

DEHP对玉米苗期光合特性及抗氧化能力的影响

李 乔¹, 高志峰¹, 牛春达², 迟海航², 王雁博¹, 杨菁菁¹,
姜佰文², 李 威^{1,2}, 杨德光¹, 郭校男¹,

(1. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030; 2. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030)

摘 要: 以玉米品种郑单 958 为试验材料, 设置空白对照组(CK)及 C1(50 mg/kg)、C2(100 mg/kg)、C3(150 mg/kg) 3 种不同浓度的 DEHP(邻苯二甲酸二乙基己酯)处理玉米幼苗, 对幼苗的生长情况、叶绿素含量、光合特性以及抗氧化酶活性等多个指标进行测定。结果表明, 随着 DEHP 浓度的升高, 玉米幼苗生长发育的抑制作用越明显, 叶片中叶绿素含量、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)显著降低, 胞间二氧化碳浓度(C_i)显著升高, PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)与光合性能指数(PI_{ABS})均呈下降趋势, 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(RuBP 羧化酶)活性与磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEP 羧化酶)活性均显著降低, 超氧化物歧化酶(SOD)活性显著上升, 抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性显著下降, 过氧化物酶(POD)活性呈先上升后下降的趋势, 在 DEHP 浓度为 50 mg/kg 时达最大值。

关键词: 玉米; 邻苯二甲酸二乙基己酯; 光合特性; 抗氧化

中图分类号: S513.01

文献标识码: A

Effects of DEHP on Photosynthetic Characteristics and Antioxidant Capacity of Maize at Seedling Stage

LI Qiao¹, GAO Zhi-feng¹, NIU Chun-da², CHI Hai-hang², WANG Yan-bo¹, YANG Jing-jing¹,
JIANG Bai-wen², LI Wei^{1,2}, YANG De-guang¹, GUO Xiao-nan¹

(1. College of Agronomy, Northeast Agricultural University, Harbin 150030;

2. College of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The maize variety Zhengdan958 was used as the experiment material. Three treatment concentrations of DEHP(diethylhexyl phthalate) were set at C1(50 mg/kg), C2(100 mg/kg), and C3(150 mg/kg) in addition to the control group(CK). The growth of seedlings, chlorophyll concentration, photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities were measured. The results showed that the inhibitory effect on the growth and development of maize seedlings increased with the increasing DEHP concentration; the chlorophyll concentration, net photosynthetic rate(P_n) and transpiration rate(T_r) in leaves decreased significantly; the concentration of carbon dioxide(C_i) between cells increased significantly; and the maximum photochemical efficiency(F_v/F_m) and photosynthetic performance index(PI_{ABS}) of PS II showed a descending trend. The activities of ribulose carboxylase(RuBP carboxylase) and phosphoenolpyruvate carboxylase(PEP carboxylase) decreased significantly. The activity of superoxide dismutase(SOD) increased significantly. The activity of ascorbate peroxidase(APX) decreased significantly. The activity of peroxidase(POD) showed a trend of increasing and then decreasing, reaching maximum value when the concentration of DEHP was 50 mg/kg.

Key words: Maize; Diethylhexyl phthalate; Photosynthetic characteristic; Antioxidant

录用日期: 2022-10-31

基金项目: 国家重点研发计划子项目“白浆土旱田全耕层快速培肥技术研究”(2022YFD1500802-2)、中国科学院战略性先导科技专项子课题“玉米丰产增效农机农艺结合优化施肥地力提升技术”(MDA28100204)、东北农业大学“学术骨干”项目

作者简介: 李 乔(2000-), 女, 硕士, 研究方向为玉米栽培生理。Tel: 13842670347 E-mail: 330208429@qq.com

李 威和杨德光为本文通讯作者。

PAEs(邻苯二甲酸酯)是一种典型的持久性有机污染物和环境激素类污染物^[1],易在人体内蓄积。在塑料制品生产、使用和处理等过程中PAEs极易向环境中释放与迁移,从而进入大气、水和土壤等环境中^[2]。在所有增塑剂中PAEs占70%~80%^[3],全球产量和消费量约每年600万t,中国PAEs的消费量高达220万t^[4]。DEHP(邻苯二甲酸二乙基己酯)是PAEs的一种,由于DEHP可以增加塑料的弹性和韧性,被广泛应用于塑料工业,是增塑剂的主要构成物质,其产量在塑料助剂中居第1位^[5]。

由于近年来农业生产规模的扩大,我国农用地膜的使用非常广泛,DEHP作为地膜的主要构成物质,在使用时会逐渐释放到土壤当中^[6],使得土壤温度、土壤微生物、土壤理化性质等受到极大的影响^[7]。地膜难以降解,残膜在土壤中广泛存在,其积累时间越长对农作物产量的影响越严重。DEHP是一种典型的内分泌干扰物^[8],当DEHP进入作物体内时会对作物产生毒性效应,主要体现在对作物生长发育和生理特性等方面的抑制作用。DEHP具有漂白性,会使植物叶片中的叶绿素含量降低。研究发现,DEHP能够破坏黄瓜的线粒体和叶绿体膜,对叶绿素的合成有抑制作用^[9],能够造成黄瓜的损伤。种植辣椒的土壤被DEHP污染后,辣椒中维生素C的含量和辣椒素的含量明显减少^[10],降低了辣椒的品质。当DEHP达到一定剂量时,会抑制小麦种子的发芽率,影响小麦叶片的正常发育,对其根系的生长产生抑制作用^[11]。

