

四溴乙基环己烷对绿豆种子萌发和幼苗生长的影响

时晓丽, 杨洋, 张会茹, 罗爱国 (晋中学院生物科学与技术系, 山西晋中 030619)

摘要 以绿豆为研究对象, 分别设置 0、60、120、180 $\mu\text{g/L}$ 四溴乙基环己烷 (TBECH) 共 4 个处理, 采用温室水培法在 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下研究 TBECH 对绿豆种子发芽率、发芽势、干重、鲜重及苗期绿豆的株高、根长、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 的活性等生理指标的影响。结果表明, TBECH 能够显著降低苗期绿豆的生物量, 鲜重从 3.75 g 下降至 2.91 g, 干重从 139.25 mg 下降至 75.67 mg, 但对种子发芽率和发芽势无显著影响。TBECH 能够显著抑制绿豆幼苗茎和根的伸长, 180 $\mu\text{g/L}$ TBECH 处理组株高仅是对照组的 63.0%, 主根的长度是对照组的 18.4%, 且 TBECH 对幼苗主根生长的抑制作用高于对茎的抑制, 表明 TBECH 对绿豆具有毒性效应。TBECH 显著提高幼苗中 POD 和 CAT 的活性, 180 $\mu\text{g/L}$ TBECH 处理组幼苗 POD 和 CAT 活性分别是对照组的 2.1 和 3.2 倍, 表明氧化应激可能是导致植物毒性的关键影响因素。

关键词 四溴乙基环己烷; 绿豆; 种子萌发; 幼苗生长; 生理指标

中图分类号 X171.5 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)18-0005-04

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.18.002



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Tetrabromoethylcyclohexane on Seed Germination and Seedling Growth of *Vigna radiata*

SHI Xiao-li, YANG Yang, ZHANG Hui-ru et al (Department of Biological Science and Technology, Jinzhong University, Jinzhong, Shanxi 030619)

Abstract Taking *Vigna radiata* as the research object, four treatments of 0, 60, 120 and 180 $\mu\text{g/L}$ tetrabromoethylcyclohexane (TBECH) were set, respectively. Using greenhouse hydroponics, under the condition of 25 $^{\circ}\text{C}$, the effects of TBECH on the germination rate, germination potential, dry weight, fresh weight of *Vigna radiata* seeds, and the plant height, root length, peroxidase (POD) and catalase (CAT) activities of *Vigna radiata* at seedling stage were studied. The results showed that TBECH could significantly reduce the biomass of *Vigna radiata* at seedling stage, the fresh weight decreased from 3.75 g to 2.91 g, and the dry weight decreased from 139.25 mg to 75.67 mg, but had no significant effect on seed germination rate and germination potential. TBECH could significantly inhibit the elongation of stems and roots of *Vigna radiata* seedlings. The plant height of the 180 $\mu\text{g/L}$ TBECH treatment group was only 63.0% of that of the control group, and the root length of the main root was 18.4% of the control group, and the inhibitory effect of TBECH on the growth of the main root of seedlings was higher than that on the stem, indicating that TBECH was toxic to *Vigna radiata* effect. TBECH significantly increased the activities of POD and CAT in seedlings, and the activities of POD and CAT in the 180 $\mu\text{g/L}$ TBECH treatment group were 2.1 and 3.2 times higher than those in the control group, respectively, indicating that oxidative stress may be a key influencing factor leading to phytotoxicity.

Key words Tetrabromoethylcyclohexane (TBECH); *Vigna radiata*; Seed germination; Seedling growth; Physiological indicators

四溴乙基环己烷 (tetrabromoethylcyclohexane), 又名 1,2-二溴-4-(1,2-二溴乙基)环己烷 (TBECH 或 DBE-DBCH), 是一种被广泛用于泡沫塑料、黏合剂、塑料制品和电力电缆涂料等材料的新型溴代阻燃剂 (NBFRs)。TBECH 被认为是传统溴代阻燃剂多溴联苯醚 (PBDEs) 和六溴环十二烷 (HBCDs) 的潜在替代品^[1]。研究表明, TBECH 具有潜在的环境持久性和长距离迁移性^[2], 其较高的亲脂性 ($\log K_{ow} = 5.24$) 意味着 TBECH 具有潜在的生物富集性和放大性^[3-4]。TBECH 已被美国环保署列入环境关注的化合物^[5]。

截至目前, TBECH 在环境介质^[4]、生物体内^[6]、甚至非职业暴露人群的血清中^[7]被检出。TBECH 的生物毒性效应受到广泛关注。体外试验和对鱼类、鸟类等体内试验研究表明, TBECH 具有内分泌干扰毒性、神经毒性、免疫毒性和肾毒性^[8-12]。此外, TBECH 具有多模式内分泌干扰作用, 包括雌激素、抗雄激素和甲状腺激素等毒性作用^[13-14]。目前关于 TBECH 的毒性效应多集中在水生生物和动物体内。但是, 关于新型溴代阻燃剂 TBECH 对植物毒性的影响才开始受到关注。

