

文章编号: 1674-7054(2019)04-0324-07

增强 UV-B 辐射对芒果叶片光合组织结构的损伤

岳堃, 王红, 郭钰柬, 周开兵

(海南大学 热带作物新品种选育教育部工程研究中心, 海口 570228)

摘要: 为了研究增强 UV-B 辐射对芒果叶片光合作用影响的叶片组织形态学机理, 笔者以生长健壮的‘台农一号’芒果树为材料, 采用低剂量 ($24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 和高剂量 ($96 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) 的 UV-B 紫外灯在田间模拟增强 UV-B 辐射处理, 观测了树体产量和果实主要品质、叶片光合生理指标和叶片组织结构的变化。结果表明: 高剂量处理引起树体产量显著降低, 果实品质显著下降; 低剂量处理则对树体产量和果实品质无显著影响。高剂量处理使叶片净光合速率、蒸腾速率和气孔导度均降低, 低剂量处理与对照在这些观测指标上则差异不显著。高剂量处理导致叶片栅栏组织细胞碎裂成小细胞而与海绵组织细胞混杂, 海绵组织细胞变大和细胞间隙变宽; 低剂量处理导致叶片栅栏组织细胞变短变粗, 但仍保持其结构完整。与对照相比, 高剂量处理导致其叶片表面角质层增厚明显, 低剂量处理则增厚不显著。可见, 高剂量处理通过破坏叶肉光合组织结构而抑制叶片光合作用, 通过加厚叶片表面角质层而阻碍叶片吸收二氧化碳和抑制蒸腾作用, 进而引起树体减产和果实品质变劣; 低剂量处理则对叶片显微结构有一定影响, 但未破坏其基本结构, 对光合作用无显著影响, 所以其对树体产量和果实品质无显著影响。

关键词: 增强 UV-B 辐射; 芒果; 光合作用; 显微结构

中图分类号: S 667.7; Q 945.78

文献标志码: A

DOI: 10.15886/j.cnki.rdsxb.2019.04.004

紫外辐射 (UV) 划分为 A 区 (320 ~ 400 nm)、B 区 (280 ~ 320 nm) 和 C 区 (200 ~ 280 nm), 太阳辐射中的 UV-B 常少量穿透臭氧层而绝大部分被吸收。随着工业废气和汽车尾气等大气污染物排放量日益增加, 使大气臭氧层衰减, 引起到达地球表面太阳辐射中的 UV-B 辐射增加, 此时的 UV-B 辐射称为“增强 UV-B 辐射”(或称 UV-B 辐射增强, enhanced UV-B radiation)^[1-2]。增强 UV-B 辐射是环境保护的热点问题, 其对植物生长发育的生物效应和对光合作用的影响问题也倍受关注^[3-4]。近年来, 本课题组就增强 UV-B 辐射对芒果叶片的损伤和光合作用的影响等问题开展了研究。结果表明, 高剂量增强 UV-B 辐射处理会使成年芒果树受到损伤, 叶片光合作用受到抑制, 诱导激活抗氧化生理生化机制和启动耗散 UV-B 辐射胁迫机制, 从而减轻活性氧损伤, 引起株产和果实品质下降, 并且对树体的损伤和光合作用的抑制具有增强 UV-B 辐射处理的剂量效应和积累效应^[5-10]。然而, 关于增强 UV-B 辐射抑制芒果 (*Mangifera indica* L.) 叶片光合作用的组织形态学机制目前尚未见报道, 笔者就此问题进行研究, 旨在补充芒果叶片对增强 UV-B 辐射胁迫效应的微观变化, 为制定芒果树抗增强 UV-B 辐射栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料 试验芒果园位于海南省陵水县英州镇军田村 (东经 $109^{\circ}86'$, 北纬 $18^{\circ}43'$), 属热带海洋性季风气候, 全年高温多雨, 年均气温超过 20°C , 因位于信风带的迎风坡, 雨量充沛, 年均降水量 $1\,500 \sim 2\,000 \text{ mm}$, 平均相对湿度为 80%; 土壤为砂壤土, 建园时经增施有机肥改良土壤而达到壤土质地。

收稿日期: 2019-04-05

修回日期: 2019-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31460498)

作者简介: 岳堃 (1990-), 男, 海南大学热带农林学院 2016 级硕士研究生. E-mail: 332561533@qq.com

通信作者: 周开兵 (1969-), 男, 教授, 博士生导师. 研究方向: 果树栽培生理. E-mail: kaibingzhou0528@163.com

常规管理。在园区内选择树龄为 10 a, 生长健壮、长势均匀、无任何不良表现的盛果期‘台农一号’芒果 (*Mangifera indica* L. ‘Tainong No. 1’) 嫁接树(昌江土芒作砧木)集中的园片作为试验样地。12 月份为抽蕾期, 1~2 月份为开花坐果期, 3~4 月份为果实迅速膨大期, 5 月份为果实成熟期。

