

双酚 A 对番茄和生菜幼苗叶绿素荧光参数的影响

李 曼, 王丽红, 周 青*

(江南大学环境与土木工程学院, 江苏 无锡 214122)

摘 要:利用叶绿素荧光测定技术,研究了 BPA 对番茄和生菜幼苗叶绿素荧光反应的影响。结果表明,1.5 mg·L⁻¹ 和 3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理降低番茄和生菜初始荧光(F_0),增加最大光化学量子产量(F_v/F_m)、实际光化学量子产量(Φ_{PSII})、表观电子传递速率(ETR)、光化学猝灭(qP)和非光化学猝灭(qN);BPA 作用解除后,各指标均有所恢复,即 1.5 mg·L⁻¹ 和 3.0 mg·L⁻¹ BPA 可通过增加光能的吸收、改善 PS II 系统、提高电子传递和光能转化效率、释放过量能量来增强光合作用,该作用随 BPA 解除而恢复。6.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的番茄幼苗各荧光参数无显著变化,生菜幼苗 F_0 和 qN 显著升高,可恢复到对照水平,表明 6.0 mg·L⁻¹ BPA 已使生菜幼苗发生光抑制,BPA 解除后可恢复至正常水平。除 10 mg·L⁻¹ BPA 增加番茄 qN 外,10 mg·L⁻¹ 和 17.2 mg·L⁻¹ BPA 增加 2 种作物 F_0 而抑制其他各荧光参数,恢复期时各荧光参数向对照组靠近,即高剂量 BPA 引起作物光抑制、PS II 中心受损、光能转化和电子传递效率降低。BPA 解除后各项指标可恢复,但恢复程度随 BPA 处理剂量增加而降低。对比 2 种作物荧光参数变幅可知,BPA 对生菜各荧光参数影响大于番茄,恢复期番茄幼苗各荧光参数恢复程度大于生菜。总之,BPA 对 2 种作物叶绿素荧光反应的影响方式和影响效果上存在差异,且 BPA 作用解除后,叶绿素荧光反应有不同程度恢复,仅 6.0 mg·L⁻¹ BPA 作用解除后能恢复至对照水平。

关键词:双酚 A; 番茄; 生菜; 叶绿素荧光

中图分类号:X503.231

文献标志码:A

文章编号:1672-2043(2014)06-1089-06

doi:10.11654/jaes.2014.06.005

Effects of Bisphenol A on Chlorophyll Fluorescence Parameters in Tomato and Lettuce

LI Man, WANG Li-hong, ZHOU Qing*

(School of Environmental and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: Bisphenol A (BPA), an endocrine disruptor, has showed obvious toxic effects on life system. However, little information is available regarding the toxic effects of BPA on crops. A hydroponic experiment was carried out to investigate the effects of BPA on chlorophyll fluorescence in tomato (*Solanum lycopersicum*) and lettuce (*Lactuca sativa*) seedlings. Treatments with 1.5 mg·L⁻¹ and 3.0 mg·L⁻¹ BPA decreased the F_0 , but increased the F_v/F_m , Φ_{PSII} , ETR , qP and qN in tomato and lettuce seedlings. Supplying 6.0 mg·L⁻¹ BPA did not change the fluorescence parameters in tomato seedlings, whereas it increased the F_0 and qN in lettuce seedlings. At 10 mg·L⁻¹ and 17.2 mg·L⁻¹ BPA, the F_0 was increased, but other fluorescence parameters were inhibited in tomato and lettuce seedlings, except increased qN in tomato seedlings at 10 mg·L⁻¹ BPA. All fluorescence parameters could be restored when BPA was removed. However, the recovery decreased with increasing concentrations of BPA. Greater effects on the fluorescence parameters were observed in lettuce than in tomato seedlings, while the recovery was faster in tomato seedlings than lettuce seedlings. In conclusion, the effects of BPA on the chlorophyll fluorescence parameters are different in different crops. Chlorophyll fluorescence could resume to various degrees when BPA stress is removed.