土壤是溴代阻燃剂重要的汇, 溴代阻燃剂进入土壤后迅速与土壤有机质结合。因此, 溴代阻燃剂的生物富集与土壤有机质的含量和性质有关^[15]。植物是陆地生态系统的基本生命组成部分, 能够吸收、富集和代谢一定浓度的有机污染物, 如杀虫剂、双酚类似物和阻燃剂等^[16-17]。有机污染物可以通过植物吸收进入食物链, 从而对野生动物和人类健康造成风险。为了更好地了解植物对有机污染物的生化和分子反应, 有必要检测有机污染物的植物毒性。目前, 关于传统溴代阻燃剂 (如 PBDEs) 的植物毒性效应已经有了较为深入的研究。PBDEs 能够诱导植物细胞产生过量活性氧 (ROS), 引起玉米根细胞膜脂过氧化、蛋白羰基化和 DNA 双链断裂等损伤, 影响植物组织和细胞的正常代谢过程, 最终导致植物生长受到抑制甚至死亡^[18-21]。西葫芦和萝卜通过自身吸收转运 PBDEs 到地上部分来减少其在环境中的含量, 提高土壤中 PBDEs 的生物有效性, 进而增加人类暴露风险^[22]。

绿豆 (*Vigna radiata* L.) 属于豆科草本植物, 富含多种营养物质, 且具有强的固氮能力, 可以有效改善土壤肥力, 是我国的主要粮食作物之一。该研究采用绿豆为受试植物, 探究 TBECH 对绿豆种子萌发和幼苗生长的影响, 通过测定种子发芽率、发芽势、干重、鲜重以及幼苗株高、根长、过氧化物酶 (POD) 和过氧化氢酶 (CAT) 的活性来初步研究 TBECH 对绿豆的毒性效应, 为评价 TBECH 对绿豆的毒性作用提供科学

基金项目 山西省基础研究计划青年科学基金项目 (20210302124476); 山西省高等学校科技创新计划项目 (2021L500); 晋中学院技术创新团队建设计划项目 (jzxyjcxtd202109)。

作者简介 时晓丽 (1986—), 女, 山西太原人, 讲师, 博士, 从事生态毒理学研究。

收稿日期 2022-05-04

依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料 供试绿豆为大同小明绿豆种子(购自中国农业科学研究院)。TBECH(纯度>95%)购自上海艾美克生化有限公司。其他试剂购自北京化学试剂公司,均为分析纯。

1.2 绿豆暴露与样品准备 配制不同浓度(0、60、120、180 $\mu\text{g/L}$)的TBECH溶液备用。选择大小相近饱满的绿豆为供试植物。3% H_2O_2 对绿豆种子处理30 min,用蒸馏水进行反复冲洗。

种子暴露:在铺有2层滤纸的培养皿中各放置10粒绿豆种子,并加入25 mL不同浓度暴露液。对照组用等量的去离子水培养,每个处理设置3个平行。将种子置于25 $^{\circ}\text{C}$ 相对空气湿度80%的恒温培养箱中进行避光培养。幼苗暴露:发芽4 d后,将长势均一的绿豆幼苗转移至锥形瓶进行暴露,每瓶放置10颗幼苗,每个处理设置3个平行。置于25 $^{\circ}\text{C}$ 恒温培养箱中培养,白天光照14 h,暗培养10 h。每天更换暴露溶液以消除浓度改变的影响。在每个暴露瓶外部用铝箔包裹以防TBECH发生光解。

1.3 种子发芽率、发芽势的测定 从绿豆暴露第2天起,每天记录露白数、发芽数、根长至种子体长1/2数。分别在第3天和第6天,计算每个处理种子的发芽势和发芽率。

发芽率=第6天供试绿豆种子发芽数/总种子数 $\times 100\%$

发芽势=第3天供试绿豆种子发芽数/总种子数 $\times 100\%$

1.4 种子鲜重和干重的测定

1.4.1 鲜重的测定。发芽试验结束后,定性滤纸吸干水分,用电子天平称量15粒绿豆种子的总鲜重。每个浓度各取3个平行组种子鲜重的平均值。

1.4.2 干重的测定。发芽试验结束后,分别从各组中随机选取5粒绿豆种子,放入电热恒温鼓风干燥箱中于105 $^{\circ}\text{C}$ 下烘15 min后调至80 $^{\circ}\text{C}$ 烘干至绿豆种子恒重,用电子天平称其干重。每个浓度各取3个平行组干重的平均值。

1.5 幼苗株高和根长的测量 选取生长状况良好、长势相似的9株幼苗,连续5 d进行根长、株高的测量。将绿豆植株水平放置,直接用尺子测量株高。由于根部弯曲脆弱故采用细线测量,做好标记后用尺子测量标记长度,观察在不同浓度下绿豆生长状况的变化。

