

双酚A对玉米幼苗光合及抗氧化作用的影响

许艳梅, 贝丽霞*, 张恒, 于高波, 杨克军, 赵长江*, 徐晶宇, 贺琳, 石新新, 马丽峰, 范博文, 刘瑞
黑龙江八一农垦大学农学院, 黑龙江省教育厅寒地作物种质改良与栽培重点实验室, 黑龙江大庆163319

摘要: 由于含双酚A (bisphenol A, BPA)材料的广泛使用, 致使其释放到环境中产生安全隐患。以玉米杂交品种‘郑单958’为材料, 对玉米幼苗进行BPA浸根处理, 分析其对光合和抗氧化系统的影响。结果表明, 低于(含) $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理引起玉米幼苗根长、地上鲜重及干重增加; 高于 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA导致株高、地上鲜重及干重显著下降, 且随BPA浓度增加抑制效果加重, 值得注意的是 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理已导致叶片相对含水量显著下降。 $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理使得净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)升高, 高于(含) $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA导致 P_n 、 G_s 、 T_r 显著下降, 胞间 CO_2 浓度(C_i)显著升高, 表明光合下降主要是由非气孔限制因素引起, 且高于(含) $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理光合色素含量呈下降趋势, 说明玉米幼苗光合作用对BPA响应较为敏感且光合色素含量可能并非光合作用下降的主要原因。BPA处理下, MDA含量增加但只有 $50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理增加显著, SOD活性先下降后升高, POD与CAT活性呈不同程度升高。恢复期, 光合参数显著恢复, MDA含量较处理期相对下降, SOD活性逐渐升高, POD活性呈波动式变化。研究表明BPA对玉米幼苗生长表现出明显的“低促高抑”现象, 一方面是由BPA对光合作用的“低促高抑”效应造成的; 另一方面, BPA处理造成MDA积累, 引发膜质过氧化, 提高抗氧化酶活性, 从而调控ROS动态平衡。

关键词: BPA; 玉米; 生长; 光合作用; 抗氧化

双酚A (bisphenol A, BPA)是一种有机化合物, 是由丙酮和苯酚在催化剂作用下缩合而成, 其作为重要的有机化工原料(Staples等1998), 主要用于生产聚碳酸酯、环氧树脂等多种高分子材料及涂料、农药等精细化工产品。但是, BPA浓度过高会导致其残留在环境中。美国环境保护机构调查结果显示, $1.5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA可作为饮用水中的安全浓度(Geens等2011)。监测河流、废水等BPA环境残留, 发现危险废弃物中BPA渗滤液达到 $17.2 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (Yamamoto等2001)。因BPA产品的广泛使用, 导致释放水体的BPA有不断增加的趋势; 加之水资源日益短缺, 废水再利用将可能成为未来农业灌溉用水的主要来源, 所以BPA污染水成为一种潜在的农业环境污染。因此, 揭示BPA对重要粮食作物的生长及机制影响具有重要意义。

关于BPA对植物生长影响最早见于Terouchi等(2004)的研究工作, 并指出低浓度BPA具有类似细胞分裂素的作用, 能够促进细胞分裂、组织分化及植物生长。最新研究表明, 适当浓度BPA可改善植物的光合系统, 对其生长具有一定的促进作用(李曼等2014; Mihaich等2009; Qiu等2013; 邱志勇等2012)。但是, 高浓度BPA处理可破坏植物光合系统, 抑制光合电子传递, 且降低叶绿素含量, 并随BPA浓度增加抑制作用逐渐增强, 最终抑制植物生长(李曼等2014; Qiu等2013; Mihaich等2009)。

进一步研究证明, 高浓度BPA可导致大豆幼苗叶绿素合成的关键性中间产物 δ -氨基乙酰丙酸(δ -aminolevulinic acid, ALA)积累, 影响ALA向原叶啉IX (Proto IX)转化, 从而抑制叶绿素合成(邱志勇等2012)。由此可见, BPA造成的环境胁迫会严重影响植物的光合作用与生长, 另外一个重要的生理进程就是若ROS产生与抗氧化体系的清除作用失去动态平衡, 就会导致ROS的过量积累, 造成膜质过氧化损伤, 影响植物正常生长发育(Suzuki和Mittler 2006; Almeselmani等2006)。有研究指出, 鹰嘴豆根系中POD活性、过氧化氢与MDA含量随BPA浓度增加而升高。相关性分析表明, 过氧化氢含量与蛋白质含量呈现负相关, 推测BPA可能诱导ROS生成, 攻击蛋白质并导致其受损(Dogan等2010; Halliwell 1987)。因此, BPA极有可能影响玉米叶片中的膜质过氧化与抗氧化系统。故本研究以大面积推广的玉米品种‘郑单958’为试验材料,

收稿 2015-06-23 修定 2015-12-26

资助 国家科技支撑计划课题(2013BAD07B01-05/07)、国家自然科学基金(31101429)、黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12511360)、黑龙江八一农垦大学引进人才科研启动基金(2011)和黑龙江八一农垦大学研究生创新项目(Y06)。

* 共同通讯作者(E-mail: beilixia@163.com; zhaocj15@126.com)。

通过不同浓度BPA处理, 研究环境雌激素BPA对玉米幼苗光合及抗氧化方面的影响, 探讨玉米幼苗生长及生理生化对新型环境污染物BPA的响应, 为全面认识BPA农业环境安全问题提供理论参考。

材料与方 法

1 试验材料与 设计

供试玉米(*Zea mays* L.)品种‘郑单958’, BPA购于上海Aladdin-阿拉丁试剂公司。BPA试剂配制以甲醇为助溶剂, 为减小甲醇副作用, 甲醇在水(或营养液)中终浓度小于等于0.1%, 同时对照加入等量甲醇。

