2012 年 第 7 卷
第 5 期,525-529

生 态 毒 理 学 报
Asian Journal of Ecotoxicology

Vol. 7, 2012
No.5, 525-529

全氟辛烷磺酸盐(PFOS)对土壤跳虫的生态毒性

张轩[1]，张偲[1,2]，王光鹏[1]，乔敏[1,*]，朱永官[1,3,#]

1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室,北京 100085
2. 山东农业大学资源与环境学院,泰安 271018
3. 中国科学院城市环境研究所,厦门 361021

摘要: 将两种跳虫(Folsomia candida 和 Folsomia fimetaria)暴露在全氟辛烷磺酸盐(perfluorooctane sulfonate, PFOS)污染的人工土壤中,利用跳虫存活数量、繁殖数量与回避行为来评价 PFOS 对跳虫的生态毒性。结果表明,PFOS 对 F. candida 和 F. fimetaria 急性毒性的 LC_{50}(7 d)分别为 4 777 和 2 219 mg•kg^{-1},慢性毒性的 EC_{50}(28 d)分别为 0.13 和 0.05 mg•kg^{-1}。此外,PFOS 对两种跳虫回避行为影响的 EC_{50}(48 h)分别为 0.51 mg•kg^{-1}(F. candida)和 0.31 mg•kg^{-1}(F. fimetaria)。分析比较发现,PFOS 对跳虫急性死亡率影响很小,但对跳虫的回避行为和繁殖率有显著影响,可用来表征土壤中 PFOS 的生态毒性,且选用有性生殖的 F. fimetaria 及其慢性毒性实验来评价土壤中 PFOS 的毒性相对最灵敏。

关键词: 全氟辛烷磺酸; 跳虫; 急性毒性; 慢性毒性; 回避行为

文章编号: 1673-5897(2012)5-525-07　　**中图分类号**: X171.5　　**文献标识码**: A

Ecotoxicity of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) to Springtails in Soils

Zhang Xuan[1], Zhang Cai[1,2], Wang Guangpeng[1], Qiao Min[1,*], Zhu Yongguan[1,3,#]

1. Statr Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China
2. College of Resource and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China
3. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China

Received 30 June 2012　　**accepted** 30 August 2012

Abstract: In this study, two springtail species (Folsomia candida & Folsomia fimetaria) were exposed to soils contaminated with PFOS. Ecotoxicity of PFOS was assessed using the number of survival and reproduction, as well as the avoidance behavior of the springtails. LC_{50} values of PFOS in acute toxicity test were 4 777 and 2 219 mg•kg^{-1} for F. candida and F. fimetaria, respectively. EC_{50} values in chronic reproduction toxicity test were 0.13 and 0.05 mg•kg^{-1} for F. candida and F. fimetaria, respectively, which were 0.51 mg•kg^{-1}(F. candida) and 0.31 mg•kg^{-1}(F. fimetaria) after PFOS affected on avoidance behavior of springtails. Accordingly, the acute toxicity of PFOS to survival of springtails was little, however, avoidance behavior and reproduction of springtails were significantly influenced by PFOS, which can be used to access the toxicity of PFOS in soils. Furthermore, it was sensitive that the chronic reproduction toxicity test of sexual reproduction of springtails F. fime-

收稿日期: 2012-06-30　　**录用日期**: 2012-08-30
基金项目: 国家高技术研究发展计划(863)项目(No. 2012AA06A302); 中国科学院重要方向性项目(KZCX2-YW-Q02-05)
作者简介: 张轩(1986-),男,硕士生,研究方向: 生态毒理学; E-mail: zhangxuan09@mails.gucas.ac.cn;
* **通讯作者**(Corresponding author), E-mail: minqiao@rcees.ac.cn;
#**通讯作者**(Corresponding author), E-mail: ygzhu@rcees.ac.cn

taria can be used to assess the ecotoxicity of PFOS in soil.