Keywords: bisphenol A; *Lycopersicon esculentum*; *Lactuca sativa*; chlorophyll fluorescence

双酚 A (BPA, 4,4-二羟基二苯丙烷)既是一种代表性的环境内分泌干扰物^[1],也是一种重要的有机化工原料,主要用于生产高分子材料(如不饱和聚酯树

脂)、增塑剂、阻燃剂、磁盘、涂料和农药等^[2]。据估计,2003 年全球 BPA 产量为 320.0 万 t^[3],2012 年达 370 万 t,年增长速率为 6%~10%^[4]。2008 年我国 BPA 的消费量高达 49.1 万 t^[5],由于大规模生产及广泛使用,BPA 在环境中无处不在,如垃圾渗滤液里 BPA 浓度高达 17.2 mg·L⁻¹^[6],农业土壤环境不可避免受其污染,BPA 的生态安全问题已引起关注^[7]。

Terouchi 等^[8]研究发现,BPA 为 0.1 μg·mL⁻¹ 时可以促进大豆(*Glycine max*)根系生长,刺激胡萝卜(*Dau-*

收稿日期:2013-09-23

基金项目:江苏省普通高校研究生科研创新基金(CXLX13_749);科技部十二五水体污染与治理科技重大专项(2012ZX07101-013)

作者简介:李 曼(1988—),女,安徽安庆人,硕士研究生,研究方向为环境生态学。E-mail:liman_8@163.com

* 通信作者:周 青 E-mail:zhouqwx@yahoo.com

cus carota)幼芽的分化。Loffredo 等^[9]报道,46 mg·L⁻¹ BPA 使黑麦草根长下降 23.9%, 西伯利亚冰草根长下降 27.2%,4.6 mg·L⁻¹ BPA 使西葫芦鲜重增加 108.9%。Speranza 等^[10]研究发现,10.0 mg·L⁻¹ BPA 可显著提高猕猴桃花粉管类固醇激素水平,造成其体内荷尔蒙失衡,抑制其生长发育。本实验室的前期研究表明,1.5 mg·L⁻¹ BPA 可促进大豆幼苗根系和地上器官生长,17.2、50 mg·L⁻¹ BPA 则抑制大豆幼苗根系和地上器官生长,且大豆幼苗生长变化与地上器官光合作用和根系氮素营养有关^[11-14]。上述报道显示,与 BPA 的植物生长作用研究工作相比,BPA 影响植物生长的机理研究甚少。

光合作用是植物合成有机物和获得能量的根本源泉^[15]。原初反应(Primary reaction)是光合作用的第一步,是指光能被聚光色素分子吸收,并传递至光系统 II (PS II)反应中心,在 PS II 反应中心发生最初的光化学反应,使电荷分离从而将光能转换为电能的过程^[16]。绿色植物发射叶绿素荧光是光合反应活性的一个复杂方式^[17]。20 世纪 30 年代,Kautsky 和 Hirsh^[18]用肉眼观察并记录了叶绿素荧光现象,且认识到原初反应和叶绿素荧光存在密切关系。叶绿素荧光在植物光合作用研究中的应用已有 20~30 年的历史^[19],可作为实验过程中原位检测植物叶片 PS II 反应中心活性与功能的良好探针^[20],已在环境胁迫对植物光合作用影响研究方面得到广泛应用。Qiu 等^[21]从叶绿素荧光反应角度解释了 BPA 抑制大豆幼苗生长与其降低叶片光合作用相关。然而,有关 BPA 对蔬菜类农作物,尤其是对不同蔬菜农作物叶绿素荧光反应影响报道甚少。本实验研究了番茄(*Lycopersicum esculentum*)和生菜(*Lactuca sativa*)叶绿素荧光参数对 BPA 的响应,其结果将为研究 BPA 对其他蔬菜光合作用的影响,科学评价 BPA 农业环境生态风险,提供重要参考。

1 材料与方法

1.1 试材培养

番茄“中杂 9 号”种子,生菜“四月曼”种子播于营养钵中,蛭石作基质,于恒温培养箱(25±1)℃中萌发,待幼苗 2 周龄时挑选生长一致的植株洗净根部基质后,移入塑料钵(320 mm×215 mm×100 mm)中,去离子水装满培养,泡沫板(320 mm×215 mm×15 mm)固定,每钵 15 株,于恒温箱中培养,昼/夜温度为 30℃/25℃,光照强度为 300 μmol·m⁻²·s⁻¹,光暗比 10 h/14 h,每日补水 1 次,通气 2 次,每次 15 min。1 周后,改