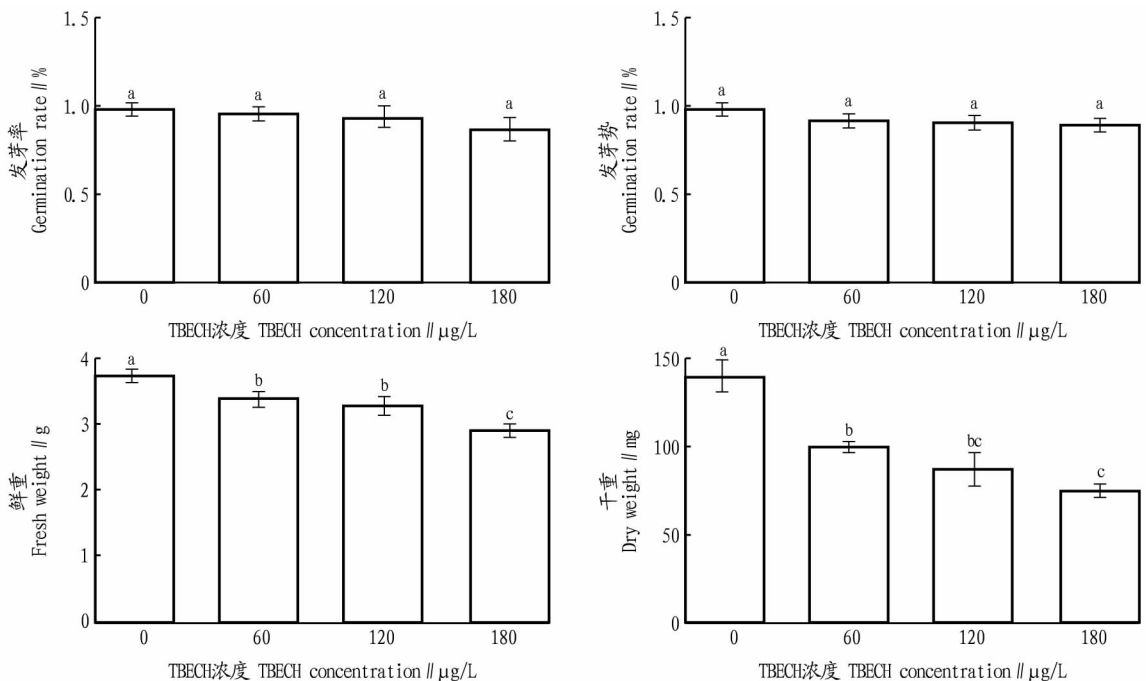
1.6 过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性的测定 用无菌水清洗绿豆幼苗,拭去水分,称取幼苗鲜样0.3 g置于玻璃研磨器中,在冰浴中加少量石英砂,用5 mL KH_2PO_4 将幼苗研磨成匀浆,转入离心管,4 $^{\circ}\text{C}$ 4 000 r/min离心15 min,取上清液,即得到样品粗酶液。

采用Bradford法,以牛血清蛋白为标准测定幼苗中的蛋白含量。采用愈创木酚法测定POD的活性,在470 nm波长下测定其吸光度,根据吸光度计算POD活性。采用紫外吸收法测定CAT活性,在波长240 nm下测定其吸光度,根据吸光度计算CAT活性。

1.7 数据处理与分析 利用GraphPad Prism 5进行统计学分析。数据分析采用多组独立样本(≥ 3)单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示数据具有统计学意义。

2 结果与分析

2.1 TBECH对绿豆种子萌发的影响 暴露于不同浓度TBECH(0、60、120、180 $\mu\text{g/L}$)溶液中绿豆种子的发芽率、发芽势、鲜重和干重见图1。从图1可以看出,随着TBECH浓度的增加,TBECH对种子发芽率和发芽势的影响无显著差



注:不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)

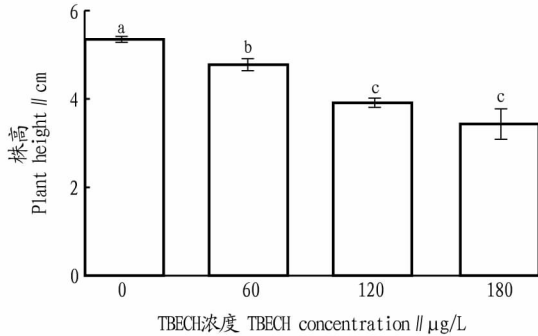
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

图1 不同浓度TBECH对绿豆种子发芽率、发芽势、鲜重和干重的影响

Fig.1 Effects of different concentrations of TBECH on germination rate, germination potential, fresh weight and dry weight of *Vigna radiata* seeds

