子传递

活性受抑制的结果. 在分枝-开花期, UV-B 辐射增强胁迫对大豆的捕光系统造成了伤害, 这可能是 UV-B 辐射增强破坏类囊体光系统尤其是捕光色素系统的结果^[36].

光化学淬灭反映的是 PS II 天线色素吸收的光能用于光化学电子传递的份额, 要保持高的光化学淬灭就要使 PS II 反应中心处于“开放”状态, 所以光化学淬灭又在一定程度上反映了 PS II 反应中心的开放程度^[21]. 光化学淬灭反映了 PS II 原初电子受体 Q_A 的还原状态, 它由 Q_A^- 重新氧化形成^[37]. qP 愈大, Q_A^- 重新氧化形成 Q_A 的量愈大, 即 PS II 的电子传递活性愈大^[34]. 非光化学淬灭反映的是 PS II 天线色素吸收的光能以热的形式耗散掉的光能部分. 当 PS II 反应中心天线色素吸收了过量光能时, 如不能及时地耗散将对光合机构造成失活或破坏, 所以非光化学淬灭是一种自我保护机制, 对光合机构起一定的保护作用^[27]. UV-B 辐射增强对大豆的 qP 和 NPQ 有着显著的影响, T 的 qP 显著低于 CK. 说明 UV-B 辐射增强严重影响了大豆对光强的梯度响应, 即使在很弱光强的情况下, 大豆都不能有效的捕获光能进行光合作用. 造成这一现象的原因是 PS II 电子传递活性受抑制和捕光系统损伤造成的. UV-B 辐射增强显著降低 NPQ, 说明 PS II 天线色素吸收的光能热能形式散失的机制受到了严重破坏^[27].

本研究发现 PAR 从 $366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 开始, CK 与 T 的快速光曲线中一些荧光参数开始出现差异. 说明, UV-B 辐射增强缩小了大豆对光强的适应范围. 田间最大光强通常在 $2000 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 左右, 在 $1561 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 时, T 的 NPQ 都显著低于 CK. 由此看出, 在田间光强下, 大豆的光保护机制已严重破坏, 进而破坏光合机构, 降低光合效率. 在三叶期和结荚期, T 与 CK 的 Y 和 qP 无明显差异, 说明光保护机制的损伤程度还不足以抑制 PS II 的激发能捕获速率, 造成 P_m 下降. 从 $557 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 开始, 幼苗期和分枝-开花期 T 的 qP 显著低于 CK. 在田间光强下, T 的大豆 PS II 的电子传递活性将受到抑制, 造成 P_m 下降.

4 结论

(1) UV-B 辐射增强显著降低了大豆幼苗期到结荚期的叶绿素含量, 且随着处理时间的延长, UV-B 对叶绿素胁迫的累积效应愈加明显.

(2) UV-B 辐射增强影响了大豆幼苗期、分枝-开花期和结荚期的光合荧光参数. UV-B 辐射增强使得

大豆 PS II 反应中心受到了光化学伤害,减小了 PS II 反应中心内禀光能转化效率和 PS II 的激发能捕获速率,造成有效光化学量子产量的降低.破坏了大豆光化学淬灭(qP)和非光化学淬灭机制(NPQ),损伤了捕光系统,使光合机构运转发生紊乱,造成光合效率下降.

(3) UV-B 辐射胁迫下,大豆对光强适应范围出现 $366 \mu\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 拐点,而对 PAR 的响应趋势没有明显变化.