用 1/2 Hoagland 营养液培养,3 d 换 1 次营养液,待苗龄为 5 周时,取出长势良好植株用于实验处理。

1.2 BPA 溶液配制与 BPA 处理

根据 BPA 环境污染现状以及 BPA 对植物作用的报道^[6],共选取 5 个 BPA 浓度(1.5、3.0、6.0、10.0、17.2 mg·L⁻¹)。于配好的 Hoagland 溶液(pH=7.0)中加入适量 BPA,配制成 50 mg·L⁻¹ BPA 母液,以 1/2 Hoagland 营养液作为稀释液,将 BPA 母液配制成梯度溶液分别为 1.5、3.0、6.0、10.0、17.2 mg·L⁻¹ 所需 BPA 溶液。

将用于实验处理的番茄和生菜根部直接浸入含上述浓度的 BPA 溶液中生长,持续 7 d,对照植株(CK)用未加 BPA 的等量营养液培养。各处理组分别记为:CK(0 mg·L⁻¹)、BPA₁(1.5 mg·L⁻¹)、BPA₂(3.0 mg·L⁻¹)、BPA₃(6.0 mg·L⁻¹)、BPA₄(10.0 mg·L⁻¹)、BPA₅(17.2 mg·L⁻¹)。每 3 d 换 1 次处理溶液,处理后第 8 d 测定各指标,此为胁迫期。第 8 d 改换营养液培养上述处理后的番茄和生菜根部,持续 7 d,每 3 d 换 1 次营养液,恢复后第 8 d 测定各指标,此为恢复期。

1.3 指标测定

采用 PAM-210 脉冲调制式荧光仪(德国 Walz 公司)测定番茄和生菜幼苗叶片活体荧光。测定前先将叶片暗适应 20 min,照射检测光(<0.05 μmol·m⁻²·s⁻¹)后测得初始荧光 F_0 ,照射饱和脉冲光(12 000 μmol·m⁻²·s⁻¹)后测得 F_m 和 F_v/F_m ,打开内源光化光(180 μmol·m⁻²·s⁻¹)后一次照射检测光合饱和脉冲光(1 个脉冲),每隔一定时间测定光适应下荧光参数及荧光猝灭曲线,待 Φ_{PSII} (作用光存在时 PS II 的原初光能捕获效率)稳定后关闭作用光,立即照射远红外光。光化学猝灭参数 qP 、非光化学猝灭参数 qN 、PS II 电子传递速率 ETR 由仪器自动计算给出。

1.4 数据处理

各处理组与对照组均设置 3 次重复,所有数据为 3 次独立试验平均值±标准误差(Mean±SE),运用 SPSS16.0 软件,通过 LSD 检验($P<0.05$)分析处理间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 胁迫期 BPA 对番茄幼苗荧光参数的影响

表 1 显示了胁迫期 BPA 对番茄幼苗叶片荧光参数的影响。与 CK 相比,1.5 mg·L⁻¹ BPA 处理时, F_0 显著降低, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、ETR、 qP 和 qN 均显著升高;3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理时, F_0 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、ETR、 qP 和 qN 变化规律与 1.5 mg·L⁻¹ BPA 处理相同,且变化幅度小于

1.5 mg·L⁻¹ BPA 处理;6.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 变化不显著;10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 和 qN 显著升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 qP 均显著降低;17.2 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 显著升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 均显著降低。

2.2 恢复期 BPA 对番茄幼苗荧光参数的影响

表 2 显示了恢复期 BPA 处理对番茄幼苗叶片荧光参数的影响。与 CK 相比,1.5 mg·L⁻¹ BPA 处理时, F_0 显著降低, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 qP 均显著升高, qN 变化不显著,表明番茄幼苗叶片 F_0 、 F_m 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 ETR 均有所恢复, qP 和 qN 恢复近 CK 水平;3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 明显降低, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 变化均不显著,表明 3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理对番茄幼苗叶片 F_0 仍有一定促进作用,但升幅较胁迫期有所下降;6.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 变化不显著,表明 6.0 mg·L⁻¹ BPA 处理组各荧光参数也有所恢复;10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 、 F_v/F_m 和 qN 变化不显著, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 qP 降幅低于

胁迫期,表明该处理组对荧光参数的抑制作用显著减小;17.2 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 显著升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 均显著降低,降幅低于胁迫期,且恢复程度小于 10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理组。

2.3 胁迫期 BPA 对生菜幼苗荧光参数的影响

表 3 显示了胁迫期 BPA 处理对生菜幼苗叶片荧光参数的影响。与 CK 相比,1.5 mg·L⁻¹ BPA 处理时, F_0 显著降低, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 均显著升高;3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 明显降低, F_v/F_m 变化不显著, Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 均显著升高;6.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 明显降低, qN 明显升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qP 变化不显著;10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 显著升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 均显著降低;17.2 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 变化规律与 10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理相同,但降低幅度大于 10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理。

