农业环境科学学报
JOURNAL OF AGRO-ENVIRONMENT SCIENCE
中文核心期刊/CSCD
请通过网上投稿系统投稿
网址：http://www.aes.org.cn

3种氯代烷基有机磷酸酯对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性效应

刘鹏, 魏歆倪, 石佳悦, 高歌, 祝航, 赵龙, 党秀丽

引用本文:
刘鹏, 魏歆倪, 石佳悦, 等. 3种氯代烷基有机磷酸酯对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3061-3069.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2024-1108

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

不同环数多环芳烃对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性差异
张家乐, 赵龙, 郭军康, 侯红, 林祥龙, 王巍然, 刘玲玲
农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2638-2646 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0307

我国20种典型土壤中锌对白符跳虫的毒性阈值及其预测模型
王巍然, 林祥龙, 赵龙, 张家乐, 樊文华, 侯红
农业环境科学学报. 2021, 40(4): 766-773 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1220

不同形态锑对土壤白符跳(Folsomia candida)的毒性差异
林祥龙, 孙在金, 马瑾, 赵龙, 秦晓鹏, 赵淑婷, 杨侨, 侯红
农业环境科学学报. 2017, 36(4): 657-664 https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1490

镉砷在线蚓中的毒物-毒效动力学过程及定量模拟
李敏, 龚冰, 黄雪莹, 肖雪, 何尔凯, 仇荣亮
农业环境科学学报. 2020, 39(7): 1451-1459 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0209

敌草快对斑马鱼组织损伤及慢性肝脏损害作用
沈文静, 张潇, 赵子昂, 方再光, 谢曦, 王蓉, 胡文婷
农业环境科学学报. 2021, 40(5): 949-956 https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0043

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘鹏，魏歆倪，石佳悦，等. 3种氯代烷基有机磷酸酯对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2025, 44(12): 3061-3069.
LIU P, WEI X N, SHI J Y, et al. Toxic effects of three chlorinated alkyl organic phosphate esters on *Folsomia candida* in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2025, 44(12): 3061-3069.

开放科学OSID

3种氯代烷基有机磷酸酯对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性效应

刘鹏[1,2], 魏歆倪[1], 石佳悦[1], 高歌[2], 祝航[1], 赵龙[2], 党秀丽[1*]

(1.沈阳农业大学土地与环境学院,农业农村部东北耕地保育重点实验室, 土肥资源高效利用国家工程实验室, 沈阳 110866; 2.中国环境科学研究院, 环境健康风险评估与研究中心, 北京 100012)

摘　要:为明确不同氯代烷基有机磷酸酯(OPEs)对土壤无脊椎动物跳虫的毒性差异,以存活率、繁殖数和机体抗氧化酶活性变化为评价终点,研究黑土中3种外源有机磷酸酯[磷酸三(2-氯乙基)酯(TCEP)、磷酸三(2-氯丙基)酯(TCPP)、磷酸三(1,3-二氯-2-丙基)酯(TDCPP)]对模式生物——白符跳(*Folsomia candida*)的毒性效应。结果表明:TCEP和TCPP对白符跳急性毒性(7 d)的半数致死浓度(LC_{50})小于1 000 mg·kg^{-1},而TDCPP对白符跳急性毒性(7 d)的LC_{50}则大于1 000 mg·kg^{-1},TCEP和TCPP的急性毒性高于TDCPP;TCEP、TCPP和TDCPP对白符跳慢性毒性(28 d)的半数效应浓度(EC_{50})分别为52.8、9.0 mg·kg^{-1}和12.3 mg·kg^{-1}。在慢性毒性试验中,TCPP对超氧化物歧化酶(SOD)活性具有显著的诱导作用($P<0.05$),过氧化氢酶(CAT)活性受到TDCPP的影响最大,表现为受到抑制作用($P<0.05$),而TCEP对SOD和CAT活性在低浓度(6 mg·kg^{-1})下具有显著的诱导作用,在高浓度(48 mg·kg^{-1})下具有抑制作用。基于毒性阈值可知,3种氯代烷基有机磷酸酯慢性毒性由大到小为TCPP>TDCPP>TCEP。

关键词:有机磷酸酯;无脊椎动物;毒性效应;酶活性;土壤

中图分类号:X171.5　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1672-2043(2025)12-3061-09　　doi:10.11654/jaes.2024-1108

Toxic effects of three chlorinated alkyl organic phosphate esters on *Folsomia candida* in soil

LIU Peng[1,2], WEI Xinni[1], SHI Jiayue[1], GAO Ge[2], ZHU Hang[1], ZHAO Long[2], DANG Xiuli[1*]

(1. College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Northeast Key Laboratory of Conservation and Improvement of Cultivated Land, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shenyang 110866, China; 2. Center for Environmental Health Risk Assessment and Research, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: To clarify the toxicity differences of different chloroalkyl organic phosphate esters on soil-dwelling invertebrate springtail, survival rates, reproduction number, and changes in antioxidant enzyme activity were measured as the evaluation endpoints to study the toxicity effects of three exogenous organic phosphate esters (tri(2-chloroethyl) phosphate ester (TCEP), tri-(2-chloropropyl) phosphate ester (TCPP), and tri(1, 3-dichloro-2-propyl) phosphate ester (TDCPP)) on model organism *Folsomia candida* in black. The results showed that the LC_{50} (median lethal concentration) of TCEP and TCPP for acute toxicity (7 days) to *Folsomia candida* were less than 1 000 mg·kg^{-1}, respectively, while the LC_{50} of TDCPP exceeded 1 000 mg·kg^{-1}. The EC_{50} (half effect concentration) of TCEP, TCPP, and TDCPP for the chronic toxicity of *Folsomia candida* (28 days) were 52.8, 9.0 mg·kg^{-1}, and 12.3 mg·kg^{-1}, respectively. TCPP had a significant inducing effect on SOD activity ($P<0.05$) in chronic toxicity, and the activity of CAT was most affected by TDCPP, showing an inhibitory

收稿日期:2024-12-18　　**录用日期:**2025-04-09
作者简介:刘鹏(1998—),女,黑龙江大庆人,硕士研究生,主要研究方向为生态毒理学。E-mail:2022220412@stu.syau.edu.cn
***通信作者:**党秀丽　E-mail:dxl@syau.edu.cn
基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3703205)
Project supported: National Key Research and Development Program of China(2022YFC3703205)

effect (P<0.05). TCEP significantly induced the activities of SOD and CAT activity at a low concentration (6 mg·kg^{-1}), while it inhibits them at a high concentration (48 mg·kg^{-1}). The results of this study provide data support and theoretical basis for evaluating the ecological risks of chloroalkyl organic phosphate esters on soil invertebrates. Based on the toxicity thresholds, it can be inferred that the chronic toxicity of the three chloroalkyl organic phosphate esters decreased in the following order: TCPP>TDCPP>TCEP.