试验于2013~2015年在黑龙江八一农垦大学寒地作物种质改良与栽培重点实验室进行。精选大小一致、饱满无破损的玉米种子, 使用10%的NaClO溶液消毒20 min, 蒸馏水清洗3~5次, 置于26°C培养箱黑暗浸种24 h、催芽, 种子长出2 cm芽和根后使用1/2Hoagland营养液(pH 6.5)培养。二叶期进行不同浓度(0、1.5、5、10、15、50 mg·L⁻¹) BPA处理8 d, 然后用不加BPA、只用1/2Hoagland营养液(pH 6.5)进行恢复培养3 d。幼苗培养条件为, 光照强度1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹, 光照时间12 h·d⁻¹, 昼夜温度分别为25°C/18°C, 相对湿度为60%~80%。试验处理设置3次重复。于BPA处理8 d及恢复生长3 d分别测定根长、株高等表型指标及光合参数、叶绿素含量, 并与与光合参数测定部位相同叶位的叶片用于生理生化指标测定。

2 测定指标与 方法

2.1 生长指标 测定

各处理取至少12株幼苗, 测量其根长、株高、地上鲜重/干重, 叶片相对含水量测定参照陈少瑜等(2004)的方法, 计算公式: RWC (%)=[(鲜重-干重)/(饱和鲜重-干重)]×100。

2.2 叶绿素含量 及光合参数测定

叶绿素含量测定参照王学奎(2006)方法并加以改进, 取倒数第2片完全展开叶距叶尖1 cm处剪下, 剪碎的叶片用95%乙醇浸泡24~36 h, 每个处理重复5次, 使用分光光度计测定在665、649和470 nm处的吸光值。

使用Li-6400XTR光合仪在上午10时测定倒数第2片完全展开叶的净光合速率(P_n)、气孔导度

(G_s)、胞间CO₂浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)。进行室内测定, 测定时叶室光强约为1 000 μmol·m⁻²·s⁻¹, CO₂浓度400 μL·L⁻¹, 温度为25°C, 相对湿度为60%~80%, 每个处理重复10次。

2.3 MDA含量与 抗氧化酶活性测定

MDA含量使用硫代巴比妥酸法测定、SOD活力使用氮蓝四唑法测定、POD活力使用愈创木酚法测定、CAT活性测定采用紫外吸收法(王学奎2006)。

3 数据分析

使用Excel 2007对数据进行整理, SPSS 19.0进行单因素方差分析, Duncan检验法进行多重比较和差异显著性分析($P<0.05$), 表和图中的数据均为3次重复的平均值。

实验结果

1 BPA对玉米幼苗 生长的影响

不同浓度BPA处理和恢复对玉米幼苗生长指标的影响见图1和表1。由表1可知, 随BPA浓度升高, 除株高逐渐下降外, 根长、地上部分鲜、干重均表现先升高后下降的趋势。与对照相比, 1.5、5 mg·L⁻¹ BPA处理对株高无显著变化, 对根长、地上鲜重和干重具有促进作用, 且1.5 mg·L⁻¹ BPA对这三个生长指标的增加率分别为3.71%、14.26%、3.85%, 5 mg·L⁻¹ BPA处理的增加率分别为16.18%、3.33%、1.92%, 但5 mg·L⁻¹ BPA处理已引起叶片相对含水量显著下降2.38%; 10、15、50 mg·L⁻¹ BPA处理导致株高、地上鲜重、地上干重及叶片相对含水量都显著降低; 然而10 mg·L⁻¹ BPA处理使得根长呈下降趋势, 但差异不显著, 此后显著下降, 其中15 mg·L⁻¹ BPA处理导致供试表型指标分别下降6.11%、11.39%、10.93%、9.62%、7.64%, 50 mg·L⁻¹ BPA处理使得供试生长指标分别明显减少7.61%、39.79%、47.66%、23.08%、22.80%。恢复期, 与同期对照相比, 1.5 mg·L⁻¹ BPA对株高、地上鲜重和干重的促进作用显著; 5 mg·L⁻¹ BPA处理除了使得地上鲜重和叶片相对含水量显著下降外, 其余供试指标均增加, 但差异不显著; 高于10 mg·L⁻¹ BPA处理导致根长、株高、地上鲜重、地上干重与叶片相对含水量呈不同程度下降, 仅在50 mg·L⁻¹ BPA处理导致上述供试表型指标均显著下降。表明玉米幼苗生长与BPA剂量密切相关。