2.4 BPA 对生菜幼苗恢复期荧光参数的影响

表 4 显示了 BPA 处理对生菜幼苗恢复期叶片荧

表 1 胁迫期 BPA 对番茄幼苗荧光参数的影响

Table 1 Chlorophyll fluorescence parameters of tomato seedlings under BPA stresses

BPA/mg·L ⁻¹	F_0	F_v/F_m	Φ_{PSII}	ETR	qP	qN
0	264.784±8.471c (100.00)	0.824±0.022b (100.00)	0.527±0.064b (100.00)	26.617±2.428b (100.00)	0.618±0.185c (100.00)	0.332±0.039b (100.00)
1.5	207.590±5.125e (78.40)	0.925±0.041a (112.32)	0.601±0.042a (114.18)	30.753±0.662a (115.54)	0.676±0.092a (109.47)	0.364±0.033a (109.81)
3.0	219.638±3.362d (82.95)	0.885±0.074a (107.52)	0.583±0.051a (110.66)	29.920±0.631a (112.41)	0.673±0.074ab (108.97)	0.350±0.074a (105.52)
6.0	276.169±4.107c (104.30)	0.824±0.012b (100.09)	0.547±0.016b (103.85)	27.407±1.366b (102.97)	0.644±0.036bc (104.33)	0.323±0.012b (97.50)
10.0	329.973±5.618b (124.62)	0.622±0.055c (75.47)	0.377±0.163c (71.72)	18.805±0.329c (70.65)	0.471±0.073d (76.26)	0.360±0.011a (108.55)
17.2	367.071±8.670a (138.63)	0.511±0.054d (62.13)	0.316±0.082d (60.05)	16.603±0.487d (62.38)	0.396±0.048e (64.09)	0.229±0.048c (69.27)

注:表中数据为平均值±标准误差(n=3);同列中无相同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著;括号内为相对值。下同。

表 2 恢复期 BPA 对番茄幼苗荧光参数的影响

Table 2 Chlorophyll fluorescence parameters of tomato seedlings after removal of BPA stresses

BPA/mg·L ⁻¹	F_0	F_v/F_m	Φ_{PSII}	ETR	qP	qN
0	271.900±3.031b (100.00)	0.829±0.034bc (100.00)	0.519±0.052b (100.00)	26.142±1.139b (100.00)	0.623±0.036b (100.00)	0.327±0.044ab (100.00)
1.5	244.791±4.185c (90.03)	0.879±0.017a (106.07)	0.566±0.047a (109.11)	28.398±0.481a (108.63)	0.654±0.181a (105.02)	0.361±0.282a (102.5)
3.0	254.824±1.277c (93.72)	0.856±0.019ab (103.24)	0.538±0.084b (103.76)	27.036±0.271b (103.42)	0.637±0.562ab (102.37)	0.336±0.066a (102.84)
6.0	272.906±1.480b (100.37)	0.819±0.026bc (98.91)	0.528±0.065b (101.82)	26.291±2.248b (100.57)	0.617±0.097b (99.07)	0.316±0.025b (96.71)
10.0	283.075±4.613b (104.11)	0.797±0.033c (96.18)	0.453±0.048c (87.33)	23.013±1.447c (88.03)	0.551±0.411c (88.59)	0.313±0.048b (96.02)
17.2	331.093±7.205a (121.77)	0.599±0.051d (72.35)	0.388±0.026d (74.80)	19.473±0.373d (74.49)	0.493±0.063d (79.29)	0.274±0.073c (84.07)

光参数的影响。CK 相比, 1.5 mg·L⁻¹ BPA 处理时 F_0 显著降低, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 均显著升高, qN 变化不显著, 表明该处理组恢复一段时间后促进作用显著减弱, 但未能接近 CK 水平; 3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 、 qN 变化均不显著, 表明 3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理组与胁迫期相比均有所恢复且接近 CK 水平; 6.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 变化不显著, 表明 6.0 mg·L⁻¹ BPA 处理组也均有所恢复; 10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 显著升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 均显著降低, 且均有所减少, 表明该处理组对荧光参数的抑制作用显著地减小, 但没同处理组番茄恢复程度好; 17.2 mg·L⁻¹ BPA 处理的 F_0 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 、 qN 均有所减少, 但恢复程度小于 10.0 mg·L⁻¹ BPA 处理组。