Keywords: organic phosphate esters; invertebrate; toxic effects; enzyme activity; soil

有机磷酸酯（OPEs）根据其取代基不同分为烷基、芳香基和卤代烷基磷酸酯。OPEs作为阻燃剂或增塑剂广泛应用于建筑材料、电子产品、塑料制品、家装饰品和纺织品等领域。其中，氯代烷基有机磷酸酯是较常见、浓度较高的一类，主要包括磷酸三（2-氯乙基）酯（TCEP）、磷酸三（2-氯丙基）酯（TCPP）和磷酸三（1，3-二氯-2-丙基）酯（TDCPP）及降解产物。由于OPEs在生产过程中是以物理方式添加至材料，而不是化学方式，因此OPEs极易释放到环境介质中，当前在大气、水体、沉积物、土壤等[1-4]环境介质中均已有检出。有研究表明氯代-OPEs具有神经、致癌和内分泌干扰等生物毒性，且被证实具有致癌性[5-9]，因此，其使用在许多国家和组织中受到限制，例如：欧盟委员会发布《玩具安全指令（Toy Safety Directive）》限制儿童玩具中氯代-OPEs的使用量不超过5 mg·kg^{-1}；美国也限制在住宅软垫家具中使用TCEP和TCPP。土壤是OPEs排放的最终聚集地，OPEs可通过大气沉降、农业塑料薄膜使用、污水灌溉等方式进入土壤并在土壤中富集。因此，加强土壤中OPEs的风险管控变得尤为重要。我国高度重视土壤污染物的治理工作，且已有一些关于土壤OPEs的研究，但这些研究更多的是关注OPEs在土壤中的污染特征及分布，如Ge等[10]发现电子垃圾拆解园内OPEs的含量范围为288~80 300 ng·g^{-1}，其中TCPP的含量为19.1~2 270 ng·g^{-1}，而北方京津冀的农田土壤中OPEs的含量在0.543~54.9 μg·kg^{-1}范围内[11]。另外，塑料回收区域的土壤中OPEs的总含量为38~1 250 ng·g^{-1}，其中TCEP是主要的污染物质，塑料回收作业同样会产生农田土壤OPEs污染[12]。进入土壤的OPEs会在土壤中发生迁移转化，对土壤生物具有潜在影响。有研究表明，氯代OPEs会影响小麦根部的主要代谢途径[13]；白羽扇豆和小麦的水培试验表明，TDCPP的代谢产物可能会转化成具有更强毒性的羟基代谢物[14]。尽管已有研究明确氯代OPEs具有潜在危害性，但我国在《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准（试行）》（GB 15618—2018）中对这一类新型污染物尚未确定筛选值及管制值。

常见的OPEs对土壤无脊椎动物的毒性已引起一定关注，赤子爱胜蚓暴露于TDCPP污染土壤28 d后，蚯蚓体内激素生物合成途径受到影响，导致蚯蚓繁殖受到抑制，繁殖量降低[15]。张梦迪[16]在研究磷酸三苯酯（TPhP）胁迫下赤子爱胜蚓的氧化应激反应中提到，赤子爱胜蚓暴露于TPhP 7、14、21、28 d后，体内超氧化物歧化酶（SOD）和过氧化氢酶（CAT）活性呈现出随暴露时间延长先激活后抑制的趋势。此外，土壤被磷酸三甲苯酯（TCP）污染的情况下，秀丽隐杆线虫体内的SOD活性降低，生殖细胞DNA受到损伤，导致线虫生殖功能受到损伤[17]。目前OPEs对土壤无脊椎动物的毒性研究主要集中于线虫和蚯蚓，而对跳虫的毒性研究较为不足。

白符跳是一种典型的土壤无脊椎动物，对维持正常的土壤结构和养分循环功能有重要作用，因具有繁殖周期短、生长速度快、对化学污染物具有更高的敏感度和耐受性[18]等特性，其已被国际标准组织（ISO）规定为模式生物。然而，有关土壤氯代-OPEs对白符跳的毒理学效应研究相对缺乏，尚无研究揭示氯代OPEs对白符跳分子水平的毒性效应，限制了对氯代OPEs毒性风险的深入认知，不能较好地服务于土壤环境基准研究。因此，本文参照《化学品土壤弹尾目昆虫生殖试验》（GB/T 35522—2017），以白符跳为受试生物，以黑土为供试土壤，开展不同浓度TCEP、TCPP和TDCPP对白符跳的毒性效应，通过测定白符跳存活率、繁殖数和抗氧化酶活性，研究外源OPEs对白符跳生存和繁殖的毒性效应，并进一步探究OPEs对白符跳产生生态毒性的分子机制，所得结果可为土壤OPEs环境健康评估及污染风险管控提供理论依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自吉林省公主岭市农田表层土壤（0~20 cm），土壤类型为黑土。土样自然条件下风干，拣出植物残体和石块，过2 mm筛备用。土壤pH采用电位法测定[19]；土壤电导率（EC）采用电极法测定[20]；

土壤有机质（SOM）采用重铬酸钾容量法测定[21]；土壤经湿式消解法（HF-$HClO_4$-HNO_3）前处理后，使用ICP-MS测定铁（Fe）、锰（Mn）、铝（Al）的含量；土壤阳离子交换量（CEC）采用三氯化六氨合钴浸提-分光光度法测定[22]；土壤碳酸钙含量采用中和滴定法测定[23]；土壤颗粒组成采用激光力度分析仪测定。供试土壤基本理化性质见表1。

1.1.2 供试生物

白符跳由中国科学院南京土壤研究所提供。白符跳培养方法参照ISO标准指南[24]，将白符跳饲养在特制的培养皿中，培养皿底部铺有约0.5 cm厚的培养基（活性炭与熟石膏质量比为1∶9，加入一定量的水混合凝固后使用）。在石膏完全凝固前用药匙在培养基表面划出划痕，便于白符跳产卵。培养过程中采用人工气候箱（SPX-450型，宁波赛福试验仪器有限公司）控制饲养条件，饲养温度（20±1）℃，16 h∶8 h光暗比（光照强度为400~800 lx），湿度75%，干酵母作为食物并添加蒸馏水以保持培养基表面湿润。