玉米(*Zea mays* L.)是世界上种植最广泛的作物之一,同时是中国最重要的粮食作物、饲料作物、经济作物之一^[12]。目前对DEHP毒性效应的研究大多针对藻类植物、蔬菜及动物,对玉米作物鲜有报道。本试验以玉米幼苗为试验材料,研究不同浓度的DEHP对玉米幼苗的生长发育、光合特性和抗氧化能力的影响,从生理水平揭示其毒性作用机制以及玉米幼苗对DEHP产生的抗性作用,为粮食安全生产提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于温室中进行,玉米试验品种为郑单958。选取饱满且大小一致的种子用1%的NaClO消毒5 min,蒸馏水冲洗干净后放入发芽盒置于人工气候箱中避光发芽24 h。分别称取0、50、100、150 mg的DEHP溶解于少量酒精中,将以上不同浓度的DEHP酒精溶液与1 kg蛭石均匀混合,蛭石中DEHP浓度

即为0、50、100和150 mg/kg,将处理后的蛭石装入塑料盆(高为17 cm,直径为12 cm)中。将塑料盆放置于室外阴凉处3 d,酒精完全挥发后,将发芽一致的种子移入塑料盆内继续培养,并将塑料盆置于光照培养箱中,光强400 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,每天光照16 h,相对湿度约70%,恒温25℃。每隔2 d用Hoagland营养液对玉米幼苗进行浇灌。待玉米幼苗生长至21 d时开始进行指标测定。试验共设置4个处理,分别为空白对照组(CK),DEHP浓度为0;C1,DEHP浓度为50 mg/kg;C2,DEHP浓度为100 mg/kg;C3,DEHP浓度为150 mg/kg。每个处理3次重复。

1.2 测定指标与方法

植株形态指标的测定:在玉米幼苗生长到21 d时,使用直尺对玉米幼苗的根系长度和株高进行测量;用剪刀将每株幼苗的地上部与根部分开,利用电子天平称量玉米幼苗的地上部与根部的鲜重;随后把玉米幼苗的地上部和根部分别装入信封放置于105℃烘箱中杀青,处理30 min后,调节烘箱温度至80℃直到试验样品烘干,称取样品干重。

叶绿素含量的测定:取0.2 g新鲜叶片于90%的丙酮溶液中,避光放置24 h后,叶绿素a和叶绿素b含量利用紫外分光光度计分别在663.2 nm和646.8 nm的波长下测定其吸光值^[13]。

光合参数的测定:选择每种处理长势一致的玉米幼苗,于上午9:00~11:00用光合作用测量系统GFS-3000测定玉米幼苗倒数第二片叶的光合速率。每个处理5次重复,数据处理时选择净光合速率(P_n),胞间二氧化碳浓度(C_i),蒸腾速率(T_r),气孔导度(G_s)进行数据分析。

荧光参数的测定:使用调制式荧光仪测定PS II最大光化学效率 F_v/F_m 。打开测量光,选用事先暗处理20 min后的玉米叶片,测量暗适应下叶片的最小荧光(F_0);打开饱和脉冲光,测量暗适应下叶片的最大荧光(F_m),以上步骤5次重复。计算公式: $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$,结果以所测数据的平均值表示。光合性能指数 PI_{Abs} 参照李鹏民^[14]等的JIP-测定方法进行计算。

光合酶的测定:选取0.5 g新鲜叶片剪碎置于预冷的研钵中,加入预冷的100 mol/L Tris-HCl缓冲液(pH值8.2),放置冰上研磨,将匀浆液倒入离心管中,将离心管于4℃、1500 r/min离心10 min,取上清液备用。1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(RuBP羧化酶)活性测定参照Lilley和Walker的方法^[15],磷酸烯醇式丙酮酸羧化酶(PEP羧化酶)活性测定按照吴敏贤^[16]等的方法。

抗氧化酶的测定:采用硝基四氮唑蓝光还原(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性;采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用分光光度法测定抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。

1.3 数据处理与分析

采用 Microsoft Excel 2019 对数据进行整理,用 SPSS25.0 对数据进行单因素方差分析($P<0.05$),并利用 OriginPro9.0 绘图。

2 结果分析

2.1 DEHP对玉米幼苗生长的影响

由表1可知,DEHP浓度50、100、150 mg/kg处理玉米幼苗后,地上部和根部的鲜重、地上部和根部的

干重、株高和根长均随着DEHP施入量的增加而逐渐降低。与CK组相比,地上部鲜重依次降低33.41%、46.35%和53.30%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$);根部鲜重依次降低45.44%、48.95%和64.39%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$);地上部干重依次降低15.94%、33.01%和36.05%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$);根部干重依次降低47.62%、58.82%和73.94%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。株高依次降低14.36%、18.30%和28.02%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$);根长依次降低6.31%、9.73%和18.07%,其中DEHP浓度为50 mg/kg时与对照组相比差异不显著($P>0.05$),DEHP浓度为100、150 mg/kg时与对照组相比差异均达显著水平($P<0.05$)。

表1 DEHP对玉米幼苗生长的影响
Table 1 Effects of DEHP on the growth of maize seedlings

处 理 Treatment	地上部鲜重 (g/株) Shoot fresh weight	根鲜重 (g/株) Root fresh weight	地上部干重 (g/株) Shoot dry weight	根干重 (g/株) Root dry weight	株 高 (cm) Plant height	根 长 (cm) Root length
CK	6.57±0.21 a	2.48±0.20 a	0.53±0.08 a	0.36±0.04 a	66.23±5.90 a	35.97±5.20 a
C1	4.37±0.15 b	1.35±0.12 b	0.44±0.06 b	0.19±0.05 b	56.73±6.20 b	33.70±4.60 ab
C2	3.52±0.20 c	1.27±0.13 b	0.35±0.04 c	0.15±0.03 c	54.20±5.50 b	32.47±5.20 b
C3	3.07±0.16 d	0.88±0.05 c	0.34±0.07 c	0.09±0.03 d	47.67±4.80 c	29.47±5.10 b

注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 的水平上不同处理间差异显著。下表同。
Note: The different letters indicated significant difference($P<0.05$). The same below.