3 讨论

叶绿素荧光作为研究光合作用的探针, 不仅能反映光能吸收、激发能传递和光化学反应等原初反应过程, 而且与电子传递、质子梯度建立及 ATP 合成和

CO₂ 固定等过程有关, 因此被广泛应用在环境胁迫对植物光合作用影响的研究中^[22]。在叶绿素荧光参数中, 初始荧光 F_0 是 PS II 反应中心全部开放时的荧光, 它可以表示逆境对作物叶片 PS II 永久性伤害, 其值大小与叶片叶绿素浓度有关^[23]; F_v/F_m 为 PS II 最大光化学量子产量, 常用于度量植物叶片 PS II 原初光能转换效率和 PS II 潜在活性^[24]; Φ_{PSII} 表示实际光化学效率, 其值升高表明植株同化力 (NADPH 和 ATP) 形成被促进, 从而提高植物对碳的固定和同化^[25]; ETR 反映实际光强下的表观电子传递效率; qP 表示用于光化学反应的光能部分, 其值增大必然会使光合电子传递能力增强, 光合效率上升^[26]; qN 反映 PS II 反应中心吸收的光能不能用于光合电子传递而以热形式耗散掉的光能部分^[27]。

在胁迫期, 1.5 mg·L⁻¹ 和 3.0 mg·L⁻¹ BPA 处理的番茄和生菜幼苗 F_0 降低, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 升高, 表明 1.5 mg·L⁻¹ 和 3.0 mg·L⁻¹ BPA 能增强番茄和生菜 PS II 原初光能转化效率和 PS II 反应中心潜在活性, 把所捕获的光能充分高效地转化为植物所需要

表 3 胁迫期 BPA 对生菜幼苗荧光参数的影响

Table 3 Chlorophyll fluorescence parameters of lettuce seedlings under BPA stresses

BPA/mg·L ⁻¹	F_0	F_v/F_m	Φ_{PSII}	ETR	qP	qN
0	181.734±1.378d (100.00)	0.841±0.036b (100.00)	0.612±0.082c (100.00)	30.864±1.535c (100.00)	0.706±0.044c (100.00)	0.289±0.065b (100.00)
1.5	133.001±3.760f (73.48)	0.925±0.111a (116.54)	0.734±0.117a (120.03)	36.941±2.642a (119.69)	0.817±0.562a (115.81)	0.314±0.026a (108.15)
3.0	163.651±1.036e (90.05)	0.872±0.082b (103.80)	0.653±0.052b (106.76)	33.002±0.821b (106.93)	0.741±1.14b (105.02)	0.306±0.083a (105.91)
6.0	195.782±1.012c (107.73)	0.811±0.058c (96.47)	0.607±0.036c (99.24)	30.478±0.321c (98.75)	0.674±0.281c (95.53)	0.310±0.036a (107.44)
10.0	235.940±3.779b (129.83)	0.583±0.026d (69.38)	0.405±0.029d (66.29)	20.512±0.252d (66.46)	0.499±0.473d (70.73)	0.231±0.023c (80.03)
17.2	262.042±3.288a (144.19)	0.501±0.043e (59.66)	0.335±0.083e (54.86)	16.904±0.416e (54.77)	0.411±0.091e (58.26)	0.183±0.074d (63.36)

表 4 BPA 恢复期对生菜幼苗荧光参数的影响

Table 4 Chlorophyll fluorescence parameters of lettuce seedlings after removal of BPA stresses

BPA/mg·L ⁻¹	F_0	F_v/F_m	Φ_{PSII}	ETR	qP	qN
0	169.428±2.297cd (100.00)	0.836±0.052b (100.00)	0.604±0.808bc (100.00)	28.508±1.206bc (100.00)	0.692±0.054b (100.00)	0.266±0.152a (100.00)
1.5	154.382±2.919e (91.12)	0.877±0.094a (105.02)	0.682±0.362a (112.92)	31.886±1.169a (111.86)	0.745±0.131a (107.73)	0.276±0.087a (103.81)
3.0	163.396±4.423de (96.44)	0.849±0.146ab (101.58)	0.630±0.073b (104.47)	29.545±0.271b (103.64)	0.685±0.056b (99.01)	0.267±0.045a (100.47)
6.0	175.442±1.066c (103.55)	0.834±0.084b (99.82)	0.595±0.045c (98.64)	28.106±0.722c (98.59)	0.681±0.077b (98.42)	0.273±0.052a (102.73)
10.0	211.530±8.935b (124.85)	0.689±0.018c (82.49)	0.506±0.061d (83.91)	23.415±1.256d (82.14)	0.561±0.048c (81.20)	0.242±0.019b (91.25)
17.2	235.589±4.656a (139.05)	0.551±0.044d (66.02)	0.406±0.037e (67.30)	19.109±0.283e (67.03)	0.450±0.025d (65.09)	0.197±0.078c (74.33)