1.2 试验设计 采用 $24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ($40 \text{ W} \times 1$ 盏) 和 $96 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ($40 \text{ W} \times 4$ 盏) UV-B 灯管分别为低、高剂量人工模拟增强 UV-B 辐射处理的光源, 以自然光照射为对照, 单株小区, 3 次重复。在试验园区增强 UV-B 辐射处理样树和对照样树搭设铝合金棚架并悬挂灯架, 灯架位于芒果树正上方。处理样树灯架内装 40 W UV-B 灯管(购于北京电光源研究所, 波长峰值为 308 nm) 作为辐射光源, 灯管外包裹醋酸纤维素膜过滤 280 nm 以下波段; 对照样树灯架内不装灯管, 使每棵试验样树都具有相同的灯管阴影。从 2017-08-30 开始进行人工模拟增强 UV-B 辐射处理, 至 2018-05-08 结束, 每日均按日出和日落的时间分别开灯和关灯, 如白天遇阴雨天则关灯停止处理。

1.3 采样及样品处理 从 2017-09-16 增强 UV-B 辐射处理开始至 2017-12-31, 每隔 30 d 采样 1 次。从 2018-01-15 进入开花期至 2018-05-08 果实采收为止, 每隔 15 d 采样 1 次。选取 UV-B 灯管下第 2 蓬梢中部叶片为样品, 每次采样前, 于上午 9:00~10:00 在树上完成其光合指标的测定, 摘下叶片样品后立即用剪刀剪成小块, 然后用卡洛氏固定液固定, 带回实验室转移保存于永久固定液用于叶片组织结构的显微观察^[20]。2018-05-08 采收果实并带回实验室, 在常温下后熟, 7 d 后做果实品质的测定。

1.4 测定指标与方法 叶片净光合速率、气孔导度和蒸腾速率采用 Yaxin-1101 光合作用测定仪测定。对经永久固定液处理的测样采用徒手切片法制备临时切片, 置于光学显微镜下放大 400 倍观察叶片叶肉组织形态结构变化; 从不同处理组内抽取切片样品, 每个样品同一视野内随机选取 5 个不同位置测量叶表面角质层厚度。另取处理后叶片, 采用印迹法^[11], 在每个处理和对照随机抽取 5 个不同位置, 统计视野内气孔数量并测量气孔的长度和宽度。

1.5 数据统计分析 试验数据采用 SAS 9.1.3 进行统计, 采用 ANOVA 过程进行方差分析, 采用 DUNCAN 法作多重比较分析。

2 结果与分析

2.1 增强 UV-B 辐射处理对树体产量和果实品质的影响 从表 1 可知, 高剂量处理的果实可滴定酸含量显著高于对照和低剂量处理, 高剂量处理的株产、可溶性糖含量、糖酸比和维生素 C 含量等均显著低于对照和低剂量处理, 低剂量处理的株产和果实品质各指标均与对照差异不显著。说明高剂量增强 UV-B 辐射引起芒果减产和果实品质变劣, 导致芒果树栽培经济表现不良, 并且对芒果株产和果实品质的影响表现出剂量效应。

表 1 增强 UV-B 辐射对芒果树株产和果实品质的影响

Tab. 1 Effects of enhanced UV-B radiation on yield per tree and qualities of mango fruits

处理 Treatment	可溶性糖含量/% Soluble sugar content	可滴定酸含量/% Titratable acids content	糖酸比 Sugar/acid ratio	维生素 C 质量含量(FW) / ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) Vc content	株产/kg Yield per tree
CK	$21.51 \pm 0.47\text{a}$	$0.217 \pm 0.01\text{a}$	$99.33 \pm 3.29\text{a}$	$0.50 \pm 0.05\text{a}$	$26.2 \pm 1.35\text{a}$
$24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	$20.27 \pm 0.72\text{a}$	$0.223 \pm 0.01\text{a}$	$90.72 \pm 1.32\text{a}$	$0.46 \pm 0.05\text{a}$	$31.42 \pm 2.23\text{a}$
$96 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	$15.09 \pm 0.69\text{b}$	$0.353 \pm 0.01\text{b}$	$42.8 \pm 3.11\text{b}$	$0.34 \pm 0.05\text{b}$	$17.32 \pm 1.65\text{b}$