异。与对照组相比,绿豆种子的鲜重和干重随着 TBECH 浓度的增加而显著下降。在 60~180 $\mu\text{g/L}$,鲜重从 3.37 g 下降到 2.91 g,干重从 100.08 mg 下降到 75.67 mg。

2.2 TBECH 对绿豆幼苗生长的影响 从图 2 可以看出, TBECH 对绿豆幼苗茎的伸长有显著的抑制作用且具有浓度依赖性 ($P < 0.05$)。与对照组相比,当 TBECH 浓度为 180 $\mu\text{g/L}$ 时,株高由 5.4 cm 降低至 3.4 cm,仅为对照组的



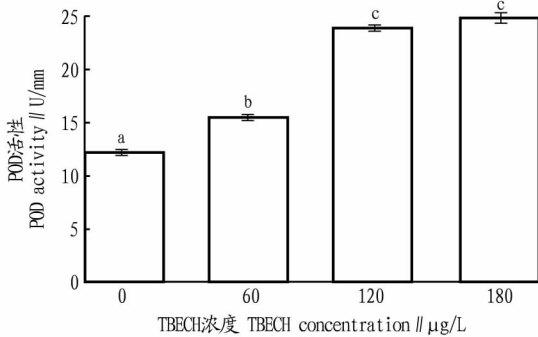
注:不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

图 2 不同浓度 TBECH 对绿豆幼苗株高和根长的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of TBECH on plant height and root length of *Vigna radiata* seedlings

2.3 TBECH 对绿豆幼苗抗氧化酶活性的影响 不同浓度 TBECH 溶液处理绿豆幼苗 5 d 后,测定绿豆幼苗中 2 种抗氧化酶 POD 和 CAT 的活性变化(图 3)。从图 3 可以看出,随着暴露浓度的增加,POD 的活性呈上升趋势;当暴露浓度为 60、120、180 $\mu\text{g/L}$ 时,处理组幼苗 POD 的活性显著升高,分别是对照组的 1.3、2.0 和 2.1 倍 ($P < 0.05$)。CAT 的活性随着



注:不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

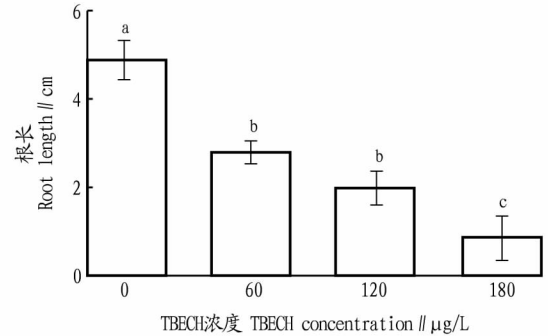
图 3 不同浓度 TBECH 对绿豆幼苗抗氧化酶 POD 和 CAT 活性的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of TBECH on the activities of antioxidant enzymes POD and CAT in *Vigna radiata* seedlings

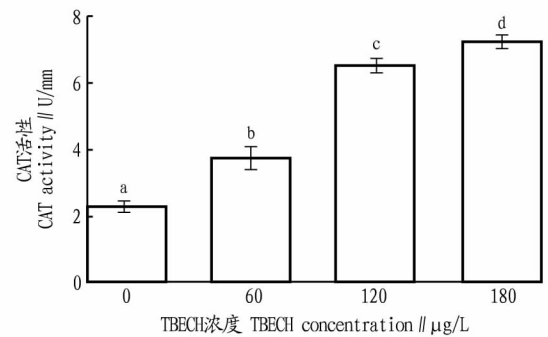
3 小结与讨论

种子萌发期间的生长状况直接影响着植物的生长发育和产量。目前,已有多种苗期生长指标用于研究多溴联苯醚、六溴环十二烷等有机污染物的生态毒理学效应^[18,23]。该研究选用绿豆作为受试植物,研究不同浓度 TBECH 对绿豆种子萌发和幼苗生长的影响。将绿豆种子和幼苗暴露于 0~180 $\mu\text{g/L}$ TBECH 中,发现 TBECH 能够抑制绿豆种子的萌发和幼苗生长;TBECH 能够显著降低种子的鲜重和干重等生物量,但对种子发芽率和发芽势的影响无显著差异。Xu

63.0%。TBECH 处理 5 d 后,根系生长形态出现显著变化。随着暴露浓度的增加,主根和侧根变短,侧根数量减少,且主根出现断裂的情况。TBECH 浓度达到 180 $\mu\text{g/L}$ 时,主根的根长由 4.9 cm 降低至 0.9 cm,是对照组的 18.4% ($P < 0.05$)。TBECH 对幼苗主根生长的抑制作用高于对茎的抑制,可能是由于根部富集的有机污染物浓度较高的原因。



TBECH 暴露浓度的增加而显著升高;浓度为 180 $\mu\text{g/L}$ 时,CAT 的活性达到最大值,是对照组的 3.2 倍。该研究结果表明在最高浓度的 TBECH 处理下,POD 和 CAT 活性显著增加,表明 TBECH 能够诱导绿豆幼苗发生氧化损伤,导致绿豆幼苗生长延迟。