正式试验开始前，需要对白符跳进行同龄化培养[25]，将大小相近且活跃度较高的跳虫移植至新的培养皿中产卵，待有少量跳虫孵化后，添加少量食物，培养条件与前述饲养条件相同，在人工气候箱中继续培养7~9 d后，即可供正式试验使用。

1.1.3 供试药品

TCEP购自北京迈瑞达科技有限公司；TCPP购自北京华威锐科化工科技有限公司；TDCPP购自北京百灵威科技有限公司。

1.2 试验设计

土壤中OPEs（TCEP、TCPP和TDCPP）以OPEs-丙酮溶液的形式添加进土壤中，溶剂对照组中仅添加丙酮。试验浓度设定参考《化学品 土壤弹尾目昆虫生殖试验》（GB/T 35522—2017）、OECD 232[26]和张偲等[27]开展的有机磷阻燃剂（OFRs）对白符跳毒性的试验。3种OPEs急性毒性试验浓度分别为0、10、100、1 000 mg·kg^{-1}，慢性毒性试验浓度分别为0、6、12、24、48 mg·kg^{-1}。将外源添加OPEs后的土壤置于通风橱中稳定48 h。土壤中加入适量蒸馏水，维持土壤湿度在最大持水量的60%。

取30 g外源添加OPEs的土壤放入培养罐中，向每个培养罐中加入10只同龄化后的白符跳，添加2 mg干酵母作为白符跳食物，然后用封口膜将培养罐封口并置于人工气候箱中培养，培养条件与白符跳饲养条件相同。急性毒性试验培养7 d，慢性毒性试验培养28 d。在慢性毒性试验中，培养罐每7 d开口通气1次，清除土壤表面杂质，用称质量法补充蒸馏水，补充少量干酵母，并更换封口膜。培养7 d（28 d）后取出培养罐，用水浮法[28]分别计量成虫的存活数和繁殖幼虫的数量，待跳虫浮出水面后拍照，利用Image J软件计量白符跳成虫和幼虫的数量。

1.3 酶液的制备与测定

白符跳组织匀浆液的制备：采用水悬浮法将白符跳分离出来，放入研钵，加少许液氮冷冻，使白符跳快速死亡。用少量质量分数为0.9%的预冷生理盐水清洗跳虫，吸水纸擦干。研钵中加入500 μL生理盐水，跳虫研磨至无可见残体后，放入1.5 mL离心管中，于4 000 r·min^{-1}下离心10 min，上清液即为酶液。取出上清液分装，置于-80 ℃冰箱冷冻，待测[29]。

酶活性测定：SOD活性、CAT活性测定的具体操作和结果计算均根据试剂盒说明书进行，测定方法均为紫外分光光度法[30]。

1.4 数据处理与分析

本研究中白符跳成虫的存活率利用以下公式计算：

$$y = \frac{x}{x_0} \times 100\%$$

式中：y为白符跳成虫存活率，%；x为试验结束后白符跳成虫数，只；x_0为试验初始添加的跳虫数，只。

OPEs对白符跳繁殖的半数效应浓度（EC_{50}）利用以下方程推导：

$$y = \frac{a}{1 + (\frac{x}{x_0})^b}$$

式中：y为不同处理浓度所对应的繁殖数量，只；x为OPEs添加量，mg·kg^{-1}；a为溶剂对照组中白符跳繁殖数量，只；x_0为EC_{50}值，mg·kg^{-1}；b为方程拟合过程中所产生的斜率参数。该方程的拟合利用SigmaPlot 14.0软件完成。

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

pH	电导率 EC/(μS·cm^{-1})	有机质 SOM/(g·kg^{-1})	碳酸钙 $CaCO_3$/(g·kg^{-1})	阳离子交换量 CEC/(cmol·kg^{-1})	Fe/%	Mn/(g·kg^{-1})	Al/%	颗粒组成 Particle composition/%		
								0.002~0.05 mm	<0.002 mm	0.05~2 mm
8.0	180	38.2	24.8	13.1	2.72	0.39	4.01	75.02	14.54	10.44

使用Origin 2021和Excel软件进行所有图表的制作。差异显著性分析采用单因素ANOVA方差分析法。

2 结果与分析

2.1 外源OPEs对白符跳的急性毒性效应

如图1(a)为白符跳暴露在TCEP、TCPP、TDCPP污染土壤中7 d后成虫的存活率。经过7 d的暴露，所有试验溶剂对照组的土壤中白符跳死亡率均低于20%，数据符合ISO国际试验标准[31]，进而保证了试验的有效性。低浓度(10 mg·kg^{-1})暴露下，仅TCPP处理中存活率较溶剂对照组显著下降42.9%(P<0.05)，而TCPP和TDCPP处理无差异(P>0.05)；中浓度(100 mg·kg^{-1})时，TCEP与TCPP处理中存活率与溶剂对照组相比分别降低39.3%和60.7%(P<0.05)，TDCPP组仍无明显变化；高浓度(1 000 mg·kg^{-1})下，TCEP、TCPP和TDCPP处理中，白符跳存活率与溶剂对照组相比均呈现显著性差异(P<0.05)，分别降低了60.7%、92.9%和37.0%，其中TCPP处理中存活率小于10%，急性毒性效果显著。

2.2 外源OPEs对白符跳的慢性毒性效应

2.2.1 对白符跳成虫存活的影响

图1(b)为白符跳暴露于OPEs污染土壤28 d后成虫存活率变化。经过28 d的暴露，溶剂对照组中白符跳成虫死亡率小于20%，保证了试验结果有效性。慢性毒性试验结果表明，白符跳存活率与OPEs浓度之间具有一定的剂量-效应关系。TCEP暴露组中，6 mg·kg^{-1}处理中存活率与溶剂对照组之间未呈现显著差异(P>0.05)，而在48 mg·kg^{-1}处理中存活率显著降低39.3%(P<0.05)。在TCPP处理中，低浓度处理(6 mg·kg^{-1})条件下，白符跳成虫存活率无显著变化(P>0.05)，而当处理浓度升高至12、24、48 mg·kg^{-1}时，白符跳成虫存活率显著降低(P<0.05)，分别下降了20.7%、51.7%、75.9%，最高浓度处理(48 mg·kg^{-1})中存活率趋近于零。TDCPP处理中仅在24 mg·kg^{-1}和48 mg·kg^{-1}时存活率变化显著，分别下降了21.4%和32.1%(P<0.05)。

根据试验结果，运用Sigmaplot推导出TCEP、TCPP和TDCPP在土壤中对白符跳的慢性毒性(存活)阈值(LC_{50})分别为74.5、22.7、158.4 mg·kg^{-1}。3种OPEs在土壤中阈值差异较大，表现为TCPP>TCEP>TDCPP。