注: 表中数据为 3 次重复的平均值 $\pm$ 标准差, 同列数据后不同字母表示达显著差异 ($P < 0.05$), 下同

Note: The data in the table is the mean $\pm$ standard deviation of 3 replicates, and different letters after the data in the same column indicate a significant difference ($P < 0.05$), Similarly hereinafter

2.2 增强 UV-B 辐射处理对叶片光合作用的影响

2.2.1 对叶片净光合速率 (P_n) 的影响 由图 1 可见, 不同剂量的增强 UV-B 辐射处理改变了 P_n 的动态变化趋势, 并在同期对叶片 P_n 具有显著影响。高剂量处理自 2017-09-16—2017-12-09 与对照差异

不显著,自 2017-12-31—2018-05-08 显著低于对照;低剂量处理自 2017-10-14—2017-11-10 显著低于对照,自 2018-01-29—2018-02-12 显著高于对照,在其余时间则与对照无显著差异。说明高剂量处理呈现使叶片 P_n 显著降低的趋势,而低剂量处理除初期短暂引起叶片 P_n 显著下降外,在其余时间影响不明显, P_n 甚至上升。可见,高剂量处理明显抑制了叶片光合作用,并具有处理时间的累积效应;而低剂量处理则无明显影响,甚至在中期促进了叶片光合作用;同时也说明,高剂量增强 UV-B 辐射可能通过降低 P_n 而引起减产和果实综合品质变劣。

2.2.2 对叶片蒸腾速率(T_r)的影响 由图 2 可见,不同剂量的增强 UV-B 辐射处理改变了叶片 T_r 的动态变化趋势,并在同期对叶片 T_r 具有显著影响。高剂量处理在 2017-09-16—2017-12-09 使 T_r 高于对照,自 2017-12-31—2018-05-08 使叶片 T_r 显著低于对照;低剂量处理自 2017-09-16—2017-11-10 和在 2018-01-15 显著低于对照,在 2017-12-09 和 2018-01-29 显著高于对照,在其余时间均与对照差异不显著。可见,高剂量增强 UV-B 辐射处理明显抑制叶片的蒸腾作用,并具有处理时间的累积效应;低剂量处理前期表现出对叶片蒸腾的促进作用,而后期无显著影响。说明高剂量增强 UV-B 辐射成为胁迫因子,可能诱导叶片通过减弱蒸腾作用而尽可能减少水分散失,进而度过增强 UV-B 辐射胁迫逆境;同时也说明,高剂量增强 UV-B 辐射可能通过影响树体对水分的利用而减弱光合作用。

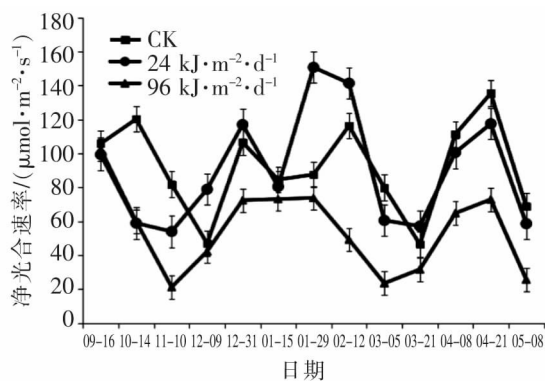


图 1 不同剂量的增强 UV-B 辐射对叶片净光合速率的影响
Fig.1 The effects of the enhanced UV-B radiation at different dosages, on the net photosynthetic rate in leaves

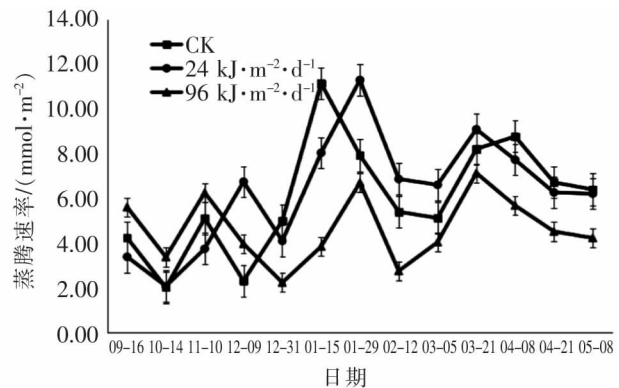


图 2 不同剂量的增强 UV-B 辐射对叶片蒸腾速率的影响
Fig.2 The effects of the enhanced UV-B radiation at different dosages, on the transpiration rate in leaves