等^[18]研究发现多溴联苯醚 BDE-47、6-OH-BDE-47 和 6-MeO-BDE-47 均能够抑制玉米种子的萌发,暴露浓度为 5 $\mu\text{g/L}$ 时,玉米种子的发芽率分别为 76.2%、73.6%和 66.3%,与该研究的结果不一致。王练书^[24]研究发现 100 mg/kg 高溴代阻燃剂 BDE-209 能够降低玉米的发芽率,与该研究的结果一致。据报道,PBDEs 通过影响植物的结构和功能,破坏色素体膜系统、类囊体、线粒体结构,进而抑制植物的生长发育^[25]。绿豆种子生物量的显著下降表明,TBECH 可能通过种皮渗透进入植物细胞,影响细胞质膜的组分、透性和运

输等,进而损害膜的正常生理功能,破坏细胞的代谢作用。张琼等^[26]研究发现 3 mg/L 4,4'-二溴联苯醚(BDE-15)能够显著降低纤细裸藻的蛋白含量,抑制率达 69.70%。为了抵御 TBEC 的侵害,种子呼吸作用增强,从而进一步影响绿豆的代谢作用。

该研究发现 TBEC 对绿豆幼苗茎的伸长有显著的抑制作用且具有浓度依赖性。当 TBEC 浓度为 180 $\mu\text{g/L}$ 时,株高仅为对照组的 63.0%。随着暴露浓度的增加,主根和侧根变短,侧根数量减少,且主根出现断裂的情况。TBEC 对幼苗主根生长的抑制作用高于对茎的抑制,可能是根部富集的有机污染物浓度较高的原因。Wu 等^[23]研究发现六溴环十二烷(HBCD)能够抑制玉米的生长,HBCD 对根的抑制率(31.94%)显著高于对茎叶的抑制率(11.97%)。玉米地上部分对 β -HBCD 的总富集量低于根部,主要通过根部吸收和茎向传输 2 种方式进行积累^[27]。谢显传^[28]研究发现 100 mg/kg 十溴联苯醚(BDE-209)对黑麦草株高和根长的抑制率均为 25%。李丽华等^[29]研究发现 1 000 mg/kg BDE-209 使紫花苜蓿的根长减小 20.7%,芽长减小 18.3%。赵良元^[30]研究发现 30 mg/kg BDE-209 对水葱产生毒性作用,使水葱的株高和茎粗分别降低 34.4%和 28.1%。以上发现均与该研究的结果一致。植物的根是污染物与植物的第一个接触点,污染物对植物根系生长的抑制作用会影响营养物质在植物内的吸收和运输,进而影响茎的伸长^[31]。

在污染物胁迫下,植物各组织细胞产生的活性氧增加,这是植物中毒的普遍表现^[22,32]。如果不及时清除,会导致脂质过氧化、DNA 损伤和酶活性丧失等效应。植物具有由 POD 和 CAT 组成的抗氧化防御系统,在清除氧化胁迫产生的活性氧方面发挥重要作用^[18]。植物中毒症状较轻时,植物通过增大抗氧化酶活性来清除活性氧。随着中毒症状的加重,植物的生命力快速下降,抗氧化应激能力随之减弱直至消失,抗氧化酶活性出现低促高抑的现象^[33]。在植物体清除 ROS 过程中 POD 和 CAT 起关键作用,POD 和 CAT 催化 H_2O_2 发生歧化反应生成 H_2O 和 O_2 。随着污染物暴露浓度的增加, H_2O_2 水平逐渐升高,最终超过抗氧化酶的清除能力,导致氧化损伤的发生^[32]。抗氧化酶表达水平的改变被认为是 ROS 产物触发氧化应激的指示物^[34]。该研究结果发现幼苗抗氧化酶 POD 和 CAT 的活性随 TBEC 浓度的增加而显著提高,最高浓度 180 $\mu\text{g/L}$ TBEC 的暴露诱导 POD 和 CAT 活性显著增加,分别是对照组的 2.1 和 3.2 倍,表明 TBEC 的胁迫诱导绿豆幼苗发生氧化应激,从而导致绿豆幼苗生长延迟。绿豆为了阻止超氧化物自由基和羟基自由基的形成,激活了绿豆体内的抗氧化酶活性,进而保护细胞膜系统免受损害。孟范平等^[33]研究发现低浓度 2,2',4,4'-四溴联苯醚(BDE-47)(0.1 和 1.0 $\mu\text{g/L}$)处理海水小球藻 24 h 能够诱导其 SOD 和 CAT 酶活性增加,随着暴露时间的延长这 2 种酶的活性受到抑制。BDE-209 处理杂交狼尾草,其 CAT 酶活性也呈现先上升后下降的趋势^[35]。武彤等^[36]研究发现 β -HBCD 能够诱发玉米体内抗氧化酶系统