参考文献:

- [1] UNEP II WMO. Executive Summary, Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002, World Meteorological Organization Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 47[R]. UNEP: WMO, 2002.
- [2] Albritton D L, Watson R J. Scientific assessment of stratospheric ozone change: 1989. Global Ozone Research and Monitoring Project Report No.20[R]. Geneva: WMO, 1990.
- [3] 叶林顺, 汤心虎. 冰箱 CFCs 及其替代物的温室效应比较[J]. 环境科学与技术, 2001, **96**(4): 17-20.
- [4] Jackman C H, Fleming E L, Chandra S, *et al.* Past, present and future modeled ozone trends with comparisons to observed trends [J]. J Geophy Res, 1996, **101**: 28753-28767.
- [5] Weatherhead E C, Andersen S B. The search for signs of recovery of the ozone layer [J]. Nature, 2006, **441**: 39-45.
- [6] McKenzie R L, Aucamp P J, Bais A F, *et al.* Changes in biologically active ultraviolet radiation reaching the Earth's surface [J]. Photochem Photobiol Sci, 2007, **6**: 218-231.
- [7] Breznik B, Gem M, Gaberscik A, *et al.* Combined effects of elevated UV-B radiation and the addition of selenium on common (*Fagopyrum esculentum* Moench) and tartary [*Fagopyrum tataricum* (L.) Gaertn.] buckwheat [J]. Photosynthetica, 2005, **43**(4): 583-589.
- [8] 李元, 何永美, 秦丽, 等. 两个割手密(*Saccharum spontaneum* L.) 无性系对 UV-B 辐射响应的形态和生理差异[J]. 农业环境科学学报, 2008, **27**(5): 1956-1962.
- [9] 吴杏春, 林文雄, 黄忠良. UV-B 辐射增强对两种不同抗性水稻叶片光合生理及超显微结构的影响[J]. 生态学报, 2007, **27**(2): 554-564.
- [10] Yao Y, Xuan Z, Li Y, *et al.* Effects of ultraviolet-B radiation on crop growth, development, yield and leaf pigment concentration of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) under field conditions [J]. Eur J Agr, 2006, **25**: 215-222.
- [11] 周青, 黄晓华, 赵姬, 等. 紫外辐射(UV-BC)对 47 种植物叶片的表观伤害效应[J]. 环境科学, 2002, **23**(3): 23-28.
- [12] 李津津, 李靖梅, 周青. Ce(III)对 UV-B 辐射胁迫下大豆幼苗光化学反应的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(6): 1388-1391.
- [13] He J M, She X P, Meng Z N, *et al.* Reduction of Rubisco Amount by UV-B Radiation Is Related to Increased H_2O_2 Content in Leaves of Mung Bean Seedlings [J]. J Plant Physiol Mol Biol, 2004, **30**(3): 291-296.
- [14] 罗南书, 钟章成. 田间增加 UV-B 辐射对玉米光合生理的影响[J]. 生态学杂志, 2006, **25**(4): 369-373.
- [15] 陈建军, 祖艳群, 陈海燕, 等. UV-B 辐射增强对 20 个大豆品种生长与生物量分配的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, **23**(1): 29-33.
- [16] Ralph P J, Gademann R. Rapid light curves: A powerful tool to assess photosynthetic activity [J]. Aquat Bot, 2005, **82**: 222-237.
- [17] Rascher U, Liebig M, Lüttge U. Evaluation of instant light response curves of chlorophyll fluorescence parameters obtained with a portable chlorophyll fluorometer on site in the field [J]. Plant Cell Environ, 2000, **23**: 1397-1405.
- [18] White A J, Critchley C. Rapid light curves: a new fluorescence method to assess the state of the photosynthetic apparatus [J]. Photosynth Res, 1999, **59**: 63-72.
- [19] Schreiber U. Pulse-amplitude-modulation (PAM) fluorometry and saturation pulse method: an overview [A]. In: Papageorgiou G C. Chlorophyll Fluorescence: a Signature of Photosynthesis [C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2004. 279-319.
- [20] Cruz S, Serodio J. Relationship of rapid light curves of variable fluorescence to photoacclimation and non-photochemical quenching in a benthic diatom [J]. Aquat Bot, 2008, **88**: 256-264.
- [21] Belshe E F, Durako M J, Blum J E, *et al.* Photosynthetic rapid light curves (RLC) of *Thalassia testudinum* exhibit diurnal variation [J]. J Exp Mar Biol Ecol, 2007, **342**: 253-268.
- [22] 朱英华, 屠乃美, 肖汉乾. 硫对烟草叶片光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2008, **28**(3): 1009-1005.
- [23] 韩志国, 雷腊梅, 韩博平. 光-暗循环中三角褐指藻和具齿原甲藻快速光曲线的变化[J]. 热带海洋学报, 2005, **24**(6): 13-21.
- [24] Van Kooten O, Snel J F H. The use of chlorophyll fluorescence nomenclature in plant stress physiology [J]. Photosynth Res, 1990, **25**: 147-150.
- [25] Bernard G, Jeremy H, Jean-Marie B, *et al.* The relationship between non-photochemical quenching of chlorophyll [J]. Photosynth Res, 1990, **25**: 249-257.
- [26] Maxwell K, Johnson G N. Chlorophyll fluorescence a practical guide [J]. J Exp Bot, 2000, **51**(345): 659-668.
- [27] 张守仁. 叶绿素荧光动力学参数的意义及讨论[J]. 植物学通报, 1999, **16**(4): 444-448.
- [28] Smith E L. Photosynthesis in Relation to Light and Carbon Dioxide [J]. Proc Natl Acad Sci, 1936, **22**: 504-511.
- [29] 杨景宏, 陈拓, 王勋陵. 增强紫外线-B 辐射对小麦叶绿体膜组分和膜流动性的影响[J]. 植物生态学报, 2000, **24**(1): 102-105.
- [30] 许大全, 张玉忠, 张荣铎. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学通讯, 1992, **28**(4): 237-243.
- [31] 陈贻竹, 李晓萍, 夏丽, 等. 叶绿素荧光技术在植物环境胁迫研究中的应用[J]. 热带亚热带植物学报, 1995, **3**(4): 79-86.
- [32] 徐志防, 罗广华, 王爱国, 等. 强光及活性氧对大豆光合作用的影响[J]. 植物学报, 1999, **41**(8): 862-866.
- [33] 王可玢, 许春辉, 赵福洪, 等. 水分胁迫对小麦旗叶某些体内