的化学能而用于光化学反应,促进实际光化学效率,加强依赖于叶黄素循环的非辐射能量耗散,最终增强光合作用。推测其原因可能是BPA的化学结构含有酚羟基(-OH)有关,-OH具有微弱酸性,可为光合过程中电子传递提供少量电子而加快光电转换和电子传递。 $6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理的番茄幼苗各荧光参数无显著变化,生菜幼苗 F_0 和 qN 显著升高,表明BPA剂量达到 $6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时生菜幼苗发生光抑制; $10.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理时,番茄幼苗 F_0 和 qN 升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 降低,表明 $10.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA导致番茄PS II反应中心损坏,光合电子传递受阻,光合作用受抑制,通过增加热耗散来消除因光化学效率降低所累积的过量光能,与前人提出的“PS II反应中心受损会减弱电子传递和增加热耗散来耗散过量光能而保护PS I”的观点一致^[28];而该剂量处理下生菜幼苗 F_0 升高,其他各参数均下降,且降幅大于番茄。当BPA剂量达到 $17.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,番茄和生菜幼苗 F_0 升高, F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 均降低,导致PS II反应中心可逆失活甚至破坏,PS II功能下调,过剩激发能进一步对幼苗PS II中心造成伤害^[12],且BPA对生菜各荧光参数影响大于番茄,表明BPA胁迫下生菜受BPA损伤程度远大于番茄,与Ferrara等^[1]发现同剂量BPA胁迫下生菜根和叶比番茄受伤害严重现象一致。Ferrara等^[1]研究发现,生菜根部受伤害严重而吸收BPA的量却很少,番茄根部受伤害作用小于生菜,而吸收BPA的量远大于生菜,表明番茄根部吸收的BPA运输到叶片,导致番茄叶片细胞抗氧化能力降低^[29],光合色素及类囊体膜受损^[30],光能利用效率降低,QA重新氧化为QA的量减少,电子传递能力下降,最终降低光合作用^[12];而BPA可能使生菜根部诱导坏死,导致叶片生长发育所需营养物质减少,而植物的光合作用取决于植物叶片捕捉光的能力和接收光转变成生物量的转换效率^[31],从而影响光合作用。这也可能是生菜受BPA损伤程度远大于番茄的原因之一。BPA对生菜的光合作用的促进或抑制机制比较复杂,其机制的研究国内外没有报道,有待于进一步深入研究。

在恢复期, $1.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $3.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理组番茄和生菜幼苗 F_0 降幅与 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 、 qP 和 qN 增幅较胁迫期均有所下降,表明用于光合作用的激发能减少,光合反应中心的光能转换效率和整个光电转换过程减缓,PS II促进作用变小,且同处理组番茄比生菜恢复效果好; $6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理的番茄幼苗各荧光参数仍然没有显著变化,生菜幼苗各荧光参数恢

复到接近CK水平,光抑制恢复到正常水平; $10.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组番茄幼苗各荧光参数均有所恢复且只有 F_0 、 F_v/F_m 、 qN 已恢复到CK水平,表明番茄幼苗的原初光化学效率和从天线色素到PS II反应中心的传能效率的抑制作用恢复,保护机能也恢复正常,但光能的利用能力仍未恢复,生菜幼苗各荧光参数均有所恢复但受损的PS II未恢复到正常水平; $17.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组番茄和生菜幼苗各指标恢复趋势缓慢,未能恢复到接近CK水平,高剂量恢复效果远小于低剂量,且生菜恢复程度小于番茄,表明高剂量BPA($10.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $17.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理下随着BPA剂量增加而恢复程度降低,番茄幼苗恢复能力大于生菜。这有可能是生菜受BPA胁迫严重,自身应激反应很缓慢,光合作用不能及时恢复。恢复期低剂量处理组得以恢复的原因可能是:恢复期内植物受到的胁迫逐渐减少,而进入植物体内胁迫量减少,其次叶片自身有应激反应,而将多余的能量以热形式耗散。高剂量处理组在恢复期内恢复的原因也与低剂量一致,植物体内BPA含量有所下降引起PS II反应中心逐渐恢复活性,恢复缓慢的原因可能与PS II反应中心受损而未能恢复到正常水平,致使植物光合受影响有关。