Keywords: perfluorooctane sulfonate (PFOS); springtails; acute toxicity; chronic toxicity; avoidance behavior

全氟辛烷磺酸盐(perfluorooctane sulfonate, PFOS)是全氟化合物中重要的代表性物质,因其良好的防水防污性,被广泛应用于纺织品、皮革制品和纸张中[1]。另外,在表面活性剂、洗涤剂、化妆品、医药、涂料和影像材料等生产过程中也均有使用[2]。因其有持久性、生物累积性、生态毒性以及远距离迁移等特性[3,4],已经被列入持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)的名单,PFOS的污染问题已成为环境学和毒理学研究的热点[5]。

由于PFOS在工业生产和日常生活中的广泛应用,全世界范围内大气、水体、底泥和土壤等各种环境介质中均检测到不同浓度水平的PFOS[6-8],在土壤中的含量可达483 ng•g^{-1}[9]。在生物体内同样检测到不同浓度水平的PFOS[10,11],尤其是在人体内也有检出[12,13]。全球范围内PFOS的污染引起了对其生态毒性的广泛关注。国内外利用模式生物对PFOS开展的生态毒理实验已有较多报道,但主要集中在哺乳生物和水生生物方面[14-16],利用土壤生物评价PFOS对土壤环境的影响报道较少,仅有PFOS对蚯蚓毒性的相关研究[17,18]。

跳虫又名弹尾虫(springtails),是弹尾纲(collembolan)生物的俗称,是一种分布极为广泛的土壤节肢动物,与线虫、螨虫共同构成3大土壤动物,在土壤生态系统中扮演重要角色[19,20]。国外利用跳虫这种土壤模式生物开展生态毒理研究较多[21],国内的研究起步较晚,相关报道较少,主要集中在重金属污染土壤方面[22-24]。而伴随着ISO 11267[25]和ISO 11573[26]跳虫毒理实验国际标准的发布,为利用跳虫评价土壤环境中化学品污染提供了指导。本实验选用两种跳虫对土壤环境中的PFOS开展生态毒性研究,获得相关的毒理数据,从而为今后评价PFOS污染土壤的环境风险提供基础数据。

1 材料和方法(Materials and methods)

1.1 仪器与试剂

主要仪器为人工气候箱(三洋MLR-351H),体视显微镜(奥林巴斯SZ61),主要试剂全氟辛烷磺酸钾(纯度≥96%,日本东京化成工业株式会社)。

1.2 实验材料

实验跳虫:分别为孤雌生殖的Folsomia candida,以下简称F. candida,有性生殖的Folsomia fimetaria,以下简称F. fimetaria,均来自挪威国家农业与环境研究所(Bioforsk)。在实验室内培养超过3年,可满足实验要求。

人工土壤:将10%的泥炭(风干,过2 mm筛,无明显植物残体),20%的高岭土(高岭石含量≥30%),70%的石英砂(粒径50~200 μm)搅拌混合均匀,用碳酸钙调节土壤的pH=6.0±0.5。密封室温保存。

1.3 实验方法

1.3.1 跳虫的饲养及同龄化

跳虫以干酵母为食物,饲养在培养皿中,底部有0.5 mm厚的培养基(活性炭:熟石膏=1:9加水搅拌均匀,凝固后使用),培养皿放置在(20±1)℃的人工气候箱中,控制光照与黑暗比为12 h:12 h(光照强度400~800 Lux),空气湿度为(70±5)%。每周向培养皿内加入适量蒸馏水,以补充水分的蒸发量,清除培养基表面的杂质,加入少量干酵母(2~15 mg),培养基每2个月进行一次更换[25]。

跳虫实验前需进行同龄化,以减少跳虫年龄和个体大小的差异对实验的影响。转移约50~60只活跃的成虫至新培养皿中,加入少量干酵母(5 mg),放入人工气候箱中培养,观察到幼虫孵出后,移走成虫,此后第3天将幼虫转移到新培养皿中培养,幼虫即完成同龄化,待适龄(F. candida虫龄为9~12 d,F. fimetaria虫龄为23~26 d)可用于实验。同龄化期间培养条件同前。

1.3.2 急性毒性实验(存活实验)

污染物PFOS设置5个浓度梯度1、10、100、1 000和5 000 mg•kg^{-1},每组处理设置4个重复,对照组为6个重复。每个烧杯(100 mL)中加入30 g人工土壤,将溶于甲醇的PFOS加入到人工土壤中,烧杯放入通风橱内,其中对照组烧杯内只加甲醇作为溶剂对照,放置24 h,待溶剂甲醇完全挥发,每个烧杯内补充蒸馏水至土壤田间持水量的50%,搅拌均匀。将已经同龄化的10只F. candida或者5只雌虫和5只雄虫的F. fimetaria移入烧杯中。烧杯用封口膜封口,放入人工气候箱中培养,培养条件同跳虫饲养条件。跳虫在PFOS污染土壤中暴露7 d后取出用水浮法计量跳虫的数量,观察死亡个数。