的应激反应,SOD 和 APX(抗坏血酸过氧化物酶)活性出现先增加后降低的趋势,与该研究的结果不一致。王丹^[37]研究发现 TBEC 能够诱导玉米体内活性氧累积量增多和抗氧化酶 CAT、SOD 和 POD 基因表达上调,与该研究的结果一致。

综上所述,TBEC 对绿豆具有毒性作用,在绿豆种子中,TBEC 能够显著降低种子的鲜重和干重等生物量,但对种子发芽率和发芽势的影响无显著差异。在绿豆幼苗中,TBEC 对绿豆幼苗茎根的伸长有显著的抑制作用且具有浓度依赖性,TBEC 对幼苗主根生长的抑制作用高于对茎的抑制。幼苗抗氧化酶 POD 和 CAT 的活性随 TBEC 浓度的增加而显著提高。氧化应激可能是导致植物毒性的关键因素。该研究为更全面地了解 TBEC 的环境行为和毒性效应提供了有价值的信息。为了阐明 TBEC 对绿豆的致毒机制,今后有必要使用组学技术结合分子生物学手段进行进一步研究。

参考文献

- [1] 王丹,黄红林,吕丽丽,等.四溴乙基环己烷(TBEC)立体异构体的分析方法与环境行为及毒性效应研究进展[J].环境科学研究,2019,32(12):1973-1983.
- [2] ZHAO J P, WANG P, WANG C, et al. Novel brominated flame retardants in West Antarctic atmosphere (2011-2018): Temporal trends, sources and chiral signature[J]. Science of the total environment, 2020, 720: 1-9.
- [3] KURAMACHI H, TAKIGAMI H, SCHERINGER M, et al. Estimation of physicochemical properties of 52 non-PBDE brominated flame retardants and evaluation of their overall persistence and long-range transport potential[J]. Science of the total environment, 2014, 491/492: 108-117.
- [4] MARTEINSON S C, BODNARYK A, FRY M, et al. A review of 1,2-dibromo-4-(1,2-dibromoethyl)cyclohexane in the environment and assessment of its persistence, bioaccumulation and toxicity[J/OL]. Environmental research, 2021, 195[2021-11-15]. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110497>.
- [5] HOH E, HITES R A. Brominated flame retardants in the atmosphere of the East-Central United States[J]. Environmental science & technology, 2005, 39(20): 7794-7802.
- [6] ZHENG G M, WAN Y, SHI S N, et al. Trophodynamics of emerging brominated flame retardants in the aquatic food web of lake Taihu: Relationship with organism metabolism across trophic levels[J]. Environmental science & technology, 2018, 52(8): 4632-4640.
- [7] GUO L C, XIAO J P, ZHANG Y H, et al. Association between serum polybrominated diphenyl ethers, new flame retardants and thyroid hormone levels for school students near a petrochemical complex, South China[J]. Chemosphere, 2018, 202: 476-482.
- [8] MARTEINSON S C, FERNIE K J. Is the current-use flame retardant, DBE-DBCH, a potential obesogen? Effects on body mass, fat content and associated behaviors in American kestrels[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2019, 169: 770-777.
- [9] CURRAN I H A, LISTON V, NUNNIKHOVEN A, et al. Toxicologic effects of 28-day dietary exposure to the flame retardant 1,2-dibromo-4-(1,2-dibromoethyl)-cyclohexane(TBEC) in F344 rats[J]. Toxicology, 2017, 377: 1-13.
- [10] STOJAK B L, VAN GINKEL R A, IVANCO T L, et al. Acute β -tetrabromoethylcyclohexane (β -TBEC) treatment inhibits the electrical activity of rat Purkinje neurons[J]. Chemosphere, 2019, 231: 301-307.
- [11] WANG X, WEI L, WANG Y, et al. Evaluation of development, locomotor behavior, oxidative stress, immune responses and apoptosis in developing zebrafish (*Danio rerio*) exposed to TBEC (tetrabromoethylcyclohexane)[J]. Comparative biochemistry and physiology part C: Toxicology & pharmacology, 2019, 217: 106-113.
- [12] WANG X, WEI L, ZHU J B, et al. Tetrabromoethylcyclohexane (TBEC) exhibits immunotoxicity in murine macrophages[J]. Environmental toxicology, 2020, 35(2): 159-166.