2.2.2 对白符跳幼虫繁殖的影响

3种OPEs处理的土壤28 d后白符跳幼虫的数量如图2所示。对存活幼虫的数量进行统计后发现，白符跳的繁殖情况与OPEs的暴露浓度之间呈现出显著的剂量-效应关系。TCEP在6~24 mg·kg^{-1}范围内，白

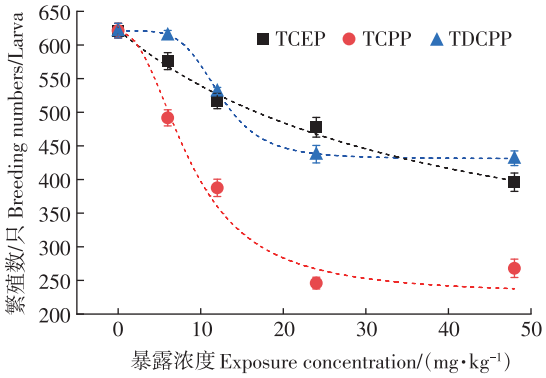


图2 白符跳暴露于OPEs污染土壤28 d后幼虫繁殖数

Figure 2 After 28 days of exposure to OPEs treated soil, the number of larvae reproduction of *Folsomia candida*

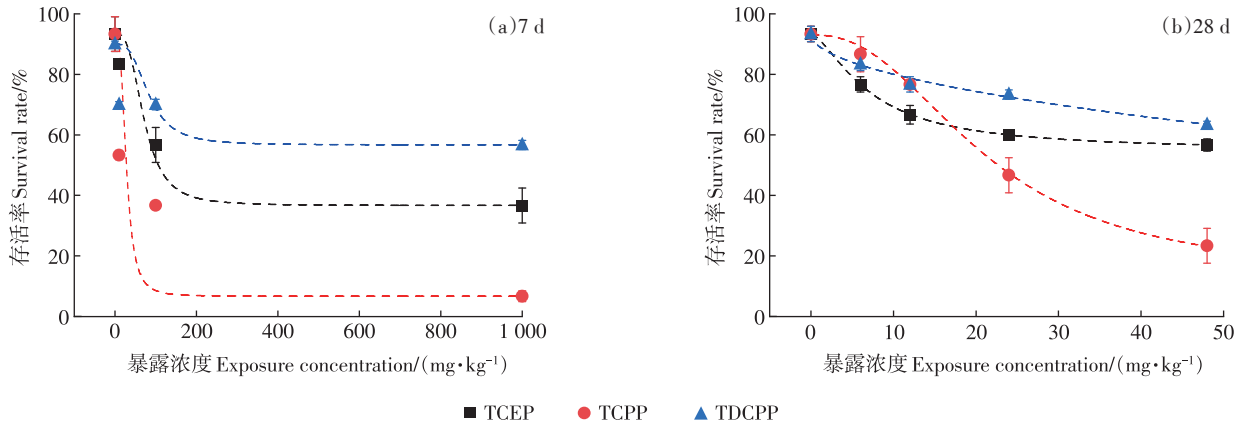


图1 白符跳暴露于OPEs污染土壤7 d和28 d后成虫存活率

Figure 1 Survival rate of adult *Folsomia candida* were exposed to OPEs treated soil for 7 days and 28 days

符跳繁殖数与溶剂对照组相比无显著性差异，但在48 mg·kg^{-1}时，繁殖数显著降低了36.3%（P<0.05），表明TCEP对白符跳存在一定程度的繁殖抑制毒性。TCPP所有浓度处理中，白符跳的繁殖数与溶剂对照组相比均显著降低（P<0.05），下降了18.1%~61.6%，繁殖抑制毒性明显。TDCPP仅在12、24 mg·kg^{-1}和48 mg·kg^{-1}的暴露条件下对白符跳表现出抑制效应（P<0.05），分别下降了14.4%、29.6%和30.5%，TDCPP对白符跳具有轻微的繁殖抑制毒性。

根据试验结果，运用Sigmaplot软件推导出TCEP、TCPP、TDCPP在土壤中对白符跳的慢性毒性（繁殖）阈值（EC_{50}）分别为52.8、9.0、12.3 mg·kg^{-1}，差异较大，慢性毒性由大到小为TCPP>TDCPP>TCEP。

2.3 外源OPEs对白符跳酶活性的影响

2.3.1 对白符跳CAT活性的影响

图3（a）是白符跳暴露于OPEs处理土壤28 d后CAT活性变化。与溶剂对照组相比，TCEP诱导下的CAT活性表现为先诱导后抑制，在6、12、24、48 mg·kg^{-1}暴露浓度下，各处理CAT活性与溶剂对照组之间均表现出显著差异（P<0.05），与溶剂对照组相比升高了30.1%、53.7%、37.6%、26.3%。TCPP暴露下，CAT活性同样表现出先诱导后抑制的变化趋势，在6、12、24、48 mg·kg^{-1}暴露浓度下，CAT活性分别为溶剂对照组的1.5、1.8、1.6、1.5倍（P<0.05），与同样变化趋势的TCEP相比较，TCPP胁迫下诱导效应比TCEP强。而TDCPP则对白符跳CAT活性表现出抑制效应，与溶剂对照组相比，在6、12、24、48 mg·kg^{-1}暴露浓度下CAT活性分别是溶剂对照组的1.7、1.6、1.5、1.4倍（P<0.05）。比较相同浓度TCEP、TCPP与TDCPP发现，低浓度条件下TDCPP处理的白符跳CAT活性高于其他两组，而高浓度条件下TCPP处理的白符跳CAT活性高于其他两组。