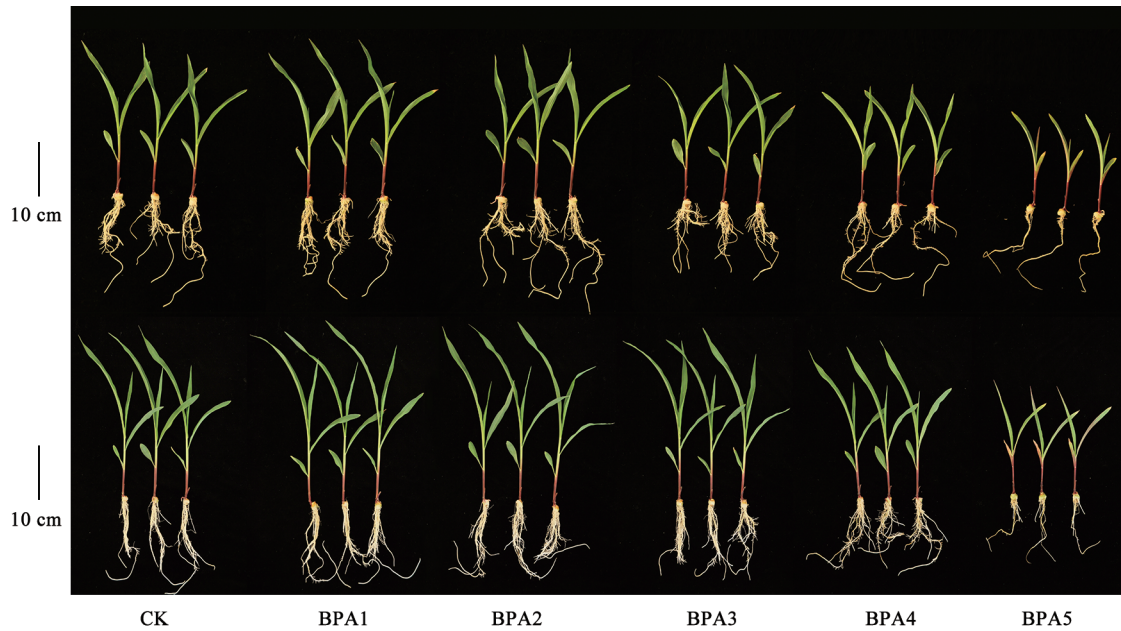


图1 BPA处理对玉米幼苗生长的影响

Fig.1 Effects of BPA treatment on growth of maize seedlings

第一行为不同浓度BPA处理8 d (T8d), 第二行为处理后恢复3 d (R3d)的玉米幼苗照片。CK: 对照(加入等量甲醇); BPA1~5分别为1.5、5、10、15、50 mg·L⁻¹。

表1 BPA处理对玉米幼苗生长指标的影响

Table 1 Effects of BPA treatment on growth parameters of maize seedlings

处理方式	BPA浓度/ mg·L ⁻¹	根长/cm	株高/cm	地上鲜重/g	地上干重/g	叶片相对含水量/%
T8d	0.0	16.69±0.12 ^b	34.51±0.20 ^a	9.61±0.02 ^c	0.52±0.01 ^a	79.30±0.06 ^a
	1.5	17.31±0.25 ^b	33.81±0.15 ^a	10.98±0.03 ^a	0.54±0.01 ^a	80.10±0.06 ^a
	5.0	19.39±0.41 ^a	33.81±0.40 ^a	9.93±0.05 ^b	0.53±0.01 ^a	77.41±0.56 ^b
	10.0	17.13±0.23 ^b	30.74±0.26 ^b	9.24±0.02 ^d	0.48±0.01 ^b	75.24±0.08 ^c
	15.0	15.67±0.17 ^c	30.58±0.46 ^b	8.56±0.02 ^e	0.47±0.00 ^b	73.24±0.15 ^d
	50.0	15.42±0.18 ^c	20.78±0.24 ^e	5.03±0.00 ^f	0.40±0.01 ^c	61.22±0.64 ^e
R3d	0.0	19.59±0.27 ^b	40.73±0.43 ^c	15.65±0.06 ^b	0.68±0.01 ^{cd}	80.14±0.25 ^a
	1.5	20.34±0.42 ^{ab}	43.06±0.32 ^b	16.48±0.06 ^a	0.74±0.01 ^b	80.76±0.25 ^a
	5.0	21.10±0.35 ^a	40.84±0.37 ^c	13.94±0.03 ^c	0.69±0.01 ^c	79.05±0.17 ^b
	10.0	18.43±0.28 ^c	44.49±0.17 ^a	12.84±0.09 ^d	0.81±0.00 ^a	77.32±0.52 ^c
	15.0	17.07±0.17 ^d	40.53±0.35 ^c	12.82±0.01 ^d	0.66±0.01 ^d	75.77±0.22 ^d
	50.0	14.11±0.16 ^e	26.98±0.43 ^d	6.80±0.01 ^e	0.44±0.01 ^e	70.10±0.24 ^e

根据Duncan检验, 同列数据的不同字母表示在0.05水平上的差异显著性, 表中的数据是3次重复的平均值±SE。T8d: BPA处理8 d; R3d: BPA处理后恢复3 d, 下同。

2 BPA对玉米幼苗叶片叶绿体色素含量的影响

光合色素作为植物光合作用重要的功能物质, 完成植物对光能的吸收、传递与转化。如图2所示, 低浓度BPA处理导致叶绿素a和b、总叶绿素、类胡萝卜素等光合色素含量增加, 其中在5 mg·L⁻¹ BPA处理时光合色素增加量最大, 此后其

含量呈现下降趋势; 在50 mg·L⁻¹ BPA处理时供试光合色素显著下降, 较对照相比分别下降34.59%、23.58%、32.55%、28.37%。去除BPA胁迫后, 除15和50 mg·L⁻¹ BPA处理植株光合色素含量依然被抑制外, 其余BPA处理含量均基本恢复正常。