2.2.3 对叶片气孔导度(G_s)的影响 由图 3 可见,不同剂量的增强 UV-B 辐射处理改变了叶片 G_s 的动态变化趋势,并在同期对叶片 G_s 具有显著影响。高剂量处理在 2017-09-16—2017-11-10 显著高于对照,2018-01-15—2018-05-08 显著低于对照,其余时间与对照差异不显著;低剂量处理在 2017-11-10 低于对照,2017-12-09 显著高于对照,其余时间与对照差异不显著。说明高剂量处理在试验初期促进气孔开放,到开花期明显抑制气孔开放,表现出先扬后抑的变化趋势,而低剂量处理则基本对叶片 G_s 无明显影响。可见,在实验前期,高剂量增强 UV-B 辐射

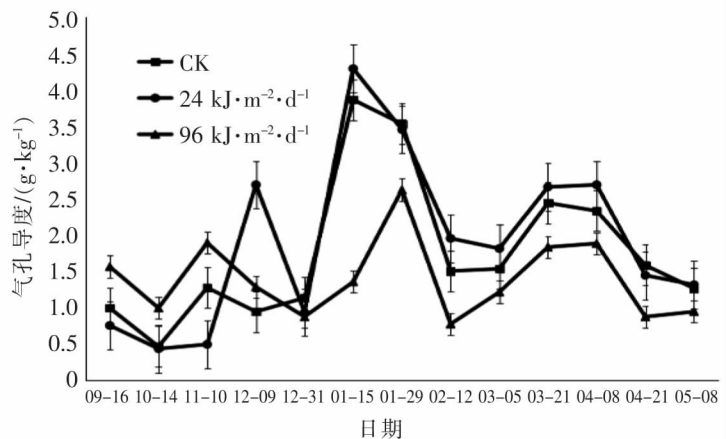


图 3 不同剂量的增强 UV-B 辐射对叶片气孔导度的影响
Fig.3 The effects of the enhanced UV-B radiation of different dosages on the stomatal conductance in leaves

可能尚未引起叶片损伤,反而刺激叶片气孔导度升高,与上述前期 T_r 高于对照的结果一致;开花期则使气孔导度显著降低,进而如上述结果抑制了叶片光合作用,这有可能对坐果产生不良影响,从而引起减产。

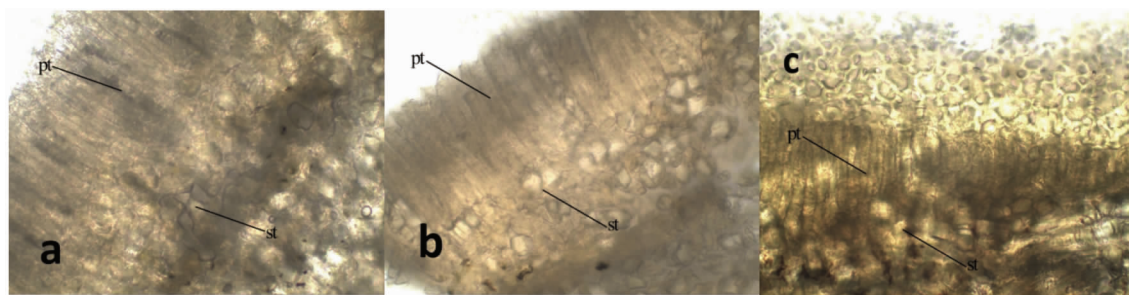


图4 2017年12月不同处理组叶片的显微结构(×400)

(1) pt-栅栏组织, st-海绵组织; (2) 图 a 为对照组芒果叶片, 图 b 为 $24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理组芒果叶片, 图 c 为 $96 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 处理组芒果叶片, 下同

Fig. 4 The microstructures of mango leaves in different treatment groups in December 2017(×400)

(1) pt-palisade tissue; st-spongy tissue; (2) Figure a is a mango leaf in the control group; Figure b is a mango leaf in the $24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ treatment group, and figure c is a mango leaf in the $96 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ treatment group. Similarly hereinafter

2.3 增强 UV-B 辐射处理对叶片光学显微结构的影响

2.3.1 对叶肉海绵组织和栅栏组织的影响 由图4可见, 不同剂量的增强 UV-B 辐射处理对叶肉光学显微形态结构具有显著影响。在初期, 尽管高剂量处理的叶片栅栏组织出现轻微的损伤, 部分位置细胞出现断裂, 但2个处理和对照的叶片结构均清晰完整, 叶片表皮由单层栅栏组织细胞和海绵组织细胞构成, 海绵组织和栅栏组织分界明显, 海绵组织无明显损伤。