- erance to heat stress involving ROS homeostasis in tomato plants[J]. *BMC plant biology*, 2019, 19(1): 1-13.
- [55] 储成才, 王毅, 王二涛. 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望[J]. *中国科学: 生命科学*, 2021, 51(10): 1415-1423.
- [56] CHARDIN C, SCHENK S T, HIRT H, et al. Review: Mitogen-activated protein kinases in nutritional signaling in *Arabidopsis* [J]. *Plant science*, 2017, 260: 101-108.
- [57] LEI L, LI Y, WANG Q, et al. Activation of MKK9-MPK3/MPK6 enhances phosphate acquisition in *Arabidopsis thaliana* [J]. *New phytologist*, 2014, 203(4): 1146-1160.
- [58] 宋文腾, 马自飞, 史美华, 等. 小麦促分裂原蛋白激酶基因 *TaMAPKK3* 介导植物抵御低磷功能研究[J]. *华北农学报*, 2020, 35(5): 11-16.
- [59] YANG J, XIE M Y, YANG X L, et al. Phosphoproteomic profiling reveals the importance of CK2, MAPKs and CDPKs in response to phosphate starvation in rice [J]. *Plant and cell physiology*, 2019, 60(12): 2785-2796.
- [60] BRAUER E K, AHSAN N, DALE R, et al. The Raf-like kinase *ILK1* and the high affinity K⁺ transporter *HAK5* are required for innate immunity and abiotic stress response [J]. *Plant physiology*, 2016, 171(2): 1470-1484.
- [61] YE L, LI L, WANG L, et al. MPK3/MPK6 are involved in iron deficiency-induced ethylene production in *Arabidopsis* [J]. *Frontiers in plant science*, 2015, 6: 1-10.
- [62] YAO S F, WANG Y X, YANG T R, et al. Expression pattern and function of wheat mitogen-activated protein kinase (MPK) cascade genes under micronutrient-deprived conditions [J]. *Acta physiologiae plantarum*, 2016, 39(1): 1-12.
- [63] LI S, HAN X F, YANG L Y, et al. Mitogen-activated protein kinases and calcium-dependent protein kinases are involved in wounding-induced ethylene biosynthesis in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant cell and environment*, 2018, 41(1): 134-147.
- [64] KOHORN B D, KOHORN S L, TODOROVA T, et al. A dominant allele of *Arabidopsis* pectin-binding wall-associated kinase induces a stress response suppressed by MPK6 but Not MPK3 mutations [J]. *Molecular plant*, 2012, 5(4): 841-851.
- [65] LIU X L, LI J C, XU L P, et al. Expressing *OsMPK4* impairs plant growth but enhances the resistance of rice to the striped stem borer *Chilo suppressalis* [J]. *International journal of molecular sciences*, 2018, 19(4): 1-13.
- [66] GOMI K, OGAWA D, KATOU S, et al. A mitogen-activated protein kinase NtMPK4 activated by SIPKK is required for jasmonic acid signaling and involved in ozone tolerance via stomatal movement in tobacco [J]. *Plant & cell physiology*, 2005, 46(12): 1902-1914.
- [67] LIN H H, KING Y C, LI Y C, et al. The p38-like MAP kinase modulated H₂O₂ accumulation in wounding signaling pathways of sweet potato [J]. *Plant science*, 2019, 280: 305-313.
- [68] 毛倩倩. NRT1.1 和 MPK6 调控植物耐铝胁迫的作用机制 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [69] LIU Y K, LIU L X, QI J H, et al. Cadmium activates ZmMPK3-1 and ZmMPK6-1 via induction of reactive oxygen species in maize roots [J]. *Biochemical and biophysical research communications*, 2019, 516(3): 747-752.
- [70] 林亚蒙. 铝胁迫诱导的小麦苹果酸分泌信号转导通路中 IAA 及 MAPKs 响应机制研究 [D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [71] 林延慧, 唐力琼, 徐靖, 等. 大豆响应耐铝的 MAPK 信号通路相关基因及蛋白的鉴定分析 [J]. *分子植物育种*, 2020, 18(12): 3819-3824.

(上接第 8 页)