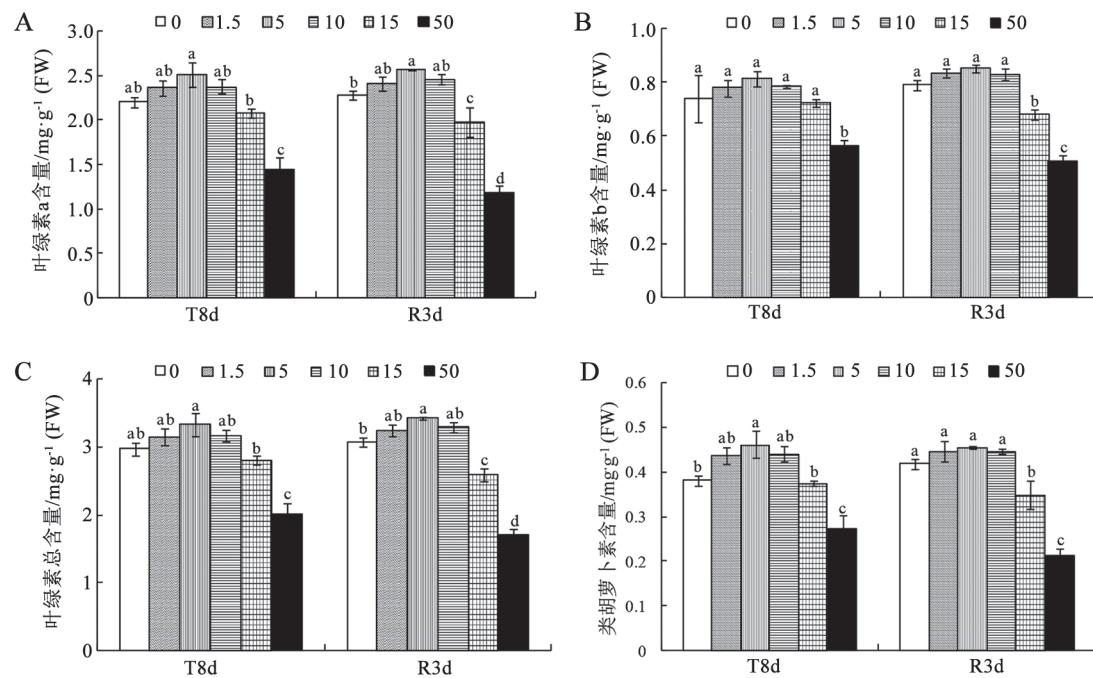


图2 BPA处理对玉米幼苗叶片光合色素含量的影响

Fig.2 Effects of BPA treatment on photosynthetic pigments content in leaves of maize seedlings

图例为BPA处理浓度(mg·L⁻¹), 图3、4同此。

3 BPA对玉米幼苗叶片光合参数的影响

植物的生长发育依赖于光合作用, 光合参数是衡量光合作用的重要生理生态指标。如图3所示, 与对照相比, 1.5 mg·L⁻¹ BPA处理导致 P_n 、 G_s 和 T_r 增强, 后两者显著增强; 高于(含) 5 mg·L⁻¹ BPA处理导致 P_n 、 G_s 和 T_r 均显著下降; 然而, 高于5 mg·L⁻¹ BPA导致 C_i 显著升高。与同浓度处理相比, 恢复期不同浓度BPA处理光合参数均有恢复; 但是与同期生长对照相比, 高于5 mg·L⁻¹ BPA时植株 P_n 、 G_s 和 T_r 均依然受抑制显著。

4 BPA对玉米幼苗叶片MDA含量及抗氧化酶活性的影响

MDA是脂质过氧化作用的最终产物, 其含量能够间接反映细胞膜质过氧化损伤程度(刘云国等2005)。如图4所示, 随BPA浓度增大, MDA含量呈稳定上升趋势, 仅50 mg·L⁻¹ BPA处理时增加显著。去除BPA的恢复期, MDA含量变化与处理期变化趋势相似, 除对照没有明显影响外, 其余浓度BPA处理均有所恢复, 且仅在50 mg·L⁻¹ BPA处理下恢复显著。

SOD、POD、CAT是植物体中重要的抗氧化酶, 如图4所示, 供试5个浓度BPA处理下玉米幼苗

叶片SOD活性先下降后提高; 高于1.5 mg·L⁻¹ BPA处理使POD活性较对照分别显著提高355.06%、498.67%、520.28%、679.54%; 高于10 mg·L⁻¹ BPA处理则显著提高CAT活性。去除BPA胁迫后, 高于5 mg·L⁻¹ BPA处理下SOD活力显著升高, POD活力显著恢复且波动较大, CAT活力相对稳定增加但差异不显著。

讨 论

通过BPA处理玉米幼苗根系发现, 高浓度BPA显著降低株高和地上生物量累积, 叶片出现萎黄, BPA可能直接伤害植物根系, 或是被吸收和转运至叶片造成地上伤害(Shimoda等2009; Nakajima等2002; Schmidt和Schuphan 2002; Ferrara等2006)。低于(含) 5 mg·L⁻¹ BPA促进玉米生长和生物量累积, 高于(含) 10 mg·L⁻¹ BPA抑制玉米幼苗地上部生长, 抑制效果随BPA浓度增加表现出明显的剂量效应, 与BPA对大豆和浮萍等植物影响研究结论一致, 表明BPA对植物生长影响表现出“低促高抑”效应(Mihaich等2009; Terouchi等2004; Qiu等2013), 但BPA对不同植物的促、抑浓度不一而同。