由图5可见, 低剂量处理的叶片栅栏组织出现轻微损伤, 长条状的栅栏组织细胞变短, 但未出现断裂的情况, 海绵组织细胞变大, 整体仍保持叶片结构完整; 高剂量处理的叶片栅栏组织细胞断裂略微加重, 断裂的细胞穿插进入海绵组织细胞, 海绵组织细胞变大, 叶片结构与图4相比受损加重, 完整性受到轻微破坏, 但海绵组织和栅栏组织分界较明显。

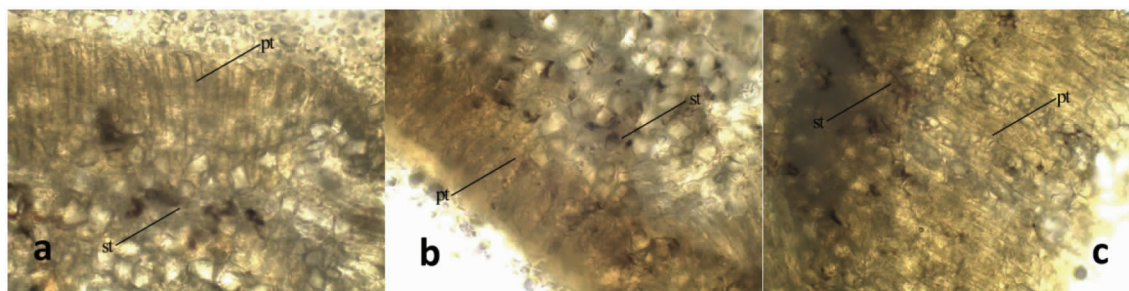


图5 2018年2月不同处理组叶片的显微结构(×400)

Fig. 5 The leaf microstructure in different treatment groups in February 2018(×400)

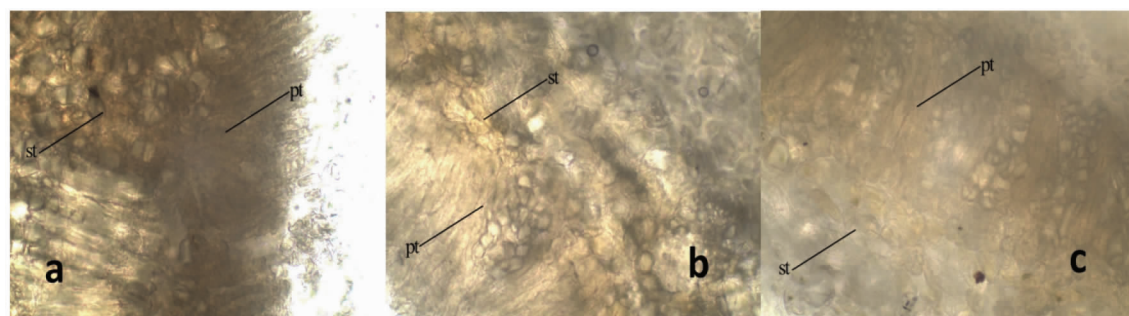


图6 2018年2月不同处理组叶片的显微结构(×400)

Fig. 6 The leaf microstructure of mango in different treatment groups in February 2018(×400)

由图 6 可见,对照的叶片结构清晰完整;低剂量处理的叶片栅栏组织细胞进一步缩短,但仍未出现明显的细胞断裂现象,海绵组织也未受到进一步的破坏;高剂量处理的叶片结构受损严重,栅栏组织细胞出现明显断裂,仅有少数能保持完整细胞形态,海绵组织细胞膨大,结构松散,断裂的栅栏组织细胞与海绵组织细胞互相交错,使海绵组织和栅栏组织无明显分界。

综合分析可知,对照的叶片在成熟衰老时海绵组织细胞变大,但仍保持清晰完整的叶片结构,而不同剂量的增强 UV-B 辐射处理的叶片在经过一段时间处理后结构出现了不同程度的损伤。低剂量处理的叶片出现损伤较晚,损伤程度也比较轻微;对叶片结构的影响更多体现在栅栏组织上,使栅栏组织细胞变短变粗;海绵组织与对照组相比,未出现明显损伤,能清晰分辨出海绵组织和栅栏组织。高剂量处理的叶片在初期便表现出损伤状态,但仅表现在使部分栅栏组织细胞断裂,海绵组织无明显损伤,两者分界明显;后期则使栅栏组织大部分细胞出现断裂,与海绵组织的细胞穿插,没有清晰的分界,海绵组织细胞变大,间隙变宽。说明增强 UV-B 辐射通过破坏叶片组织结构从而抑制光合作用,并表现出增强 UV-B 辐射处理的剂量效应和积累效应。