2.2 DEHP对玉米幼苗叶绿素含量的影响

由表2可知,DEHP浓度50、100、150 mg/kg处理玉米幼苗后,叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿a+b含量均显著低于CK组($P<0.05$)。在C1处理下,与对照组相比,叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b含量依次降低了25.71%、18.81%、24.03%,各处理间差异均达

显著水平($P<0.05$)。在C2处理下,与CK组相比,叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b含量依次降低了35.08%、32.63%、34.48%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。在C3处理下,与CK组相比,叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b含量依次降低了52.22%、42.23%、49.79%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。

表2 DEHP对玉米幼苗叶绿素含量的影响
Table 2 Effects of DEHP on chlorophyll content of maize seedlings

处 理 Treatment	叶绿素a含量 Chlorophyll a content	叶绿素b含量 Chlorophyll b content	叶绿素a+b含量 Chlorophyll a+b content
CK	1.622±0.082 a	0.521±0.033 a	2.143±0.038 a
C1	1.205±0.071 b	0.423±0.025 b	1.628±0.061 b
C2	1.053±0.059 b	0.351±0.024 c	1.404±0.071 c
C3	0.775±0.041 c	0.301±0.026 c	1.076±0.045 d

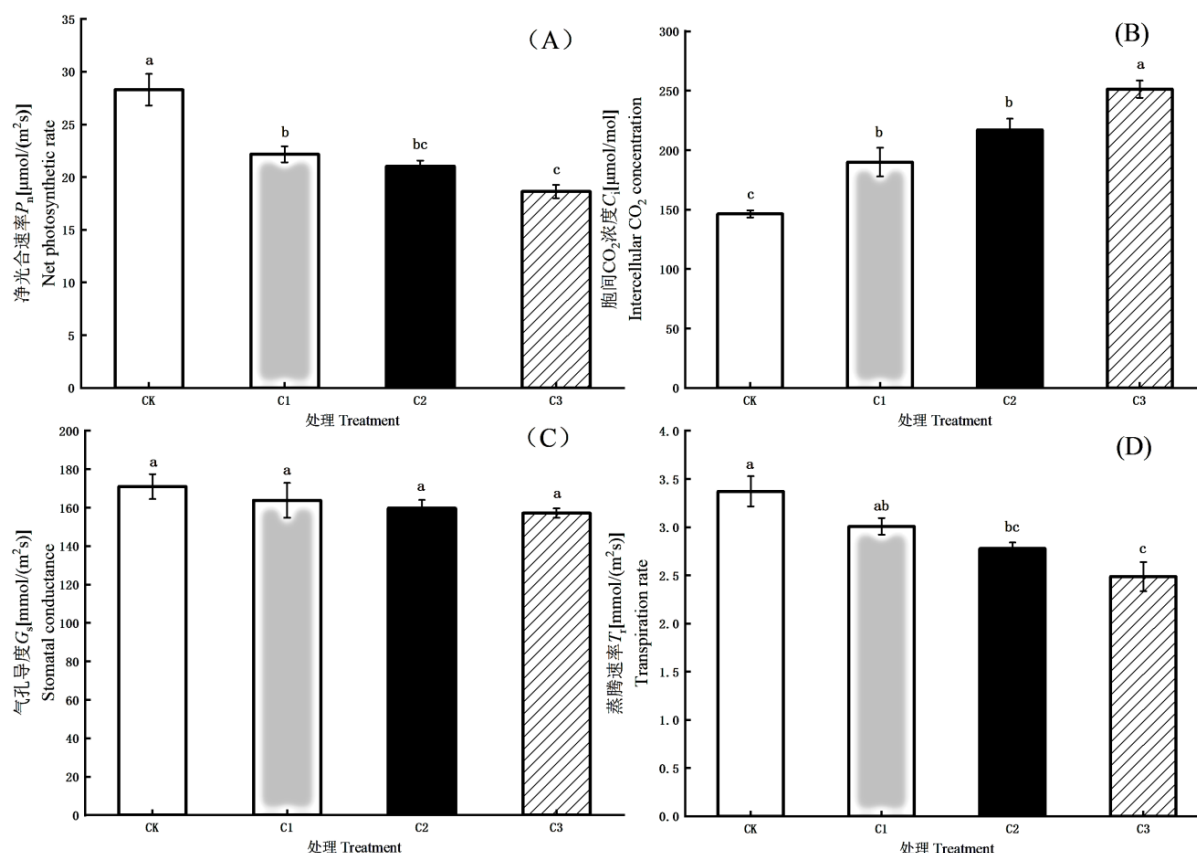
2.3 DEHP对玉米幼苗光合参数的影响

由图1可知, P_n 随DEHP含量的升高而逐渐下降,与CK组相比依次降低了21.97%、22.12%和

34.14%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$); G_i 随DEHP含量的升高而逐渐升高,与CK组相比依次增加了29.77%、48.29%和71.72%,各处理间差异均达