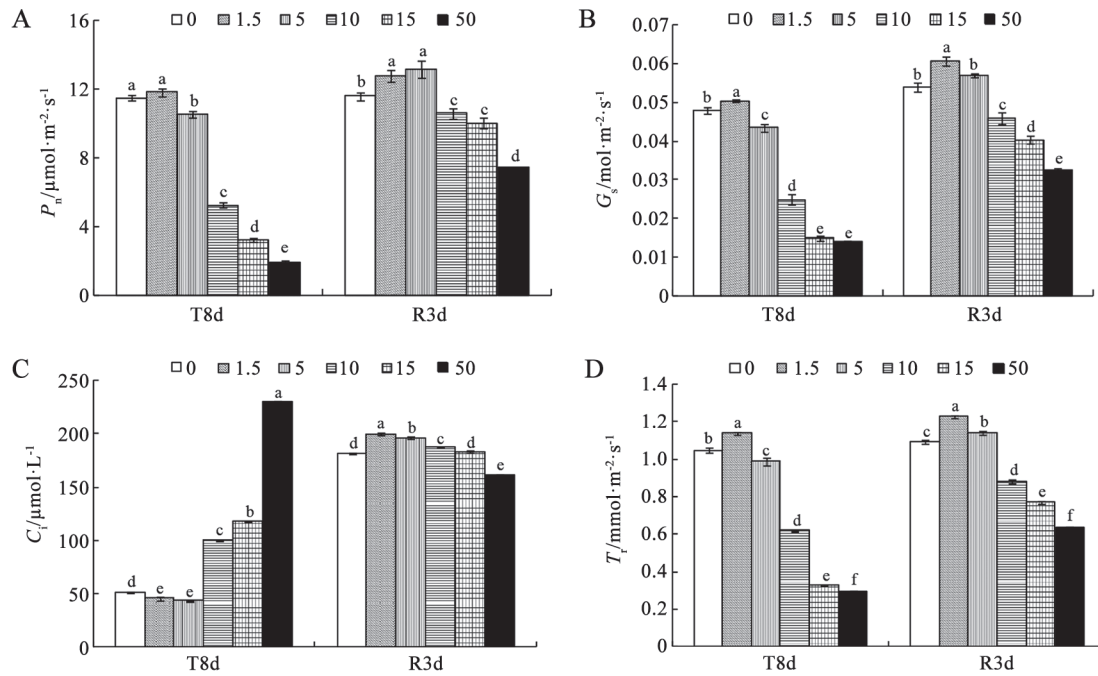


图3 BPA处理对玉米幼苗叶片净光合速率(A)、气孔导度(B)、胞间CO₂浓度(C)、蒸腾速率(D)的影响
Fig.3 Effects of BPA treatment on P_n (A), G_s (B), C_i (C), T_r (D) in leaves of maize seedlings

植物生长发育依赖有机物的合成与积累,而有机物合成与累积依赖于植物的光合作用,因此光合作用的改变是环境污染物影响植物生长发育的关键性因素(Kummerova等2006)。在供试的5个BPA浓度中,玉米幼苗生长指标的“低促高抑”效应临界浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, P_n 、 G_s 、 T_r 等光合参数的“低促高抑”临界浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,光合色素含量“低促高抑”的临界浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,表明光合作用对BPA响应较为敏感(Qiu等2013)。一般认为,当 P_n 和 G_s 下降时,若 C_i 也下降,则主要原因是由于气孔限制,若 C_i 保持不变或上升,那么非气孔限制则是决定性因素(Farquhar和Sharkey 1982)。本研究中,低于(含) $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理时,玉米幼苗叶片 C_i 显著降低,可能由于气孔发生关闭,表现为一定的气孔限制,且 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理下叶片相对含水量显著下降,说明BPA在影响光合速率同时也影响到幼苗的水分吸收和蒸腾失衡;当BPA浓度持续升高时, C_i 显著上升,那么高浓度BPA导致光合速率下降的应该是非气孔限制因素所致。有研究认为高浓度BPA处理的光合速率下降可能与BPA影响光合电子传递链有关(Qiu等2013; Zhang等2015);叶片相对含水量显著下降,造成光合作用原料无法正常

供应,导致光合能力进一步下降。另一方面,光合参数与叶绿素含量发生下降趋势的拐点不一样,说明光合速率下降是一个综合复杂的过程,叶绿素含量可能并非是光合作用下降的主要原因(王丽燕2005)。高浓度BPA降低叶绿素含量且导致其难以在短期内恢复,可能与BPA影响ALA过度积累等有关(邱志勇等2012)。此外,也有研究指出BPA通过影响大豆幼苗根系氮代谢的关键酶活性,来影响氨基酸、可溶性蛋白代谢(Sun等2013),从而影响叶片可溶性蛋白含量,尤其是叶片中Rubisco蛋白的合成,进而影响其固碳能力(陆巍等2002)。

逆境胁迫下,植物体中的抗氧化酶系统可负责清除过量的ROS,其中SOD主要用于清除超氧阴离子,歧化反应生成 H_2O_2 和 O_2 , POD在清除 H_2O_2 时主要将愈创木酚作为电子供体,产生催化作用并将电子转移给 H_2O_2 (王国骄等2012),或由CAT直接分解 H_2O_2 ,如果植物细胞内的ROS不能被及时清除,就会引起氧化损伤,导致膜质过氧化,同时伴随MDA的生成(周丛义等2010; 张仁和等2011)。本研究发现,MDA含量随BPA浓度升高呈稳定增加的趋势,说明BPA处理使玉米叶片细胞发生膜质过氧化作用,这与宇克莉等(2010)试验结果相类似,