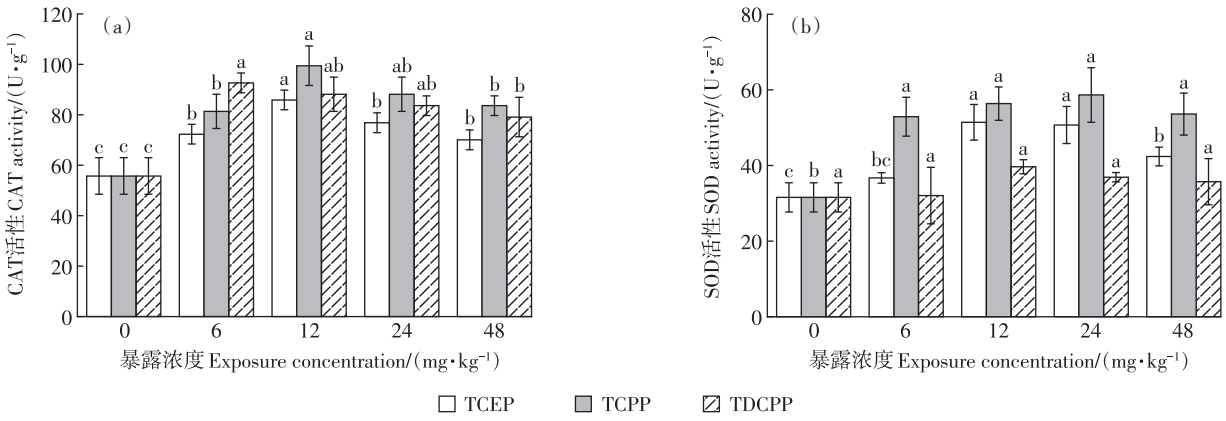
2.3.2 对白符跳SOD活性的影响

白符跳暴露于OPEs处理土壤28 d后SOD活性变化如图3（b）所示。在3种OPEs添加的土壤中，相对于溶剂对照组，各处理中白符跳体内SOD活性均被激活。TCEP和TDCPP暴露条件下，SOD活性随浓度变化先升高后降低，当暴露浓度为12 mg·kg^{-1}时活性最强烈且TCEP暴露条件下SOD活性与溶剂对照组相比差异达到显著水平（P<0.05）。TCPP暴露条件下，SOD活性随TCPP浓度升高而升高，各处理与溶剂对照组相比均表现出显著性差异（P<0.05）。比较相同浓度TCEP、TCPP和TDCPP发现，暴露浓度为最高浓度48 mg·kg^{-1}时，TCPP暴露下白符跳SOD活性均高于其他两组，分别为TCEP和TDCPP的1.3倍和1.5倍。

3 讨论

3.1 外源OPEs对白符跳的急性毒性效应

生物的急性毒性试验可在短时间内通过生物体本身表现以及死亡情况直接反映毒性的大小。从本研究白符跳的急性存活试验来看，TDCPP试验中虽然各处理白符跳存活数与溶剂对照组之间产生显著性差异，但最低存活率仍能达到60%，这可能是由于急性存活试验时间较短，部分白符跳个体虽因OPEs出现导致抗氧化应激体系受到损伤[32]，但并未达到致死程度。TCEP和TCPP急性毒性结果相似，这可能与二者均只含有一个氯取代基（—Cl）有关，相较于TDCPP结构中含有的两个—Cl，TCEP和TCPP在土壤中更易发



不同小写字母表示处理间差异显著（P<0.05）。
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments（P<0.05）.

图3 白符跳暴露于OPEs污染土壤28 d后的CAT和SOD活性变化

Figure 3 Changes in CAT activity and SOD activity in soil treated with OPEs after 28 days of exposure to *Folsomia candida*

生P—O键断裂，还原成二酯或单酯以及相关降解产物[33]，更容易在土壤中被白符跳吸收并在体内积累，从而对白符跳的生理功能造成破坏[34]，急性毒性相较于TDCPP较强。

3.2 外源OPEs对白符跳的慢性毒性效应

通过数据分析可得，慢性毒性试验中，成虫存活与幼虫繁殖两个指标相比较，幼虫繁殖这一指标更敏感，28 d的长期试验更能展现污染物的毒性大小[35]。从OPEs对白符跳的繁殖毒性试验结果来看，白符跳对OPEs的繁殖敏感性高于成虫死亡的敏感性，这与其他污染物的相关研究结果一致，如张家乐等[36]发现，菲和芘处理下白符跳成虫无明显死亡，但对白符跳的繁殖产生较大影响。相较于重金属类污染物，铜胁迫可破坏白符跳肠细胞线粒体的损害，导致细胞组织新陈代谢活性减弱，从而影响跳虫的繁殖[37]，而OPEs可能会对白符跳产卵时间及产卵数量产生一定的影响。有研究表明，暴露于TCEP和TCPP的秀丽隐杆线虫怀卵时间延长12 h，平均产卵数也只是相关溶剂对照组的1/3[38]。另外，经过TDCPP暴露后的斑马鱼也表现出产卵量减少的情况[39]。繁殖过程通常也受到内分泌系统的严格调控。由于OPEs分子结构有差异，其在土壤环境中会发生不同程度的化学转化以及生物转化。进入土壤中的OPEs会在土壤孔隙水的作用下发生水解。OPEs在土壤中的降解产物通常为二酯，相关研究表明一些二酯具有潜在的内分泌干扰毒性，且毒性大于三酯[40]；Zhang等[41]研究发现，双(1-氯-2-丙基)磷酸酯(BCPP)、双(1,3-二氯-2-丙基)磷酸酯(BDCPP)2种OPEs的代谢产物对大鼠的内分泌系统有一定的干扰能力。OPEs的水解速率随侧链长度的增加而降低，这可能是TCEP的繁殖毒性小于其他两种的原因。与多环芳烃(PAHs)毒性随苯环数量增多而增强不同，赵晓蝉[42]在进行OPEs对脂肪酸酰胺酶(FAAH)活性影响试验中发现，OPEs对FAAH活性的抑制效果随烷基链和氯原子的增加而增强，OPEs分子对FAAH酶的毒性主要受空间大小和取代基团种类影响。有关氯代OPEs对白符跳的影响研究十分有限，但从有限的OPEs对生态受体毒性的研究中可以发现，OPEs的毒性和其自身亲疏水性以及土壤的理化性质有关，例如：白符跳繁殖率会随土壤阳离子交换量增加而增加，土壤有机质含量升高有利于白符跳的繁殖[43-44]。另外，pH会影响OPEs在土壤中的化学行为，pH升高，OPEs在介质表面的吸附量增大[45]，从而减少对白符跳等无脊椎动物的伤害。

3.3 白符跳酶活性变化

在生态毒理学研究领域，氧化应激相关标志物检测是一种常用的研究手段，能够用于表征外源污染物给生命体带来的氧化损伤[46]。机体内的SOD可以通过催化歧化反应消除过量活性氧中间体(ROS)，将过量的ROS转化为过氧化氢(H_2O_2)[47]。机体内的CAT可以进一步将H_2O_2分解成为氧气和水，防止细胞内H_2O_2过量，是生物机体抗氧化损伤的第二道防线[48]。机体处于污染物胁迫下时，体内的抗氧化酶活性将因污染物浓度的差异而发生相应变化[49]。