显著水平($P<0.05$); G_s 随着 DEHP 含量升高而略微下降,与 CK 照组相比依次降低了 4.19%、6.58% 和 8.10%,各处理间差异未达显著水平($P>0.05$)。 T_r 随着 DEHP 含量的升高而逐渐下降,依次降低了

10.77%、17.65% 和 26.22%,其中 DEHP 浓度为 50 mg/kg 时与 CK 组相比差异不显著($P>0.05$),DEHP 浓度为 100、150 mg/kg 时与 CK 组相比差异均达显著水平($P<0.05$)。



注:不同小写字母表示在 $P<0.05$ 的水平上不同处理间差异显著。下图同。

Note: The different letters mean significant difference($P<0.05$). The same below.

图1 DEHP对玉米幼苗光合参数的影响

Fig.1 Effects of DEHP on photosynthetic parameters of maize seedlings

2.4 DEHP对玉米幼苗荧光参数的影响

由图2可知,随着 DEHP 浓度升高, F_v/F_m 明显降低。在 C1 处理下, F_v/F_m 比 CK 组降低了 35.41%, 差异未达显著水平($P>0.05$); 在 C2 处理下, F_v/F_m 比 CK 组降低了 55.41%, 差异达显著水平($P<0.05$); 在 C3 处理下, F_v/F_m 比 CK 组降低了 71.56%, 差异达显著水平($P<0.05$)。 PI_{ABS} 随着 DEHP 浓度的升高而急剧下降, 在 C1 处理下, PI_{ABS} 与 CK 组相比降低了 38.37%, 差异达显著水平($P<0.05$); 在 C2 处理下, PI_{ABS} 与 CK 组相比降低了 55.35%, 差异达显著水平($P<0.05$); 在 C3 处理下, PI_{ABS} 与 CK 组相比降低了 74.50%, 差异达显著水平($P<0.05$)。

2.5 DEHP对玉米幼苗光合酶活性的影响

由图3可知,在 DEHP 胁迫处理下, RuBP 羧化酶活性和 PEP 羧化酶活性均逐渐降低。与 CK 组相

比, C1、C2、C3 处理 RuBP 羧化酶活性依次降低了 20.86%、30.41%、45.28%, 各处理间差异均达显著水平($P<0.05$); PEP 羧化酶活性依次降低了 18.14%、31.59%、46.06%, 各处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。

2.6 DEHP对玉米幼苗抗氧化酶活性的影响

由图4所示,随着 DEHP 浓度的增加, SOD 活性逐渐上升, 当 DEHP 浓度为 50 mg/kg 时, SOD 活性降低 1.45%, 与 CK 组相比无明显变化($P>0.05$); 当 DEHP 浓度在 100、150 mg/kg 时, SOD 活性依次上升了 23.72%、61.13%, 各处理间差异均达显著水平($P<0.05$)。随着 DEHP 浓度的增加, POD 活性呈先上升后下降的趋势, 当 DEHP 浓度为 50 mg/kg 时, POD 活性与 CK 组相比增加了 22.05%, 差异达显著水平($P<0.05$); 当 DEHP 浓度为 100、150 mg/kg 时, POD 活性

下降,分别降低了25.75%、23.15%,与CK组相比均达差异显著水平($P<0.05$),DEHP浓度为100、150 mg/kg处理的POD活性差异并不显著($P>0.05$)。不同浓度的DEHP对CAT活性的影响差异不明显,各处理间差异均未达显著水平($P>0.05$)。3种不同浓度的

DEHP对APX活性均有一定的抑制作用,与CK组相比,APX活性依次降低了37.85%、55.60%、53.71%,各处理间差异均达显著水平($P<0.05$),DEHP浓度为100、150 mg/kg处理的APX活性差异不显著($P>0.05$)。