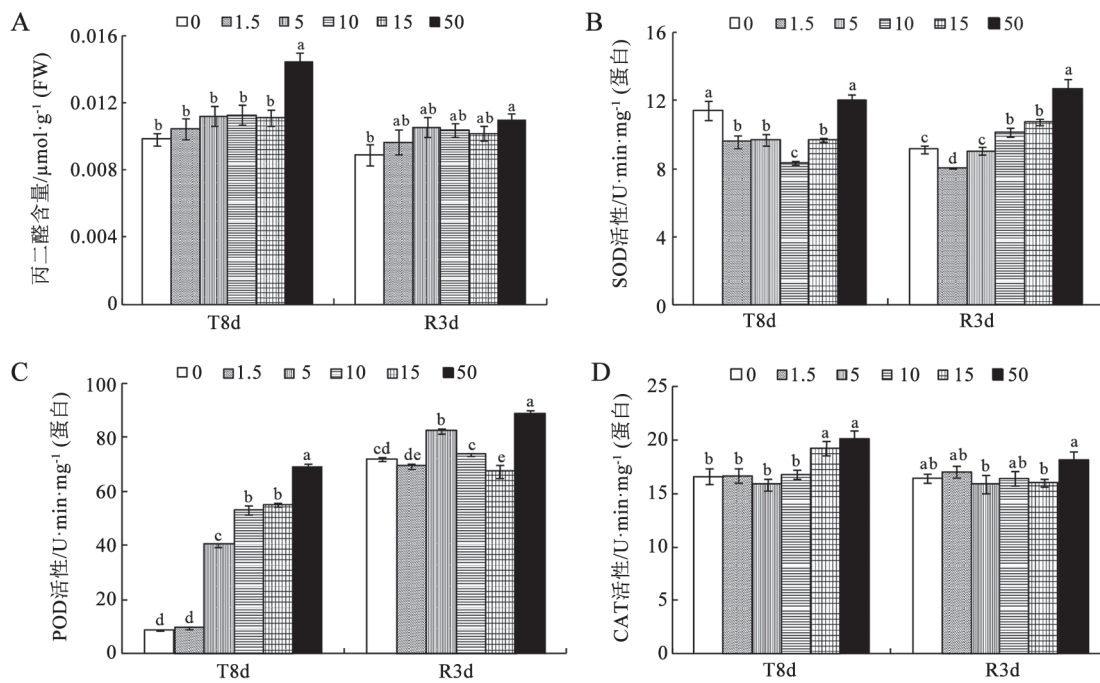


图4 BPA处理对玉米幼苗叶片丙二醛含量(A)与抗氧化酶SOD (B)、POD (C)、CAT (D)活性的影响

Fig.4 Effects of BPA treatment on MDA content (A) and activities of antioxidant enzymes SOD (B), POD (C), CAT (D) in leaves of maize seedlings

而且供试的三个保护性酶中仅CAT活性变化与MDA含量变化趋势相似。BPA处理下, SOD活力受抑制且表现为先下降后升高至对照水平, 这与魏国强等(2004)的研究结果相近; POD活性经BPA诱导后逐渐升高, 这与Dogan等(2010)的研究结果相吻合。值得一提的是, 已报道的大部分环境激素在一定范围内通常导致玉米幼苗叶片MDA含量呈上升趋势, SOD、POD、CAT酶活升高(宇克莉等2010; 汪洪等2008)。而我们研究结果显示, MDA含量仅在50 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ BPA处理下显著, SOD活性先下降后升高, POD活性逐渐上升, CAT酶活也升高但只有高浓度BPA处理才显著, 综合来看这几项指标的变化趋势, 表明植物体内抗氧化酶活性变化是一个相互联系且复杂的过程, 抗氧化酶并没有完全有效清除ROS, 导致ROS产生与清除没有保持在良好水平。在BPA处理下, 膜质过氧化作用还涉及到ROS种类、酶促及非酶促保护系统之间的复杂平衡关系, 需要整个抗氧化系统的协调作用才能有效清除ROS, 因此玉米幼苗叶片部分抗氧化酶活性升高或下降并不代表能够同步提高或降低ROS清除能力以及增强或减弱膜质过氧化作用

(魏国强等2004), 由于BPA对植物影响的复杂性, 仅从某一层面去研究BPA对植物的伤害是不够的; 再从各指标恢复情况看, 说明植物体内各项生理指标的恢复机制可能不同(林植芳和刘楠2012), 故此部分还需要进一步探讨。

综上所述, 研究表明BPA对玉米幼苗生长表现出明显的“低促高抑”现象, 一方面是由BPA对光合作用的“低促高抑”效应造成的; 另一方面, BPA处理造成MDA积累, 引发膜质过氧化, 叶片相应提高抗氧化酶活性, 从而调控ROS动态平衡。

参考文献

- Almeselmani M, Deshmukh PS, Sairam RK, Kushwaha SR, Singh TP (2006). Protective role of antioxidant enzymes under high temperature stress. *Plant Sci*, 171 (3): 382–388
- Chen SY, Lang NJ, Li JY, Jia LQ, Wu LY, Mi FT (2004). Changes of leaf relative water content, relative plasma membrane permeability and proline content of seedlings of three species under drought stress. *J West China Forestry Sci*, 33 (3): 30–34 (in Chinese with English abstract) [陈少瑜, 郎南军, 李吉跃, 贾利强, 吴丽圆, 米方佃(2004). 干旱胁迫下3树种苗木叶片相对含水量、质膜相对透性和脯氨酸含量的变化. *西部林业科学*, 33 (3): 30–34]
- Dogan M, Yumrutas O, Saygideger SD, Korkunc M, Gulnaz O, Sok-