4 结论

胁迫期,BPA对番茄和生菜幼苗叶绿素荧光反应存在剂量效应关系;对比2种作物荧光参数变幅可知,BPA对生菜各荧光参数影响大于番茄,生菜幼苗叶绿素荧光反应比番茄幼苗更敏感;恢复期,生菜恢复程度小于番茄,高剂量BPA($10.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $17.2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)处理组2种作物随着BPA剂量增加而恢复程度降低;BPA对2种作物叶绿素荧光反应的影响方式和影响效果上存在差异,且BPA作用解除后,叶绿素荧光反应有不同程度恢复,仅 $6.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA作用解除后能恢复至对照水平。

参考文献:

- [1] Ferrara G, Loffredo E, Senesi N. Phytotoxic, clastogenic and bioaccumulation effects of the environmental endocrine disruptor bisphenol A in various crops grown hydroponically[J]. *Planta*, 2006, 223(5): 910-916.
- [2] Gong J, Ran Y, Chen D Y, et al. Occurrence and environmental risk of endocrine-disrupting chemicals in surface waters of the Pearl River, South China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 156(1-4): 199-210.
- [3] Tsai W T. Human health risk on environmental exposure to bisphenol-A: A review[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part C*, 2006, 24(2): 225-255.
- [4] Nanjappa M K, Simon L, Akingbemi B T. The industrial chemical