1.3.3　回避实验

污染物 PFOS 设置 4 个浓度梯度 0.2、0.4、0.6 和 0.8 mg•kg^{-1},每个处理设置 6 个重复。土壤染毒过程同急性毒性实验相同。用玻璃隔板将回避实验用的培养容器分隔为两部分,两部分分别加入 30 g 污染土壤和对照土壤,补充蒸馏水至土壤田间持水量的 50%,将玻璃隔板取出,将已经同龄化的 20 只 F. candida 或者 10 只雌虫和 10 只雄虫的 F. fimetaria 加到玻璃隔板拿走后留下的缝隙中。盖上培养容器的盖子,放入人工气候箱中培养,培养条件同跳虫饲养条件。48 h 后取出培养容器,插入玻璃隔板,将两部分土壤分别取出用水浮法计量跳虫数量[26]。回避率的计算方法如下: $x = n_c/N \times 100\%$ (x 为回避率; n_c为对照土壤中跳虫数量; N 为加入土壤中的跳虫总数)。

1.3.4　慢性毒性实验(繁殖抑制实验)

为更好地表征 PFOS 对两种跳虫的慢性毒性作用,根据预实验结果污染物 PFOS 对两种跳虫设置不同的浓度梯度,针对 F. candida 设置 4 个浓度梯度 0.05、0.2、0.4 和 1 mg•kg^{-1},针对 F. fimetaria 设置 4 个浓度梯度 0.05、0.1、1 和 10 mg•kg^{-1},每组处理设置 4 个重复,对照组为 6 个重复。土壤染毒过程同急性毒性实验。然后将已经同龄化的 10 只 F. candida 或者 10 只雌虫和 10 只雄虫的 F. fimetaria 移入烧杯中,加入 5 mg 干酵母作为跳虫的食物。烧杯用封口膜封口,放入人工气候箱中培养,培养条件同跳虫的饲养条件。每周开口通气,清除土壤表面的杂质,补充 1 mL 蒸馏水,补充少量干酵母(2 mg)。F. candida 在暴露 28 d 后取出用水浮法计量跳虫数量。F. fimetaria 在暴露 21 d 后取出用水浮法计量跳虫的数量[25]。

1.4　数据处理

采用 Excel 和 SPSS 软件对实验数据进行分析,分析结果用平均值 ± 标准差表示。

2　结果(Results)

2.1　急性毒性实验

由图 1 可知,F. candida 在低浓度 PFOS 条件下,存活数量没有显著性差异。随着 PFOS 浓度的增加跳虫死亡数增加,存活数减少。在 1 000 和 5 000 mg•kg^{-1}处理条件下,跳虫存活数与对照土中跳虫存活数有显著性差异($p < 0.05$)。在 5 000 mg•kg^{-1}处理条件下,跳虫死亡数达到最高,仅有 5 只跳虫存活。利用 SPSS 计算跳虫死亡率为 50% 时,PFOS 对 F. candida 的半数致死浓度 LC_{50}为4 777 mg•kg^{-1}。PFOS 对 F. candida 的急性毒性较小。

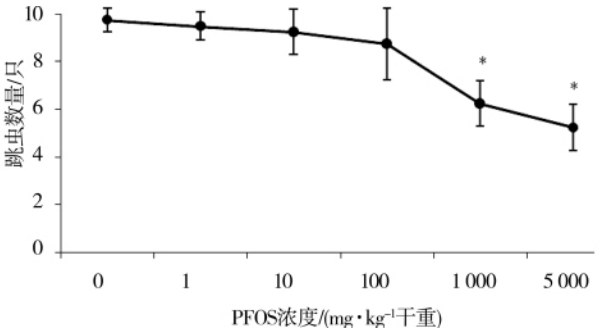

图 1　跳虫 *F. candida* 在 PFOS 污染土壤中暴露 7 d 后存活数($p < 0.05$)