2.3.2 对叶片表面角质层的影响 增强 UV-B

辐射处理对角质层形态的影响因其剂量不同而异(图 7, 8)。不同处理和对照在同期间比较,对照、低剂量处理和高剂量处理等的叶片表面角质层依次明显变厚;各处理和对照分别在不同时期比较,对照和低剂量处理具有随处理时间延续的积累效应,而高剂量处理则变化不大。可见,不同处理可通过诱导叶片表面角质层厚度增加而弱化穿透进果肉的 UV-B 辐射强度,进而增强叶片对 UV-B 的抗逆性;高剂量处理又因诱导叶片角质层厚度过度增加,而降低了叶片气孔导度和减弱叶片蒸腾作用,进而引起光合速率降低。

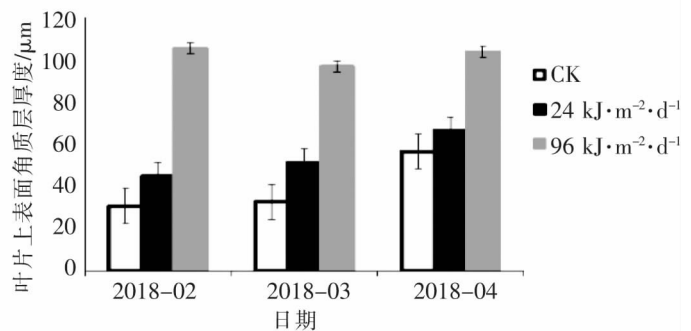


图 7 不同处理对叶片表面角质层厚度的影响
Fig.7 The effects of the different treatments on the cuticle layer in leaves

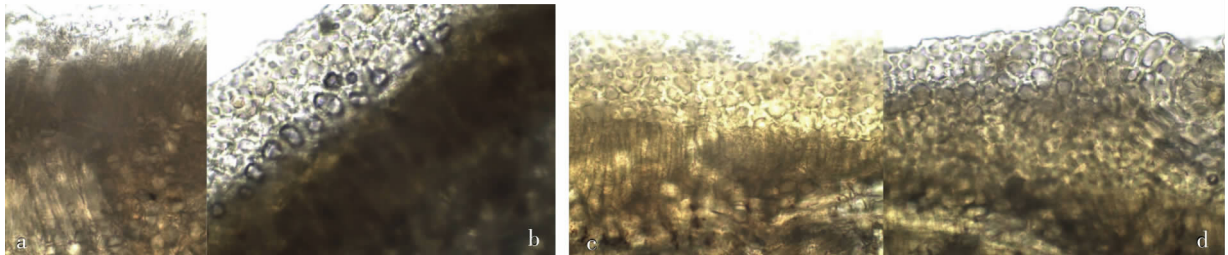


图 8 不同处理组的叶片表面角质层(×400)

a: 对照组叶片(2017 年 12 月); b: 24 kJ·m⁻²·d⁻¹ 处理组叶片(2017 年 12 月); c: 96 kJ·m⁻²·d⁻¹ 处理组叶片(2017 年 12 月); d: 96 kJ·m⁻²·d⁻¹ 处理组叶片(2018 年 4 月)

Fig. 8 The leaf surface cuticles in different treatment groups (×400)

a is the leaf of the control group in December 2017; b is the leaf of mango treated with 24 kJ·m⁻²·d⁻¹ in December 2017; c is a mango leaf in the 96 kJ·m⁻²·d⁻¹ treatment group in December 2017, d is a mango leaf treated with 96 kJ·m⁻²·d⁻¹ in April 2018

2.4 增强 UV-B 辐射处理对叶片气孔的影响 由表 2 可见,与对照相比,低剂量处理使叶片单位面积内气孔数量上升、气孔大小减小和气孔开度降低;高剂量处理使叶片气孔大小变化不显著,但数量明显增多和开度更加降低;高剂量处理的气孔开度比低剂量处理显著降低。说明增强 UV-B 辐射会抑制气孔开度,高剂量处理通过极显著抑制气孔开度而导致 Gs 下降,进而导致 Pn 和 Tr 降低;同时可能诱导叶片通过增加单位面积内气孔数量而尽可能减轻其光合作用损伤。

表2 增强 UV-B 辐射对芒果叶片表面气孔的影响
Tab. 2 Effect of enhanced UV-B radiation on surface stomata of mango leaves