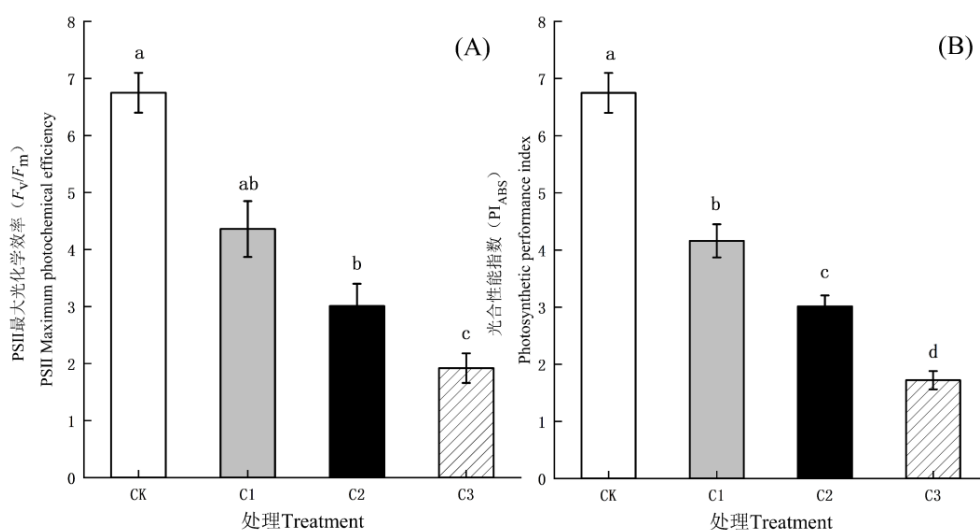


图2 DEHP对玉米幼苗荧光参数的影响

Fig.2 Effects of DEHP on fluorescence parameters of maize seedlings

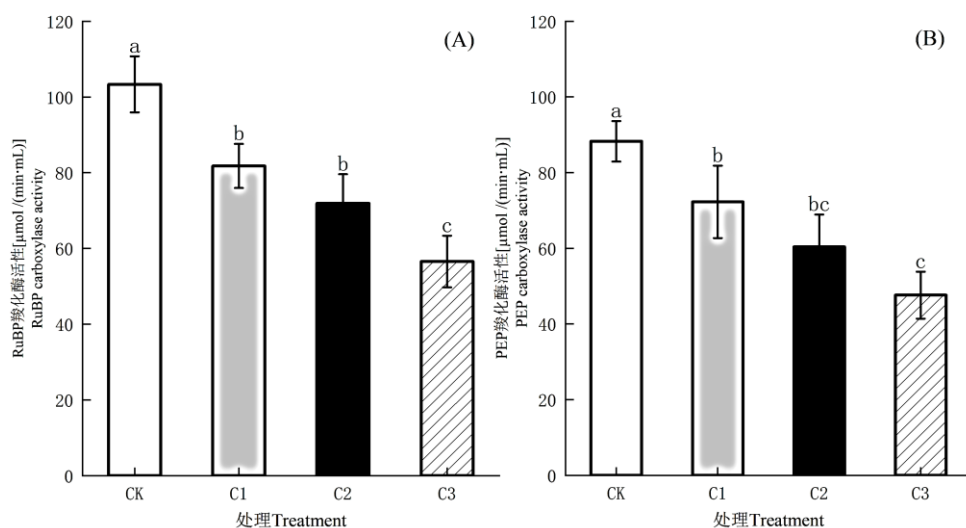


图3 DEHP对玉米幼苗光合酶活性的影响

Fig.3 Effects of DEHP on photosynthetic enzyme activity of maize seedlings

3 结论与讨论

本试验研究发现,玉米幼苗在DEHP胁迫条件下生长受阻,极大地降低了玉米地上部和根部的干鲜重、株高等农艺性状,表明根部干重对DEHP的敏感程度最高,根长敏感程度最低。有研究表明,玉米幼苗在DBP(邻苯二甲酸二丁酯)处理下,其地上部与地下部干重、株高、根长等与对照组相比明显降

低,抑制了玉米幼苗的正常生长发育,并且其抑制作用与DBP浓度正相关^[17]。

叶绿素在玉米幼苗的光合作用中发挥着重要作用,它参与了光的吸收、传递以及原初光化学反应等重要过程^[18]。叶绿素含量的高低能够反应光合作用的强弱,叶绿素的含量越高,在光合作用的第一阶段能够获得的光能就越多,在暗反应中提供的ATP就越多,光合效率就越高。已有研究表明,在DEHP胁迫