- men A (2010). Effects of bisphenol A and tetrabromobisphenol A on chickpea roots in germination stage. *American-Eurasian J Agric Environ Sci*, 9 (2): 186–192
- Farquhar GD, Sharkey TD (1982). Stomatal conductance and photosynthesis. *Annu Rev Plant Physiol*, 33 (1): 317–345
- Ferrara G, Loffredo E, Senesi N (2006). Phytotoxic, clastogenic and bioaccumulation effects of the environmental endocrine disruptor bisphenol A in various crops grown hydroponically. *Planta*, 223 (5): 910–916
- Geens T, Goeyens L, Covaci A (2011). Are potential sources for human exposure to bisphenol A overlooked. *Int J Hyg Environ Heal*, 214 (5): 339–347
- Halliwell B (1987). Oxidative damage, lipid peroxidation and antioxidant protection in chloroplasts. *Chem Physics Lipids*, 44 (2/4): 327–340
- Kummerova M, Krulova J, Zezulka S, Triska J (2006). Evaluation of fluoranthene phytotoxicity in pea plants by Hill reaction and chlorophyll fluorescence. *Chemosphere*, 65 (3): 489–496
- Li M, Wang QQ, Wang LH, Ye YX, Zhou Q (2014). Effects of BPA on the chlorophyll fluorescence reaction in soybean, maize and rice. *Acta Sci Cir*, 34 (4): 1068–1073 (in Chinese with English abstract) [李曼, 王庆庆, 王丽红, 叶亚新, 周青(2014). 双酚A对大豆、玉米和水稻叶绿素荧光反应的影响. *环境科学学报*, 34 (4): 1068–1073]
- Lin ZF, Liu N (2012). Research progress in the control and regulation of plant growth and development by reactive oxygen species. *Chin Bull Bot*, 47 (1): 74–86 (in Chinese with English abstract) [林植芳, 刘楠(2012). 活性氧调控植物生长发育的研究进展. *植物学报*, 47 (1): 74–86]
- Liu YG, Tang CF, Zeng GM, Xu WH, Li CF (2005). Cadmium-induced superoxide anion generation, lipid peroxidation and changes of antioxidant enzyme activities in radish seedlings. *Guihaia*, 25 (2): 164–168 (in Chinese with English abstract) [刘云国, 汤春芳, 曾光明, 徐卫华, 李程峰(2005). 镉诱导萝卜幼苗活性氧产生、脂质过氧化和抗氧化酶活性的变化. *广西植物*, 25 (2): 164–168]
- Lu W, Li S, Li GF, Gong YD, Zhao NM, Zhou HM, Deng ZR, Zhang RX, Chen GX (2002). Effect of H₂O₂ on stability of rice rubisco. *Plant Physiol Commun*, 38 (3): 213–216 (in Chinese) [陆巍, 李森, 李国富, 公衍道, 赵南明, 周海梦, 邓志瑞, 张荣铤, 陈国祥(2002). H₂O₂对水稻Rubisco稳定性的影响. *植物生理学通讯*, 38 (3): 213–216]
- Mihaich EM, Friederich U, Caspers N, Hall AT, Klecka GM, Dimond SS, Staples CA, Ortego LS, Hentges SG (2009). Acute and chronic toxicity testing of bisphenol A with aquatic invertebrates and plants. *Ecotox Environ Safe*, 72 (5): 1392–1399
- Nakajima N, Oshima Y, Serizawa S, Kouda T, Edmonds JS, Shiraishi F, Aono M, Kubo A, Tamaoki M, Saji H, et al (2002). Processing of bisphenol A by plant tissues: glucosylation by cultured BY-2 cells and glucosylation/translocation by plants of *Nicotiana tabacum*. *Plant Cell Physiol*, 43 (9): 1036–1042
- Qiu Z, Wang L, Zhou Q (2013). Effects of bisphenol A on growth, photosynthesis and chlorophyll fluorescence in above-ground organs of soybean seedlings. *Chemosphere*, 90 (3): 1274–1280
- Qiu ZY, Zhou Q, Wang LH (2012). Effect of bisphenol A on intermediate of chlorophyll biosynthesis of soybean seedlings. *J Agro-Environ Sci*, (8): 1664 (in Chinese) [邱志勇, 周青, 王丽红(2012). 双酚A对大豆幼苗叶绿素合成中间产物的影响. *农业环境科学学报*, (8): 1664]
- Schmidt B, Schuphan I (2002). Metabolism of the environmental estrogen bisphenol A by plant cell suspension cultures. *Chemosphere*, 49 (1): 51–59
- Shimoda K, Hamada H, Hamada H (2009). Phytoremediation of benzophenone and bisphenol A by glycosylation with immobilized plant cells. *Environ Health Insights*, 3: 19–25
- Staples CA, Dorn PB, Klecka GM, O'Block ST, Harris LR (1998). A review of the environmental fate, effects, and exposures of bisphenol A. *Chemosphere*, 36 (10): 2149–2173
- Sun H, Wang LH, Zhou Q, Huang XH (2013). Effects of bisphenol A on ammonium assimilation in soybean roots. *Environ Sci Pollut Res*, 20 (12): 8484–8490
- Suzuki N, Mittler R (2006). Reactive oxygen species and temperature stresses: a delicate balance between signaling and destruction. *Physiol Plant*, 126: 45–51
- Terouchi N, Takano K, Nakamura Y, Enomoto K, Hosoya N, Nishinari N (2004). Bisphenol A stimulates growth and shoot differentiation in plants. *Plant Biotechnol*, 21 (4): 307–308
- Wang GJ, Tang L, Fan SX, Wang JY (2012). Role of antioxidant machinery on crop plants in abiotic stress tolerance. *J Shenyang Agric Univ*, 43 (6): 719–724 (in Chinese with English abstract) [王国骄, 唐亮, 范淑秀, 王嘉宇(2012). 抗氧化机制在作物对非生物胁迫耐性中的作用. *沈阳农业大学学报*, 43 (6): 719–724]
- Wang H, Zhao SC, Xia WJ, Wang XB, Fan HL, Zhou W (2008). Effect of cadmium stress on photosynthesis, lipid peroxidation and antioxidant enzyme activities in maize (*Zea mays* L.) seedlings. *J Plant Nutr Fert*, 14 (1): 36–42 (in Chinese with English abstract) [汪洪, 赵士诚, 夏文建, 王秀斌, 范洪黎, 周卫(2008). 不同浓度镉胁迫对玉米幼苗光合作用、脂质过氧化和抗氧化酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 14 (1): 36–42]
- Wang LY (2005). Effects of NaCl on photosynthesis. *J Dezhou Univ*, 21 (4): 12–15 (in Chinese with English abstract) [王丽燕(2005). NaCl胁迫对植物光合作用的影响. *德州学院学报*, 21 (4): 12–15]
- Wang XK (2006). *Experiment Principle and Technology of Plant Physiology and Biochemistry*. Beijing: Higher Education Press, 134–136, 280–281, 172–173, 167–168, 169–170 (in Chinese) [王学奎(2006). *植物生理生化实验原理和技术*. 北京: 高等教育出版社, 134–136, 280–281, 172–173, 167–168, 169–170]
- Wei GQ, Zhu ZI, Fang XZ, Li J, Cheng J (2004). The effects of NaCl stress on plant growth, chlorophyll fluorescence characteristics and active oxygen metabolism in seedlings of two cucumber cultivars. *Sci Agric Sin*, 37 (11): 1754–1759 (in Chinese with English abstract) [魏国强, 朱祝军, 方学智, 李娟, 程俊(2004). NaCl胁迫对不同品种黄瓜幼苗生长、叶绿素荧光特性和活性氧代谢的影响. *中国农业科学*, 37 (11): 1754–1759]
- Yamamoto T, Yasuhara A, Shiraishi H, Nakasugi O (2001). Bisphenol A in hazardous waste landfill leachates. *Chemosphere*, 42 (4): 415–418
- Yu KL, Zou J, Zou JH (2010). Effects of cadmium stress on antioxi-