叶绿素 a 荧光参数的影响[J]. 生物物理学报, 1997, 13(2): 273-278.

[34] 许大全. 光合作用效率[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2002. 47.

[35] Gustavo C R, Marcel A K J, Maria E N, *et al.* Evidence for the semireduced primary quinone electron acceptor of photosystem II being a photosensitizer for UVB damage to the photosynthetic apparatus [J]. Plant Sci, 2006, 170: 283-290.

[36] 瞿先能, 陈宗瑜, 郭世昌, 等. UV-B 辐射的增强对作物形态及生理功能的影响[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2): 102-106.

[37] Lichtenthaler H K. Application of chlorophyll fluorescence in research stress physiology, hydrobiology and remote sensing [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991. 253-258.

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过 8000 字(含图、表、中英文摘要及参考文献) . 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示) . 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjxx.ac.cn) 进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据) 和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可) 和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI) . 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克) , m(米) , h(小时) 等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1. 1, 1. 1. 1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1) , (2) ……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者(外文也要姓列名前) . 论文名[J] . 期刊名, 年, 卷(期) : 起页- 止页.
图书: 作者. 书名[M] . 出版地: 出版社, 年. 起页- 止页.
会议文集: 作者. 论文名[A] . 见(In) : 编者. 文集名[C] . 出版地: 出版社(单位) , 年. 起页- 止页.
学位论文: 作者. 论文名[D] . 保存地: 保存单位, 年份.
报告: 作者. 论文名[R] . 出版地: 出版单位, 出版年.
专利: 专利所有者. 专利题名[P] . 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问. 对未刊稿件一般不退, 请作者自留底稿.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010- 62941102, 010- 62849343; 传真: 010- 62849343; E-mail: hjxx@rcees.ac.cn; 网址: www.hjxx.ac.cn