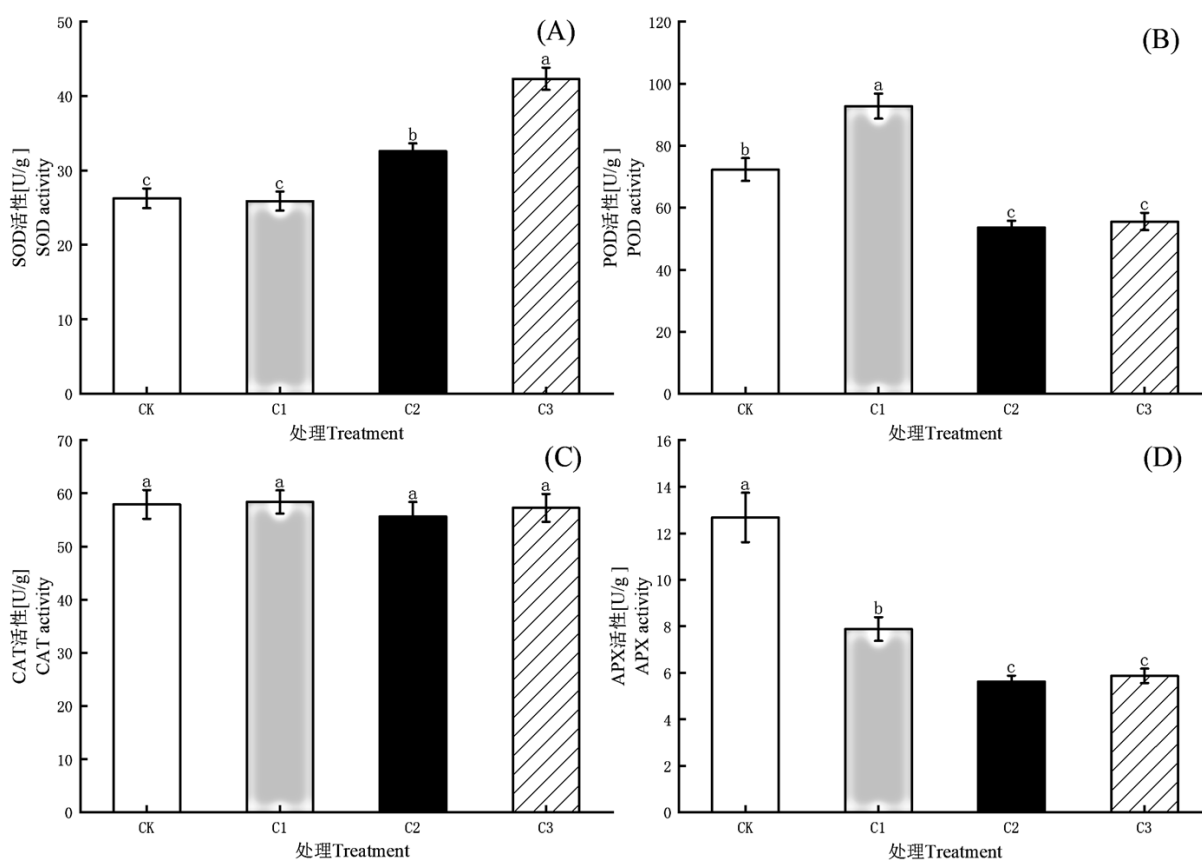


图4 DEHP对玉米幼苗叶片的抗氧化酶活性的影响

Fig.4 Effects of DEHP on antioxidant enzyme activities of maize seedlings

胁迫下小麦的叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量与对照组相比明显下降^[19]。本试验在DEHP处理下玉米幼苗的叶绿素a和叶绿素b的含量明显降低,总叶绿素含量急剧下降,并与对照组相比具有显著性差异($P < 0.05$)。DEHP能够促进叶绿素的分解或抑制叶绿素的合成,影响了玉米幼苗的光合作用,对玉米的生理生化功能产生不利影响,导致其正常生长发育受到抑制作用。

P_n 、 C_i 、 T_r 和 G_s 都是反应植物光合特性的生理指标^[20]。引起 P_n 下降主要有气孔性限制因素与非气孔性限制因素两种原因,气孔性限制因素主要是受气孔导度的影响,其中包括气孔数量、孔径和开张度等多项指标;非气孔性限制因素主要是受到参与光合作用的酶活力以及其他光合组分的影响^[21]。玉米幼苗经DEHP处理后 G_s 略微下降,与对照组相比无显著变化($P > 0.05$), C_i 随着DEHP浓度的上升而显著提高($P < 0.05$)。随着DEHP浓度的增加,光合酶活性呈下降趋势,使细胞同化 CO_2 的能力下降,继而导致细胞间 CO_2 浓度上升,并且 C_i 变化趋势与其他光合参数的变化趋势相反,说明本试验的 P_n 下降是由非气孔性限制因素引起的。同时,在DEHP的胁迫作用

下,玉米幼苗会产生一定的抗逆作用,为了减缓其体内的水分流失速度,玉米幼苗会降低自身的蒸腾速率,避免DEHP对其造成伤害。

叶绿素荧光参数已成为研究各种环境胁迫下植物光合特性的有利方法^[22]。 F_v/F_m 的大小能够表示PS II反应中心内的光能转化效率^[23]。有研究表明, F_v/F_m 在非胁迫条件下无明显变化,在胁迫条件下该参数明显下降^[24]。本试验中,在胁迫下 F_v/F_m 显著降低($P < 0.05$),表明玉米幼苗的PS II受到了严重的损害,使光化学反应的活性下降。 PI_{ABS} 是以吸收光能为基础的性能指数,比 F_v/F_m 能更灵敏地反映光合机构的变化情况。前人研究表明,受不同浓度DEP(邻苯二甲酸二乙酯)胁迫下的黄瓜幼苗 F_v/F_m 和 PI_{ABS} 指标均明显降低。随着DEHP浓度不断升高 PI_{ABS} 显著降低($P < 0.05$),且下降趋势比 F_v/F_m 更加明显,表明在DEHP胁迫下玉米幼苗的光合性能受到了严重损害,PS II反应中心的活性受损,光化学效率降低,这也是导致 P_n 下降的非气孔性限制因素之一。

RuBP羧化酶和PEP羧化酶是光合作用中羧化阶段的关键酶^[25]。王仁雷^[26]在盐胁迫对光合特性的影响中发现,随着NaCl胁迫浓度和时间的增加,

RuBP羧化酶活性下降。董永华^[27]在干旱对玉米幼苗PEP羧化酶活性的影响中发现,在土壤干旱的过程中玉米幼苗的PEP羧化酶活性逐渐下降。在胁迫条件下,光合酶系统受到了一定程度上的损害,导致碳同化速率减缓,继而影响光合作用正常进行。本试验中,随着DEHP浓度的升高,RuBP羧化酶和PEP羧化酶的活性急剧下降,与对照组相比均达差异显著水平($P<0.05$)。