- [13] ASNAKE S, PRADHAN A, BANJOP-KHARLYNGDOH J, et al. 1, 2-Dibromo-4-(1, 2-dibromoethyl)cyclohexane (TBECHE)-mediated steroid hormone receptor activation and gene regulation in chicken LMH cells [J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2014, 33(4): 891-899.
- [14] WONG L I L, REERS A R, CURRIER H A, et al. The effects of the organic flame-retardant 1, 2-Dibromo-4-(1, 2-dibromoethyl)cyclohexane (TBECHE) on androgen signaling in human prostate cancer cell lines [J]. *Journal of biochemical and molecular toxicology*, 2016, 30(5): 239-242.
- [15] 杨恩泰. 对土壤中 TBECHE 和 TBCO 异构体及对映体选择性蚯蚓累积、代谢研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2021.
- [16] SUN C L, DUDLEY S, MCGINNIS M, et al. Hydrogen peroxide mediates triclosan-induced inhibition of root growth in wheat seedlings [J]. *Environmental pollution*, 2018, 243: 472-479.
- [17] SUBRAMANIAN S, SCHNOOR J L, VAN AKEN B. Effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) and their hydroxylated metabolites (OH-PCBs) on *Arabidopsis thaliana* [J]. *Environmental science & technology*, 2017, 51(12): 7263-7270.
- [18] XU X H, HUANG H L, WEN B, et al. Phytotoxicity of brominated diphenyl ether-47 (BDE-47) and its hydroxylated and methoxylated analogues (6-OH-BDE-47 and 6-MeO-BDE-47) to maize (*Zea mays* L.) [J]. *Chemical research in toxicology*, 2015, 28(3): 510-517.
- [19] WANG Y, ZHU H W, TAM N F Y. Effect of a polybrominated diphenyl ether congener (BDE-47) on growth and antioxidative enzymes of two mangrove plant species, *Kandelia obovata* and *Avicennia marina*, in South China [J]. *Marine pollution bulletin*, 2014, 85(2): 376-384.
- [20] CHEN J, LI K L, LE X C, et al. Metabolomic analysis of two rice (*Oryza sativa*) varieties exposed to 2, 2', 4, 4'-tetrabromodiphenyl ether [J]. *Environmental pollution*, 2018, 237: 308-317.
- [21] KALLQVIST T, GRUNG M, TOLLEFSEN K E. Chronic toxicity of 2, 4, 2', 4'-tetrabromodiphenyl ether on the marine alga *Skeletonema costatum* and the crustacean *Daphnia magna* [J]. *Environmental toxicology and chemistry*, 2006, 25(6): 1657-1662.
- [22] MUELLER K E, MUELLER-SPITZ S R, HENRY H F, et al. Fate of pentabrominated diphenyl ethers in soil: Abiotic sorption, plant uptake, and the impact of interspecific plant interactions [J]. *Environmental science & technology*, 2006, 40(21): 6662-6667.
- [23] WU T, WANG S, HUANG H L, et al. Diastereomer-specific uptake, translocation, and toxicity of hexabromocyclododecane diastereoisomers to maize [J]. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2012, 60(34): 8528-8534.
- [24] 王练书. 十溴联苯醚在蚯蚓和玉米体内的生物累积特征研究 [D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [25] 孟雨婷, 张卫荣, 汪娟, 等. 多溴联苯醚的植物毒理学研究进展 [J]. *植物生理学报*, 2018, 54(2): 183-191.
- [26] 张琼, 伍琴, 高香玉, 等. 二溴联苯醚对纤细裸藻的生态遗传毒性效应 [J]. *中国环境科学*, 2010, 30(6): 833-838.
- [27] HUANG H L, ZHANG S Z, LV J T, et al. Experimental and theoretical evidence for diastereomer- and enantiomer-specific accumulation and biotransformation of HBCD in maize roots [J]. *Environmental science & technology*, 2016, 50(22): 12205-12213.
- [28] 谢显传. 土壤中十溴联苯醚 (BDE-209) 对赤子爱胜蚓 (*Eisenia fetida*) 和黑麦草 (*Lolium perenne*) 的生物有效性及其生物毒性效应 [D]. 南京: 南京大学, 2010.
- [29] 李丽华, 尹华, 叶锦韶, 等. 十溴联苯醚对紫花苜蓿种子萌发及幼苗的影响 [J]. *环境科学与技术*, 2012, 35(6): 9-14.
- [30] 赵良元. 水生植物水葱对沉积物中十溴联苯醚的修复机制研究 [D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.
- [31] WERNER T, NEHNEVAJOVA E, KÖLLMER I, et al. Root-specific reduction of cytokinin causes enhanced root growth, drought tolerance, and leaf mineral enrichment in *Arabidopsis* and tobacco [J]. *Plant cell*, 2010, 22(12): 3905-3920.
- [32] YANG F L, LI G K, SANG N. The phytotoxicity of agricultural soil samples from a coal gangue stacking area to several maize cultivars (*Zea mays* L.) [J]. *Environmental science and pollution research*, 2021, 28(37): 52319-52328.
- [33] 孟范平, 李卓娜, 赵顺顺, 等. BDE-47 对 4 种海洋微藻抗氧化酶活性的影响 [J]. *生态环境学报*, 2009, 18(5): 1659-1664.
- [34] MYLONA P V, POLIDOROS A N, SCANDALIOS J G. Antioxidant gene responses to ROS-generating xenobiotics in developing and germinated scutella of maize [J]. *Journal of experimental botany*, 2007, 58(6): 1301-1312.
- [35] 吕俊, 尹华, 叶锦韶, 等. 杂交狼尾草对土壤镉/十溴联苯醚复合污染的生理响应及修复 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(12): 2369-2376.
- [36] 武彤, 李蝶, 田柳, 等. β -六溴环十二烷对玉米生长代谢的对映体选择性影响 [J]. *环境化学*, 2022, 41(3): 909-917.
- [37] 王丹. 四溴乙基环己烷 (TBECHE) 异构体和对映体的植物生物过程、毒性效应及其选择性分子机制 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.