白符跳体内SOD和CAT活性随TCEP浓度升高呈先上升后下降的变化趋势，这可能是机体在低浓度(6 mg·kg^{-1})TCEP的刺激下，产生的ROS激活了SOD和CAT活性以应对氧化应激，随着TCEP浓度升高(48 mg·kg^{-1})，抗氧化酶未能及时清除过多的ROS，多余的ROS与大分子物质结合影响了抗氧化酶活性[50]，引起细胞氧化损伤，这与李倩倩[51]在探究三氯卡班暴露条件下蚯蚓体内酶活性变化趋势时发现的结果相似。石新源[52]研究发现双酚P(BPP)和双酚M(BPM)胁迫下白符跳SOD活性表现出同样的变化趋势。TCPP胁迫下白符跳体内SOD活性随TCPP浓度变化呈现上升趋势，这表明TCPP的试验浓度在白符跳的耐受限度之内，不会对白符跳造成严重的氧化胁迫。TDCPP胁迫下白符跳体内CAT活性却表现为抑制作用，这可能是由于TDCPP影响了CAT活性相关基因的表达。有研究表明抗氧化酶的转录表达主要受核因子红细胞2相关因子2(nuclear factor erythroid 2-related factor 2, Nrf2)与Kelch样ECH关联蛋白1(Kelch-like ECH-associated protein 1, Keap1)(Nrf2-Keap1)信号通路的调控[53]，OPEs可能通过抑制Nrf2-Keap1信号通路降低CAT抗氧化基因的表达效率，当机体受到刺激时，Nrf2活化受到影响，未能与频谱细胞中的启动因子结合，抗氧化因子的基因无法顺利表达，从而抑制了CAT活性[54]。此外，SOD和CAT活性的变化也可能是由于机体受到污染物刺激后，过量产生的H_2O_2损害了机体抗氧化能力，导致酶蛋白酶失活，抑制了SOD和CAT的分解能力[55]。

白符跳的急性、慢性毒性试验是生态风险评价中开发最早的生态毒理学试验，污染物对生物个体的胁迫会影响生物体的代谢及活性氧等有害物质的产生，白符跳体内的CAT、SOD等已被证实可以对杀虫剂、除草剂等污染物做出反应[56]。然而，本研究仅考虑单一污染物暴露场景，未能模拟环境中多污染物共

存的复合效应；其次仅进行单一土壤中OPEs的毒性效应，未考虑不同土壤类型下OPEs的毒性差异；最后，对代谢产物的毒性贡献尚不明确，特别是OPEs最为普遍的二酯类降解产物。后续研究应结合组学技术探究土壤类型、OPEs自身结构与OPEs毒性之间的相关关系。

4 结论

（1）TCEP和TCPP对白符跳的急性毒性的LC_{50}小于1 000 mg·kg^{-1}，而TDCPP对白符跳的急性毒性的LC_{50}大于1 000 mg·kg^{-1}，说明氯取代基数的增加可能使得OPEs的结构相对稳定，降低生物可利用性，使TDCPP的急性毒性无明显变化，但不可忽视慢性毒性风险。

（2）OPEs显著降低了白符跳的繁殖率，TCEP、TCPP、TDCPP对白符跳慢性繁殖的EC_{50}分别为52.8、9.0、12.3 mg·kg^{-1}。3种OPEs慢性毒性由大到小顺序为TCPP>TDCPP>TCEP。TCPP表现出强慢性毒性，而TDCPP的慢性繁殖毒性高于TCEP，这种急慢性毒性顺序的逆转，说明TDCPP和TCPP在长期暴露中，在环境或生物体中的降解能力不同于TCEP，可能通过生成的二酯类产物，对白符跳的繁殖功能产生影响。

（3）TCPP对SOD活性具有显著的诱导作用（$P<0.05$），CAT活性受到TDCPP的影响最大，表现为受到抑制作用（$P<0.05$），而TCEP对SOD和CAT活性在低浓度（6 mg·kg^{-1}）下具有显著的诱导作用，在高浓度（48 mg·kg^{-1}）下具有抑制作用，白符跳抗氧化系统随OPEs浓度变化受到干扰进而引起细胞氧化损伤。

参考文献：

[1] HAN X, HAO Y F, LI Y M, et al. Occurrence and distribution of organophosphate esters in the air and soils of Ny-Ålesund and London Island, Svalbard, Arctic[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 263: 114495.

[2] ZHU K R, SARVAJAYAKESAVALU S, HAN Y N, et al. Occurrence, distribution and risk assessment of organophosphate esters (OPEs) in water sources from northeast to southeast China[J]. *Environmental Pollution*, 2022, 307: 119461.

[3] LIN J N, LIAO L Z, SUN T, et al. Spatial and temporal variability and risk assessment of organophosphate esters in seawater and sediments of the Yangtze River estuary[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2024, 198: 115904.

[4] LIU F, ZHANG R J, LI H L, et al. Distribution and adsorption-desorption of organophosphate esters from land to sea in the sediments of the Beibu Gulf, South China Sea: impact of seagoing river input[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 917: 170359.

[5] DING J J, SHEN X L, LIU W P, et al. Occurrence and risk assessment of organophosphate esters in drinking water from eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 538: 959-965.

[6] 王程强, 钱波, 陆艳玫, 等. 阻燃剂TCPP暴露对小鼠的神经毒理作用观察及相关机制研究[J]. 中国比较医学杂志, 2019, 29(3): 1-6. WANG C Q, QIAN B, LU Y M, et al. Neurotoxic effects and mechanism of flame retardant TCPP exposure on mice[J]. *Chinese Journal of Comparative Medicine*, 2019, 29(3): 1-6.

[7] WANG Q W, LAM J C, MAN Y C, et al. Bioconcentration, metabolism and neurotoxicity of the organophorous flame retardant 1, 3-dichloro 2-propyl phosphate (TDCPP) to zebrafish[J]. *Aquatic Toxicology*, 2015, 158: 108-115.

[8] TAN H L, PENG C F, GUO Y, et al. Organophosphate flame retardants in house dust from south China and related human exposure risks[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2017, 99(3): 344-349.

[9] LV J P, GUO C S, LUO Y, et al. Spatial distribution, receptor modelling and risk assessment of organophosphate esters in surface water from the largest freshwater lake in China[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2022, 238: 113618.

[10] GE X, MA S T, ZHANG X L, et al. Halogenated and organophosphorous flame retardants in surface soils from an e-waste dismantling park and its surrounding area: distributions, sources, and human health risks[J]. *Environment International*, 2020, 139: 105741.