- bisphenol A (BPA) interferes with proliferative activity and development of steroidogenic capacity in rat Leydig cells[J]. *Biology of Reproduction*, 2012, 86(5): 135.
- [5] Keum Y S, Lee H R, Park H W, et al. Biodegradation of bisphenol A and its halogenated analogues by *Cunninghamella elegans* ATCC36112[J]. *Biodegradation*, 2010, 21(6): 989–997.
- [6] Loffredo E A, Traversa, Senesi N. Biodecontamination of water from bisphenol A using ligninolytic fungi and the modulation role of humic acids[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, 79: 288–293.
- [7] Huang Y Q, Wong C K C, Zheng J S, et al. Bisphenol A (BPA) in China: A review of sources, environmental levels, and potential human health impacts[J]. *Environment International*, 2012, 42: 91–99.
- [8] Terouchi N, Takano K, Nakamura Y, et al. Bisphenol A stimulates growth and shoot differentiation in plants[J]. *Plant Biotechnology*, 2004, 21(4): 307–308.
- [9] Loffredo E, Eliana Cattulo C, Traversa A, et al. Potential of various herbaceous species to remove the endocrine disruptor bisphenol A from aqueous media[J]. *Chemosphere*, 2010, 80(11): 1274–1280.
- [10] Speranza A, Crosti P, Malerba M, et al. The environmental endocrine disruptor, bisphenol A, affects germination, elicits stress response and alters steroid hormone production in kiwifruit pollen[J]. *Plant Biology*, 2011, 13(1): 209–217.
- [11] 邱志勇, 周青, 王丽红. 双酚A对大豆幼苗叶绿素合成中间产物的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(8): 1663.
- QIU Zhi-yong, ZHOU Qing, WANG Li-hong. Effects of bisphenol A on intermediate of chlorophyll biosynthesis of soybean seedlings[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2012, 31(8): 1663.
- [12] Qiu Z Y, Wang L H, Zhou Q. Effects of bisphenol A on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in above-ground organs of soybean seedlings[J]. *Chemosphere*, 2013, 90: 1274–1280.
- [13] 孙海, 周青. 镉和双酚A对大豆幼苗根系生长的复合影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8): 1695.
- SUN Hai, ZHOU Qing. Complex effects of cadmium and bisphenol A on root growth of soybean seedlings[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2011, 30(8): 1695.
- [14] Sun H, Wang L H, Zhou Q. Effects of bisphenol A on growth and nitrogen nutrition of roots of soybean seedlings[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2013, 32(1): 174–180.
- [15] Camejo D, Rodriguez P, Angeles Morales M, et al. High temperature effects on photosynthetic activity of two tomato cultivars with different heat susceptibility[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2005, 162(3): 281–289.
- [16] Danielius R V, Satoh K, van Kan P J M, et al. The primary reaction of photosystem II in the D1–D2–cytochrome *b*–559 complex[J]. *FEBS Letters*, 1987, 213(2): 241–244.
- [17] Hussain M I, Reigosa M J. A chlorophyll fluorescence analysis of photosynthetic efficiency, quantum yield and photon energy dissipation in PS II antennae of *Lactuca sativa* L. leaves exposed to cinnamic acid[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2011, 49(11): 1290–1298.
- [18] Kautsky H, Hirsch A. Neue versuche zur kohlen säureassimilation[J]. *Naturwissenschaften*, 1931, 19(48): 964–964.
- [19] 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.
- ZHANG Shou-ren. A discussion on chlorophyll fluorescence kinetics parameters and their significance[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16(4): 444–448.
- [20] Czyżyło-Mysza I, Tyrka M, Marcinska I, et al. Quantitative trait loci for leaf chlorophyll fluorescence parameters, chlorophyll and carotenoid contents in relation to biomass and yield in bread wheat and their chromosome deletion bin assignments [J]. *Molecular Breeding*, 2013, 32(1): 189–210.
- [21] 邱志勇, 周青, 王丽红. 双酚A与镉对植物光合作用的复合生态效应[J]. 中国微生态学杂志, 2011, 23(11): 1043–1046.
- QIU Zhi-yong, ZHOU Qing, WANG Li-hong. Combined microecological effect of bisphenol A and cadmium on photosynthesis of plant[J]. *Chinese Journal of Microecology*, 2011, 23(11): 1043–1046.
- [22] 洪涛, 刘世琦, 精高斌. 光质对彩色甜椒幼苗生长及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北农业学报, 2005, 14(1): 41–45.
- HONG Tao, LIU Shi-qi, JING Gao-bin. Effects of light qualities on growth and chlorophyll fluorescence parameters in leaves of color pepper seedling[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2005, 14(1): 41–45.
- [23] 柴胜丰, 韦霄, 史艳财, 等. 强光胁迫对濒危植物金花茶幼苗生长和叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物研究, 2012, 32(2): 159–164.
- CHAI Sheng-feng, WEI Xiao, SHI Yan-cai, et al. Effect of strong light stress on the growth, biomass and chlorophyll fluorescence parameters in seedlings of endangered plant *Camellia nitidissima* [J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2012, 32(2): 159–164.
- [24] 李月灵, 金则新, 王强, 等. 不同生境华东野桃花合生特性及叶绿素荧光参数比较[J]. 浙江大学学报(理学版), 2013, 40(2): 221–229.
- LI Yue-ling, JIN Ze-xin, WANG Qiang, et al. Comparison of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Juglans cathayensis* var. *formosana* in different habitats[J]. *Journal of Zhejiang University (Science Edition)*, 2013, 40(2): 221–229.
- [25] 史庆华, 朱祝军, Khalida Al-aghaby, 等. 等渗 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 和 NaCl 胁迫对番茄光合作用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(2): 188–191.
- SHI Qing-hua, ZHU Zhu-jun, Khalida Al-aghaby, et al. Effect of iso-osmotic $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ and NaCl treatment on photosynthesis in leaves of tomato[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(2): 188–191.
- [26] Li G, Wang S W, Zhou J, et al. Leaf chlorophyll fluorescence, hyperspectral reflectance, pigments content, malondialdehyde and proline accumulation responses of castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings to salt stress levels[J]. *Industrial Crops and Products*, 2010, 31(1): 13–19.
- [27] 张国伟, 张雷, 唐明星, 等. 土壤盐分对棉花功能叶气体交换参数和叶绿素荧光参数日变化的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(7): 1771–1781.
- ZHANG Guo-wei, ZHANG Lei, TANG Ming-xing, et al. Diurnal variation of gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters of cotton functional leaves under effects of soil salinity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1771–1781.
- [28] Harbinson J, Genty B, Baker N R. The relationship between CO_2 assimilation and electron transport in leaves[J]. *Photosynthesis Research*, 1990, 25(3): 213–224.
- [29] Livingstone D R. Contaminant-stimulated reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2001, 42(8): 656–666.
- [30] Hattab S, Dridi B, Chouba L, et al. Photosynthesis and growth responses of pea *Pisum sativum* L. under heavy metals stress[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(11): 1552–1556.
- [31] Confalone A, Lizaso J I, Ruiz-Nogueira B, et al. Growth, PAR use efficiency, and yield components of field-grown *Vicia faba* L. under different temperature and photoperiod regimes[J]. *Field Crops Research*, 2010, 115(2): 140–148.