处理 Treatment	气孔长度 Stoma length / μm	气孔宽度 Stomata width / μm	数量 Quantity
CK	$7.34 \pm 0.02\text{a}$	$1.97 \pm 0.02\text{a}$	$9.8 \pm 0.5\text{a}$
$24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	$6.80 \pm 0.06\text{a}$	$1.38 \pm 0.01\text{b}$	$13.2 \pm 1.7\text{b}$
$96 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$	$7.63 \pm 0.06\text{a}$	$0.96 \pm 0.01\text{c}$	$14.0 \pm 2.5\text{b}$

3 讨 论

叶片是对环境胁迫最敏感的植物器官,因此,叶片往往能直接反映外界环境对植物产生的影响^[4]。有研究证明,增强 UV-B 辐射对植物叶片有影响,低强度的 UV-B 辐射增强对植物叶面积的生长有一定促进作用^[15],并使其形态特征表现为可能倾向于减少辐射的影响,当辐射超过一定的阈值会使叶片厚度减小,损伤增加^[12-13];高强度 UV-B 辐射可使植物叶面积减小,减小光接受面积,降低有害的 UV-B 辐射进入叶片组织,叶片栅栏组织厚度变薄和叶片收缩卷曲^[4,14-19]。前人的这些研究结果均是以草本植物为试材取得的,本研究在木本的成年芒果树叶片表面角质层变化上取得了与此不一致的结果,说明木本植物可能与草本植具有不一样的保护机制。也或许可以证实增强 UV-B 辐射通过诱导木本植物叶片表面角质层厚度增加而减弱进入到叶肉组织中的增强 UV-B 辐射强度,进而尽可能减轻增强 UV-B 辐射对木本植物叶肉组织的损伤,并最终通过对叶片光合作用产生尽可能轻的损伤而换取植株的生存。

本研究的光学显微形态观察结果表明,高剂量增强 UV-B 辐射通过减小气孔宽度和破坏叶肉组织而抑制光合作用和蒸腾作用,同时,通过增加气孔数量而尽可能对光合作用和蒸腾作用提供保护,因而,当高剂量增强 UV-B 辐射前者的破坏超出后者的保护时,引起光合作用的损伤,并表现出时间上的积累效应。这与前人在草本植物蚕豆^[21-22]上的研究结果基本一致,说明增强 UV-B 辐射抑制木本植物芒果叶片光合作用的叶肉组织形态学变化机制也是相似的。

参考文献:

[1] COLDWELL M M, FLINT S D. Stratospheric ozone reduction, solar UV-B radiation and terrestrial ecosystem [J]. Climate Change, 1994, 27(2) : 375 - 394.

[2] 刘鹏,徐迟默,罗微,等. 增强 UV-B 辐射对芒果离体叶片染色体的损伤 [J]. 植物生理学报,2012,48(2) : 161 - 165.

[3] KATARIA S, JAJOO A, GURUPRASAD K N. Impact of increasing ultraviolet-B (UV-B) radiation on photosynthetic processes [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology, Biology, 2014, 137: 55 - 66.

[4] FENG H Y, AN L Z, TAN L L, et al. Effect of enhanced ultraviolet-B radiation on pollen germination and tube growth of 19 taxa in vitro [J]. Environmental and Experimental Botany, 2000, 43: 45 - 53.

[5] 刘鹏,周开兵,王爽,等. 芒果不同叶龄叶片在增强 UV-B 辐射处理下的损伤和保护响应 [J]. 热带生物学报,2010,1(4) : 350 - 356.

[6] 刘鹏,周开兵,丁姗,等. UV-B 辐射下离体芒果成年叶抗氧化响应 [J]. 山地农业生物学报,2010,29(5) : 397 - 402.

[7] 周开兵,李世军,袁孟玲. 增强 UV-B 辐射对芒果株产和果实品质及光合作用的影响 [J]. 热带作物学报,2018,39(6) : 1102 - 1107.

[8] 李世军,王茗,袁孟玲,等. ‘台农一号’芒果果实体积的非离体测定及果实体积与风味品质的关系 [J]. 热带生物学报,2016,7(4) : 444 - 449.

[9] 袁孟玲,岳堃,王红,等. ‘台农一号’芒果成年树在增强 UV-B 辐射处理下的损伤及其抗氧化响应 [J]. 热带作物学报,2018,39(9) : 1724 - 1731.

[10] 袁孟玲,岳堃,王红,等. 增强 UV-B 辐射对芒果成年树光合作用及其产量与常规品质的影响 [J]. 南方农业学报,2018,49(5) 930 - 937.

[11] 胡文新,彭少兵,高荣孚,等. 国际水稻研究所新株型水稻的气孔特性 [J]. 中国农业科学,2002(10) : 1286 - 1290.

[12] 王进,张静,杨景辉,等. UV-B 辐射增强对棉花叶片显微结构的影响 [J]. 新疆农业科学,2010,47(8) : 1619 - 1626.