[11] JI Y, WANG Y, YAO Y M, et al. Occurrence of organophosphate flame retardants in farmland soils from northern China: primary source analysis and risk assessment[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 247: 832-838.

[12] HE J H, LI J F, MA L Y, et al. Large-scale distribution of organophosphate esters (flame retardants and plasticizers) in soil from residential area across China: implications for current level[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 697: 133997.

[13] LIU Q, LIU M L, WU S H, et al. Metabolomics reveals antioxidant stress responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) exposed to chlorinated organophosphate esters[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2020, 68(24): 6520-6529.

[14] LIU Q, WANG X L, ZHOU J, et al. Phosphorus deficiency promoted hydrolysis of organophosphate esters in plants: mechanisms and transformation pathways[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(14): 9895-9904.

[15] ZHU Y, ZHANG J Y, LIU Y X, et al. Environmentally relevant concentrations of the flame retardant tris (1, 3-dichloro-2-propyl) phosphate inhibit the growth and reproduction of earthworms in soil [J]. *Environmental Science & Technology Letters*, 2019, 6(5): 277-282.

[16] 张梦迪. 磷酸三苯酯和镉复合作用对蚯蚓的毒性研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2022: 37-39. ZHANG M D. Research of joint toxicity of triphenyl phosphate and cadmium to earthworms[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2022: 37-39.

[17] 唐洁琳, 张红丹, 周沁宇, 等. 磷酸三甲苯酯对秀丽隐杆线虫的生

殖毒性及机制[J]. 环境与职业医学, 2022, 39(5):532-538. TANG J L, ZHANG H D, ZHOU Q Y, et al. Reproductive toxicity and associated mechanism of tricresyl phosphate on *Caenorhabditis elegans*[J]. *Journal of Environmental and Occupational Medicine*, 2022, 39(5):532-538.

[18] FOUNTAIN M T, HOPKIN S P. *Folsomia candida*(Collembola): a "standard" soil arthropod[J]. *Annual Review of Entomology*, 2005, 50: 201-222.

[19] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第2部分:土壤pH的测定:NY/T 1121.2—2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006. Ministry of Agricultural of the People's Republic of China. Soil testing Part 2: method for determination of soil pH:NY/T 1121. 2—2006[S]. Beijing: China Standards Press, 2006.

[20] 中华人民共和国环境保护部. 土壤 电导率的测定 电极法:HJ 802—2016[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2016. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil quality: determination of conductivity: electrode method: HJ 802—2016[S]. Beijing:China Environmental Science Press, 2016.

[21] 中华人民共和国农业部. 土壤检测 第6部分:土壤有机质的测定:NY/T 1121. 6—2006[S]. 北京:中国标准出版社, 2006. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. Soil testing Part 6: method for determination of soil organic matter:NY/T 1121.6—2006 [S]. Beijing:China Standards Press, 2006.

[22] 中华人民共和国环境保护部. 土壤 阳离子交换量的测定 三氯化六氨合钴浸提-分光光度法:HJ 889—2017[S]. 北京:中国环境科学出版社, 2017. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Soil quality: determination of cation exchange capacity (CEC): hexamminecobalt trichloride solution: spectrophotometric method: HJ 889—2017[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2017.

[23] 国家林业局. 森林土壤碳酸钙的测定:LY/T 1250—1999[S]. 北京:中国标准出版社, 1999. Determination of calcium carbonate in forest soil: LY/T 1250—1999[S]. Beijing: China Standards Press, 1999.

[24] OSAGIE E I, OWABOR C N. Adsorption of naphthalene on clay and sandy soil from aqueous solution[J]. *Advances in Chemical Engineering and Science*, 2015, 5(3):345-351.

[25] 林祥龙, 孙在金, 马瑾, 等. 不同形态锑对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性差异[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(4):657-664. LIN X L, SUN Z J, MA J, et al. Toxicity differences of different forms of antimony to soil-dwelling springtail(*Folsomia candida*)[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(4):657-664.

[26] KROGH P H, SCOTTFORDSMAND J J, AHTIANEN J, et al. OECD guidelines for the testing of chemicals, test No. 232: collembolan reproduction test in soil[J]. 2009.

[27] 张偲, 乔敏, 徐玉新. 两种有机磷阻燃剂对土壤跳虫的生态毒性[J]. 环境化学, 2013, 32(3):337-342. ZHANG C, QIAO M, XU Y X. Ecotoxicity of two organophosphorus flame retardants to soil springtails[J]. *Environmental Chemistry*, 2013, 32(3):337-342.

[28] 刘玉荣, 贺纪正, 郑袁明. 跳虫在土壤污染生态风险评价中的应用[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(4):323-330. LIU Y R, HE J Z, ZHENG Y M. A review of application of springtails in ecological risk assessment of contaminated soils[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2008, 3(4):323-330.

[29] 吴若函, 严海娟, 丁悦, 等. 氯虫苯甲酰胺对2种跳虫的繁殖毒性与氧化胁迫[J]. 农药学学报, 2018, 20(5):577-586. WU R H, YAN H J, DING Y, et al. Reproductive toxicity and oxidative stress of chlorantraniliprole to two springtails(Collembola)[J]. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 2018, 20(5):577-586.

[30] 刘曼红, 张译文, 汤颖, 等. Hg^{2+}胁迫对花翅摇蚊(*Chironomus* kiiensis)幼虫组织三种酶活性影响[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(2):61-66. LIU M H, ZHANG Y W, TANG Y, et al. Effect of Hg(Ⅱ) exposure on activities of three enzymes in the larva of *Chironomus* kiiensis[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2016, 47(2):61-66.

[31] International Organization for Standardization. Soil quality: inhibition of reproduction of collembolan(*Folsomia candida*) by soil pollutants [S]. Geneva:International Organization for Standardization, 2014.

[32] 王巍然. 我国典型土壤中铜、锌对白符跳虫的毒性效应及阈值研究[D]. 太谷:山西农业大学, 2021:53. WANG W R. Toxicity effect and threshold of copper and zinc in typical soil of China[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2021:53.

[33] ZHU X F, DENG S F, FANG Y, et al. *Dehalococcoides*-containing enrichment cultures transform two chlorinated organophosphate esters [J]. *Environmental Science & Technology*, 2022, 56(3):1951-1962.

[34] 孟媛. 有机磷酸酯的肺部生物可给性及基于氧化应激/炎症反应的毒性效应研究[D]. 上海:同济大学, 2022:53-57. MENG Y. Pulmonary bioaccessibility and toxicity based on oxidative stress and inflammatory reaction of organophosphate ester[D]. Shanghai: Tongji University, 2022:53-57.