在逆境下,植物体内会通过各种途径产生较多的超氧阴离子自由基,细胞内的活性氧代谢平衡会被打破^[28],为防止活性氧积累过多破坏细胞膜结构,使细胞质膜的通透性改变,植物体内形成了酶促反应和非酶促反应两大类保护系统。酶促反应主要是启动SOD、POD、CAT以清除过多的活性氧,减轻其对细胞的氧化伤害。当酶促反应启动后会诱导酶活性,较高的SOD活性能够催化 $O_2^{\cdot-}$ 与 Fe^{2+} 发生歧化反应生成 H_2O_2 和 $O_2^{[29]}$ 。有研究表明,在PAEs污染条件下,各种植物细胞的活性氧损伤加剧,植物抗氧化酶系统产生应激反应,诱导SOD活性上升^[30]。本研究中,随着DEHP浓度的升高,SOD活性显著上升($P<0.05$)。POD、CAT是直接负责清除 H_2O_2 的关键酶^[31]。本研究中,当DEHP浓度为50 mg/kg时POD活性达最大值;当DEHP浓度在100、150 mg/kg时,POD活性与对照组相比显著降低($P<0.05$),表明此时玉米幼苗细胞在DEHP的胁迫下受到一定的损伤,超过了细胞本身的忍耐极限,其受损程度严重或致凋亡^[32]。随着DEHP浓度的升高,CAT活性无显著变化($P>0.05$),表明玉米幼苗细胞在代谢DEHP过程中,SOD、POD起到主要作用,这两种酶是响应DEHP胁迫的关键酶。非酶促反应主要是在APX的作用下与 H_2O_2 发生反应。随着DEHP浓度的升高,APX活性显著降低($P<0.05$),表明此时DEHP对玉米幼苗胁迫过大,APX活性被抑制。

DEHP作为有机污染物质,会在土壤中累积并残留于作物体内,因此作物的质量安全受到严重影响,对人体健康造成一定危害。本试验研究DEHP对玉米幼苗的光合特性及抗氧化能力的影响,试验结果表明,随着DEHP浓度的升高,叶绿素含量急剧降低,光合系统反应中心活性下降,光化学效率降低,抗氧化酶活性降低,导致玉米幼苗的生长发育受到严重影响。

参考文献:

- [1] 马 军,滕 应,曹雪莹,等. 植烟土壤和烟叶中PAEs的暴露特征及健康风险[J]. 环境科学与技术,2022,45(7):228-236.
- Ma J, Teng Y, Cao X Y, et al. Exposure characteristics and health

- risk of PAEs in soil and tobacco leaf in tobacco-planted soil[J]. Environmental Science & Technology, 2022, 45(7): 228-236. (in Chinese)
- [2] 张欣欣. 地膜残留对土壤和小麦根系邻苯二甲酸酯累积及细菌群落变化的影响[D]. 西北农林科技大学,2022.
- [3] 方 杰. 蔬菜中DEHP含量分析及冬瓜累积DEHP初探[D]. 浙江工商大学,2008.
- [4] Zhang D, Ng E L, Hu W L, et al. Plastic pollution in croplands threatens long term food security[J]. Global Change Biology, 2020, 26.
- [5] 张晶莹,孙 兰,杨岳峰,等. DEHP污染水平及毒性效应研究进展[J]. 中国卫生工程学,2021,20(1):174-176.
- Zhang J Y, Sun L, Yang Y F, et al. Research progress on DEHP pollution level and toxicity[J]. Chin. J. of Public Health Eng., 2021, 20 (1): 174-176. (in Chinese)
- [6] 张 欣. 不同覆膜年限烟田土壤中PAEs积累及其对植物生长的影响[D]. 南京农业大学,2019.
- [7] Carrara S, Morita D M, Boscov M. Biodegradation of di(2-ethylhexyl) phthalate in a typical tropical soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, 197(none): 40-48.
- [8] 陈学斌,赵海明,莫测辉,等. 接种邻苯二甲酸酯(PAEs)降解菌缓解PAEs对玉米胁迫效应和机制研究[J]. 生态环境学报,2017,26 (3):493-499.
- Chen X B, Zhao H M, Mo C H, et al. Alleviation of phthalic acid ester(PAE) stress on maize by inoculating PAEs-degrading strain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(3): 493-499. (in Chinese)
- [9] 张 琦. 生物炭固定化微生物降低DEP对黄瓜幼苗胁迫的研究[D]. 东北农业大学,2021.
- [10] 刘彦爱. 邻苯二甲酸酯在土壤—蔬菜系统中的累积、毒性效应及其生物有效性[D]. 江苏大学,2019.
- [11] 许亚磊. 铁锰氧化物改性生物炭对PAEs污染土壤中小麦生长和品质的影响[D]. 天津工业大学,2021.
- [12] 杨小英,许莹莹,赵美爱,等. 模拟干旱条件下玉米品种萌发期抗旱性评价[J]. 玉米科学,2019,27(6):25-30.
- Yang X Y, Xu Y Y, Zhao M A, et al. Evaluation of drought resistance of different maize varieties under drought stress simulation at germination stage[J]. Journal of Maize Sciences 2019, 27(6): 25-30. (in Chinese)
- [13] Lichtenthaler H K. Chlorophylls and carotenoids: Pigments of photosynthetic biomembranes[J]. Methods in Enzymology, 1987, 148C: 350-82.
- [14] 李鹏民,高辉远,Reito J. Strasser. 快速叶绿素荧光诱导动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2005(6):559-566.
- Li P M, Gao H Y, Strasser R J. Application of the fast chlorophyll fluorescence induction dynamics analysis in photosynthesis study [J]. Journal of Plant Physiology and Molecular Biology 2005(6): 559-566. (in Chinese)
- [15] Lilley R M, Walker D A. An improved spectrophotometric assay for ribulosebiphosphate carboxylase[J]. BBA-Enzymology, 1974, 358 (1): 226-229.
- [16] 吴敏贤,查静娟,陈景治,等. 植物磷酸烯醇式两酮酸羧化酶的