- dant enzyme system and absorption of mineral elements in maize seedlings. *J Agro-Environ Sci*, 29 (6): 1050–1056 (in Chinese with English abstract) [字克莉, 邹婧, 邹金华(2010). 镉胁迫对玉米幼苗抗氧化酶系统及矿质元素吸收的影响. *农业环境科学学报*, 29 (6): 1050–1056]
- Zhang J, Wang L, Li M, Jiao L, Zhou Q, Huang X (2015). Effects of bisphenol A on chlorophyll fluorescence in five plants. *Environ Sci Pollut Res*, 10.1007/s11356-015-5003-8
- Zhang RH, Zheng YJ, Ma GS, Zhang XH, Lu HD, Shi JT, Xue JQ (2011). Effects of drought stress on photosynthetic traits and protective enzyme activity in maize seeding. *Acta Ecol Sin*, 31 (5): 1303–1311 (in Chinese with English abstract) [张仁和, 郑友军, 马国胜, 张兴华, 路海东, 史俊通, 薛吉全(2011). 干旱胁迫对玉米苗期叶片光合作用和保护酶的影响. *生态学报*, 31 (5): 1303–1311]
- Zhou CY, Wu GL, Duan ZQ, Wu LL, Gao YS, Chen KM (2010). H_2O_2 -NOX System: an important mechanism for developmental regulation and stress response in plants. *Chin Bull Bot*, 45 (5): 615–631 (in Chinese with English abstract) [周丛义, 吴国利, 段壮芹, 吴丽丽, 高永生, 陈坤明(2010). H_2O_2 -NOX系统: 一种植物体内重要的发育调控与胁迫响应机制. *植物学报*, 45 (5): 615–631]

Effects of bisphenol A on photosynthesis and antioxidation of maize (*Zea mays*) seedlings

XU Yan-Mei, BEI Li-Xia*, ZHANG Heng, YU Gao-Bo, YANG Ke-Jun, ZHAO Chang-Jiang*, XU Jing-Yu, HE Lin, SHI Xin-Xin, MA Li-Feng, FAN Bo-Wen, LIU Rui

Agricultural College, Key Laboratory of Crop Germplasm Improvement and Cultivation in Cold Regions of Heilongjiang Province Education Department, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing, Heilongjiang 163319, China

Abstract: The wide use of the materials containing bisphenol A (BPA) results in BPA release into the environment and produces safety hazard. Hence, in this study, we supplemented BPA to the root-soaking solution of the hybrid maize variety ‘Zhengdan 958’ and analyzed the effects of BPA on photosynthesis and antioxidation system. The results showed that BPA level below (including) $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ caused an obvious increase in terms of root length, aboveground fresh and dry weight of maize seedlings; while plant height, aboveground fresh and dry weight decreased significantly when BPA was above $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. The inhibition effects increased with increasing BPA concentration, notably leaf relative water content declined significantly under $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BPA treatment. Net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s) and transpiration rate (T_r) elevated under $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BPA treatment; above (including) $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BPA led to a markedly decreasing in P_n , G_s and T_r , but an obvious increase in intercellular carbon dioxide concentration (C_i), which suggested that photosynthesis decline was mainly caused by non-stomatal limitation factors. Above (including) $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BPA, the content of photosynthetic pigments declined. These results implied that the photosynthesis of maize seedlings was sensitive to BPA, but the changes in photosynthetic pigments content was not the main reason for the decline of photosynthesis. Under BPA treatment, MDA content gradually increased and displayed significant difference under $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ BPA, superoxide dismutase (SOD) activity firstly decreased and then increased, and the activities of peroxidase (POD) and catalase (CAT) revealed a promotion to some extent. During the recovery period, the photosynthetic parameters recovered obviously, the MDA content decreased, SOD activity increased, POD activity of changed in wave type. The study implied that the low BPA concentration promoted while high concentration suppressed growth of maize seedlings, which was resulted from the effect of BPA on photosynthesis; on the other hand, BPA treatment resulted in MDA accumulation, caused membrane lipid peroxidation, and increased antioxidant enzyme activity, thus regulated the ROS balance.

Key words: BPA; maize; growth; photosynthesis; antioxidation

Received 2015-06-23 Accepted 2015-12-26

This work was supported by National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2013BAD07B01-05/07), National Natural Science Foundation of China (Grant No. 31101429), Research Project of Science and Technology of Heilongjiang Province of China (Grant No. 12511360), Scientific Research Foundation for the Introduction of Talents (Grant No. 2011) and Graduate Innovation Project of Heilongjiang Bayi Agricultural University (Grant No. Y06).

*Co-corresponding author (E-mail: beilixia@163.com; zhaocj15@126.com).