[35] 高金玲. 呋虫胺对白符跳的毒性效应及致毒机理[D]. 哈尔滨:黑龙江大学, 2022: 11-13. GAO J L. Toxic effects and toxicity mechanism of dinotefuran on *Folsomia candida*[D]. Harbin: Helongjiang University, 2022:11-13.

[36] 张家乐, 赵龙, 郭军康, 等. 不同环数多环芳烃对土壤白符跳(*Folsomia candida*)的毒性差异[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12):2638-2646. ZHANG J L, ZHAO L, GUO J K, et al. Toxicity differences of polycyclic aromatic hydrocarbons to soil-dwelling springtail (*Folsomia candida*) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(12):2638-2646.

[37] 李晓勇, 柯欣, 廖剑宇. Cu污染对弹尾目跳虫超显微结构影响的初步研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(1):221-226. LI X Y, KE X, LIAO J Y. Ultrastructure of *Folsomia candida* cell under soil copper contamination[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(1):221-226.

[38] 徐天天. 有机磷阻燃剂对秀丽线虫的慢性毒性:以TCEP和TCPP为例[D]. 上海:华东师范大学, 2017. XU T T. Chronic toxicity of organophosphate flame retardant to *Caenorhabditis elegans*: an example for TCEP and TCPP[D]. Shanghai: East China Normal University, 2017.

[39] LIU X S, JI K, CHOI K. Endocrine disruption potentials of organophosphate flame retardants and related mechanisms in H295R

and MVLN cell lines and in zebrafish[J]. *Aquatic Toxicology*, 2012, 114：173-181.

[40] 田雨欣. 北京城市公园土壤有机磷酸酯赋存状态及其环境风险研究[D]. 北京：中国环境科学研究院, 2023：34-38. TIAN Y X. Study on the occurrence status and environmental risks of organic phosphate esters in soil of Beijing urban parks[D]. Beijing：Chinese Academy of Environmental Sciences, 2023：34-38.

[41] ZHANG Q, YU C, FU L L, et al. New insights in the endocrine disrupting effects of three primary metabolites of organophosphate flame retardants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(7)：4465-4474.

[42] 赵晓婵. 多环芳烃与有机磷酸酯的毒性及对生物酶活性的抑制作用[D]. 太原：太原理工大学, 2020：39-47. ZHAO X C. The toxicity and inhibition on bio - enzyme activity of polycyclic aromatic hydrocarbons and organophosphate esters[D]. Taiyuan：Taiyuan University of Technology, 2020：39-47.

[43] LOCK K, JANSSEN C R. Test designs to assess the influence of soil characteristics on the toxicity of copper and lead to the oligochaete *Enchytraeus albidus*[J]. *Ecotoxicology*, 2001, 10(3)：137-144.

[44] 李彦祺. 闽南地区红壤与水稻土外源硫对土壤动物镉胁迫的影响[D]. 泉州：华侨大学, 2020：30-31. LI Y Q. Effects of exogenous sulfur on cadmium stress of soil animals in red earth and paddy soil in southern Fujian[D]. Quanzhou：Huaqiao University, 2020：30-31.

[45] 姜菁秋, 许宜平, 赵高峰. 新污染物有机磷酸酯生物地球化学过程的研究进展[J]. 环境化学, 2023, 42(8)：2525-2538. JIANG J Q, XU Y P, ZHAO G F. Research progress on biogeochemical process of emerging contaminants organophosphate esters[J]. *Environmental Chemistry*, 2023, 42(8)：2525-2538.

[46] AOUEY B, DERBALI M, CHTOUROU Y, et al. Pyrethroid insecticide lambda-cyhalothrin and its metabolites induce liver injury through the activation of oxidative stress and proinflammatory gene expression in rats following acute and subchronic exposure[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2017, 24(6)：5841-5856.

[47] ZHANG K Y, ZHANG Y H, WANG Y, et al. Synthesis, crystal structure and efficient SOD activity of transition compounds constructed with 5-aminoisophthalic acid ligand[J]. *Polyhedron*, 2019, 160：247-254.

[48] EROL K, CEBECI B K, KÖSE K, et al. Effect of immobilization on the activity of catalase carried by poly(HEMA-GMA) cryogels[J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2019, 123：738-743.

[49] CHATER S, DOUKI T, GARREL C, et al. Cadmium-induced oxidative stress and DNA damage in kidney of pregnant female rats[J]. *Comptes Rendus Biologies*, 2008, 331(6)：426-432.

[50] WU R L, ZHOU T T, WANG J, et al. Oxidative stress and DNA damage induced by trifloxystrobin on earthworms (*Eisenia fetida*) in two soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797：149004.

[51] 李倩倩. 三氯卡班和镉复合作用对蚯蚓的毒性研究[D]. 泰安：山东农业大学, 2020：33-35. LI Q Q. Toxicity of triclocarban and cadmium on earthworms[D]. Tai′an：Shandong Agricultural University, 2020：33-35.

[52] 石新源. 双酚A及其类似物对白符跳虫的毒性与毒理研究[D]. 武汉：华中农业大学, 2022：48-50. SHI X Y. The toxicity and toxicology of bisphenol A and its analogues on *Folsomia candida*[D]. Wuhan：Huazhong Agricultural University, 2022：48-50.

[53] YU X, KENSLER T. Nrf2 as a target for cancer chemoprevention[J]. *Mutation Research*, 2005, 591(1/2)：93-102.

[54] 陈燕燕, 夏道宗. 基于Keap1/Nrf2/ARE信号通路探讨高良姜总黄酮对铅诱导HK-2细胞损伤的保护作用[J]. 中成药, 2024, 46(4)：1135-1142. CHEN Y Y, XIA D Z. Protective effects of total flavonoids from *Alpinia officinarum* on lead-induced HK-2 cell injury *via* Keap1/Nrf2/ARE signaling pathway[J]. *Chinese Traditional Patent Medicine*, 2024, 46(4)：1135-1142.

[55] ZHANG F, HE M Y, ZHANG C L, et al. Combined toxic effects of dioxin-like PCB77 with Fe-based nanoparticles in earthworm *Eisenia fetida*[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 766：144347.

[56] 冯献捷. 不同土壤中多环芳烃(PAHs)对白符跳虫的毒性效应及阈值研究[D]. 南京：南京信息工程大学, 2023：13. FENG X J. Toxic effects and thresholds of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) on *Folsomia candida* in different soils[D]. Nanjing：Nanjing University of Information Science & Technology, 2023：13.

（责任编辑：潘淑君）