- 研究——VI. 葡萄糖-6-磷酸和甘氨酸对高粱叶片 PEP 羧化酶的稳定效应[J]. 植物生理学报, 1982(1): 9-16.
- Wu M X, Cha J J, Chen J Z, et al. Studies on plant phosphoenolpyruvate carboxylase——VI. stabilizing effect of glucose- 6- phosphate and glycine to sorghum leaf PEP carboxylase[J]. Acta Phytophysiologia Sinica, 1982(1): 9-16. (in Chinese)
- [17] 耿杰. 地膜残留和水分对玉米幼苗生长和产量的影响[D]. 甘肃: 兰州大学, 2018.
- [18] 王红娟, 於春, 路献勇, 等. 不同氮浓度对薏苡幼苗生长和光合特性的影响[J]. 南方农业学报, 2020, 51(8): 1925-1931.
- Wang H J, Yu C, Lu X Y, et al. Effects of different nitrogen concentrations on seedling growth and photosynthetic characteristics of coix[J]. Journal of Southern Agriculture, 2020, 51(8): 1925-1931. (in Chinese)
- [19] 董又铭. 小麦对 PAEs 污染的防御应答机制[D]. 天津工业大学, 2018.
- [20] 韩梦, 张荣, 陈爽, 等. 不同浓度磷对茄子叶片光合及荧光特性的影响[J]. 中国瓜菜, 2019, 32(12): 57-59.
- Han M, Zhang R, Chen S, et al. Effects of different phosphorus on photosynthetic and fluorescence characteristics of eggplant[J]. China Cucurbits and Vegetables, 2019, 32(12): 57-59. (in Chinese)
- [21] Quick W P, Chaves M M, Wendler R. The effect of water stress on photosynthetic carbon metabolism in four species grown under field conditions[J]. Plant, Cell & Environment, 1992, 15(1).
- [22] Govindjee, Papageorgiou G. Chlorophyll a fluorescence: A bit of basics and history[J]. Springer Netherlands, 2004.
- [23] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 等. 小麦不同生育时期 Cd、Cr、Pb 污染监测指标体系[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1845-1852.
- Du T Q, Yang J Z, Hao J P, et al. The pollution monitoring index system of wheat at different growth stages under the stress of Cd, Cr and Pb[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1845-1852. (in Chinese)
- [24] 李贞霞, 李瑞静, 穆娟, 等. 生物质炭对邻苯二甲酸二(2-乙基己基)酯污染土壤中黄瓜幼苗生理特性的影响[J]. 植物生理学报, 2020, 56(1): 73-82.
- Li Z X, Li R J, Mu J, et al. Effects of biochar on physiological characteristics of cucumber seedlings in diethyl hexyl phthalate contaminated soil[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(1): 73-82. (in Chinese)
- [25] 陈展宇, 徐克章, 吴磊, 等. 旱作条件下旱稻和水稻叶片光合特性及 RuBP 羧化酶活性的比较[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(5): 87-91, 98.
- Chen Z Y, Xu K Z, Wu L, et al. Comparison of photosynthetic characteristics and RuBPcase activity between upland rice and rice in leaves under dry cultivation[J]. Journal of Northwest A&F University(Nat, Sci, Ed), 2012, 40(5): 87-91, 98. (in Chinese)
- [26] 王仁雷, 华春, 刘友良. 盐胁迫对水稻光合特性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2002(4): 11-14.
- Wang R L, Hua C, Liu Y L. Effect of salt stress on photosynthetic characteristics in rice[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2002(4): 11-14. (in Chinese)
- [27] 董永华, 史吉平, 韩建民. 干旱对玉米幼苗 PEP 羧化酶活性的影响[J]. 玉米科学, 1995(2): 54-57.
- Dong Y H, Shi J P, Han J M. Effect of soil drought on PEP carboxylase activity in maize seedlings[J]. Journal Maize Sciences, 1995(2): 54-57. (in Chinese)
- [28] 张永平, 刁倩楠, 曹燕燕, 等. 外源 SNP 对低温胁迫下甜瓜幼苗生长和氮代谢相关酶的影响[J]. 分子植物育种, 2022, 20(5): 1692-1698.
- Zhang Y P, Diao Q N, Cao Y Y, et al. Effect of exogenous SNP on the growth and enzymes related to nitrogen metabolism of melon seedlings under cold stress[J]. Molecular Plant Breeding, 2022, 20(5): 1692-1698. (in Chinese)
- [29] 刘丹, 刘美艳, 孙健, 等. 亚精胺提高玉米幼苗抗寒性的研究[J]. 玉米科学, 2021, 29(4): 56-61.
- Liu D, Liu M Y, Sun J, et al. Study on promotion of cold resistance of maize seedlings by spermidine[J]. Journal of Maize Sciences, 2021, 29(4): 56-61. (in Chinese)
- [30] 胡芹芹, 熊丽, 田裴秀子, 等. 邻苯二甲酸二丁酯(DBP)对斜生栅藻的致毒效应研究[J]. 生态毒理学报, 2008(1): 87-92.
- Hu Q Q, Xiong L, Tian P X Z, et al. Toxic effects of dibutyl phthalate(DBP) on *Scenedesmus obliquus*[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008(1): 87-92. (in Chinese)
- [31] Ma S, Guo S, Chen J, et al. Enhancement of salt stressed-cucumber tolerance by application of glucose for regulating antioxidant capacity and nitrogen metabolism[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2019, 100(10).
- [32] 张翠. 典型酞酸酯 DEHP 对小麦的生态毒性效应[D]. 山东: 山东农业大学, 2020.

(责任编辑: 栾天宇)