[13] 祭美菊,冯虎元,安黎哲,等. 增强的 UV-B 辐射对植物影响的研究 [J]. 应用生态学报,2002(3) : 359 - 364.

[14] LIU Qing, YAO Xiaoqin, ZHAO Chunzhang, et al. Effects of enhanced UV-B radiation on growth and photosynthetic respon-

- ses of four species of seedling in subalpine forests of the eastern Tibet plateau [J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 74: 151 – 156.
- [15] 何承刚, 綦世飞, 邵建平, 等. 增强 UV-B 辐射对两个烤烟品种生长和叶片解剖结构的影响 [J]. 中国烟草学报, 2012, 18 (5): 34 – 38.
- [16] SURABHI G, REDDY K R, SINGH S K. Photosynthesis, fluorescence, shoot biomass and seed weight responses of three cowpea (*Vigna unguiculata* L. walp.) cultivars with contrasting sensitivity to UV-B radiation [J]. Environmental and Experimental Botany, 2009, 66(2): 160 – 171.
- [17] 高天鹏, 安黎哲, 冯虎元. 增强 UV-B 辐射和干旱对不同品种春小麦生长、产量和生物量的影响 [J]. 中国农业科学, 2009, 42(6): 1933 – 1940.
- [18] 包龙丽, 何永美, 祖艳群, 等. 大田条件下增强 UV-B 辐射对元阳梯田 2 个地方水稻品种叶片形态解剖结构的影响 [J]. 生态学杂志, 2013, 32(4): 882 – 889.
- [19] KAKANI V G, REDDY K R, ZHAO D, et al. Effects of ultraviolet-B radiation on cotton (*Gossypium hirsutum* L.) morphology and anatomy [J]. Annals of Botany, 2003, 91(7): 817 – 826.
- [20] 戴素英. 大白菜叶片染色制片技术 [J]. 河北农业科学, 1991(1): 20 – 21.
- [21] 李惠民, 胡洁, 贺军民. 磷脂酰肌醇 3 - 磷酸对 UV-B 诱导蚕豆保卫细胞中过氧化氢产生和气孔关闭的影响 [J]. 中国农业科学, 2013, 46(20): 4246 – 4253.
- [22] HE J M, XU H, SHE X P, et al. The role and the interrelationship of hydrogen peroxide and nitric oxide in the UV-B-induced stomatal closure in broad bean [J]. Functional Plant Biology, 2005, 32: 237 – 247.

Damages to the Photosynthetic Tissue Structure of Mango Leaves by Enhanced UV-B Radiation

YUE Kun, WANG Hong, GUO Yujian, ZHOU Kaibing

(Ministry of Education Engineering Research Center for Breeding and Selection of Tropical Crops, Hainan University, Haikou, Hainan 570228, China)

Abstract: In order to study the mechanism of the change of tissue morphology in the effect of enhanced UV-B radiation on photosynthesis of mango leaves, robust mango trees of “Tainong No. 1” were treated with UV-B UV lamp at the doses of $24 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (low dose) and the $96 \text{ kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ (high dose) to simulate enhanced UV-B radiation in the field. The changes of tree yield and main fruit quality, leaf photosynthetic physiological indexes and leaf microstructure were observed. The results showed that the high-dose treatment resulted in a significant decrease in tree yield and a significant decrease in fruit quality. Low-dose treatment had no significant effect on tree yield and fruit quality. The high-dose treatment reduced the net photosynthetic rate, transpiration rate and stomatal conductance of the leaves, and the difference between the low-dose treatment and the control was not significant. The high-dose treatment resulted in fragmentation of leaf palisade tissue cells into small cells which were mixed with sponge tissue cells. The sponge tissue cells became larger and the cell gap became wider. The low-dose treatment resulted in production of shorter and thicker palisade cells but with structural integrity. The high-dose treatment resulted in significant thickening of the cuticle on the surface of the leaves compared to the control, while cuticle thickening in the low-dose treatment was not significant. It can be seen that high-dose treatment inhibits leaf photosynthesis by destroying the photosynthetic structure of mesophyll, and hinders the absorption of carbon dioxide and transpiration by thickening the surface of the leaf surface, thereby causing the trees to reduce yield and the quality of the fruit; The low-dose treatment had a certain influence on the leaf microstructure, the basic structure of which was not destroyed, and had no significant effect on photosynthesis. Therefore, the low dose treatment had no significant effect on tree yield and fruit quality.

Keywords: Enhanced UV-B radiation; mango; photosynthesis; microstructure

(责任编辑: 潘学峰)