Fig. 1　Number of survived F. candida exposed to PFOS-contaminated soil for 7 d

由图 2 可知,F. fimetaria 在低浓度 PFOS 条件下,存活数量同样没有显著性差异。随着 PFOS 浓度的增加跳虫死亡数增加,存活数减少。在 1 000 和 5 000 mg•kg^{-1}处理条件下,跳虫存活数与对照土中跳虫存活数有显著性差异($p < 0.05$)。在 5 000 mg•kg^{-1}处理条件下,跳虫死亡数达到最高,几乎全部死亡。利用 SPSS 计算跳虫死亡率为 50% 时,PFOS 对 F. fimetaria 的半数致死浓度 LC_{50}为 2 219 mg•kg^{-1}。PFOS 对 F. fimetaria 急性毒性较小。

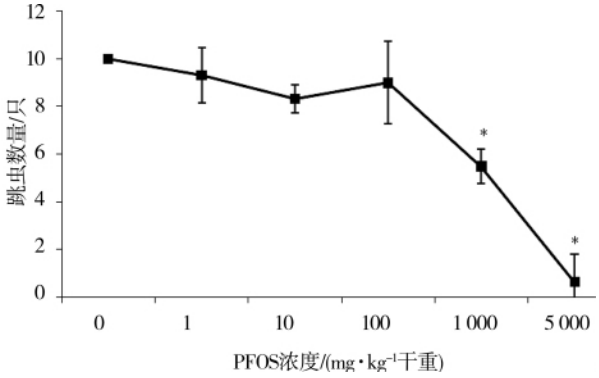

图 2　跳虫 *F. fimetaria* 在 PFOS 污染土壤中暴露 7 d 后存活数($p < 0.05$)

Fig. 2　Number of survived F. fimetaria exposed to PFOS-contaminated soil for 7 d

PFOS 对两种跳虫均产生较小的急性毒性。但通过比较两者的 LC_{50},发现 PFOS 对 F. fimetaria 的急性毒性要大于 F. candida。F. fimetaria 对于 PFOS

的急性毒性作用要更加灵敏。

2.2 回避实验

由图3可知,随着PFOS浓度的增加,F. candida的回避率逐渐提高,在0.8 mg•kg^{-1}处理时达到最高回避率82%。在0.6和0.8 mg•kg^{-1}处理条件下,回避率均超过70%,跳虫表现出显著的回避行为。利用SPSS计算回避实验中PFOS对F. candida的半数效应浓度EC_{50}为0.51 mg•kg^{-1}。PFOS可促使F. candida产生明显的回避行为,利用跳虫的回避行为可以表征PFOS对跳虫的生态毒性。

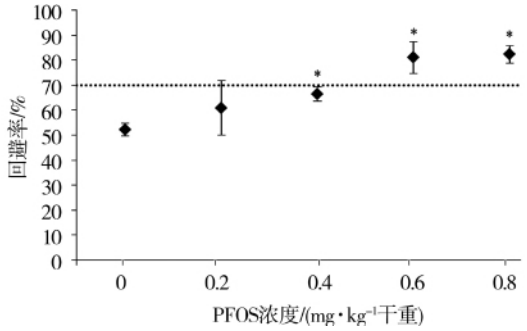

图3 F. candida在PFOS污染土壤中暴露48 h的回避行为

Fig. 3 Avoidance behavior of F. candida exposed to PFOS-contaminated soil for 48 h

由图4可知,随着PFOS浓度的增加,F. fimetaria的回避率逐渐提高,在0.4 mg•kg^{-1}处理条件下就表现出明显的回避行为,回避率高达87%,随后在0.6和0.8 mg•kg^{-1}处理条件下,跳虫的回避率也均超过70%,表现出显著的回避行为。使用SPSS计算回避实验中PFOS对F. fimetaria的半数效应浓度EC_{50}为0.31 mg•kg^{-1}。利用F. fimetaria的回避行为同样可以表征PFOS对跳虫的生态毒性。

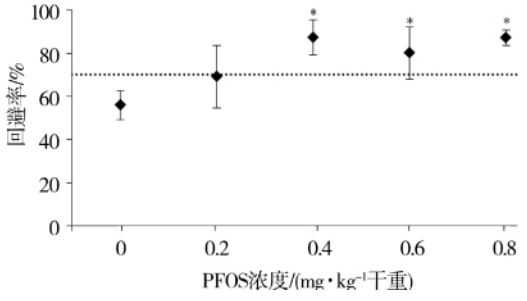

图4 F. fimetaria在PFOS污染土壤中暴露48 h的回避行为

Fig. 4 Avoidance behavior of F. fimetaria exposed to PFOS-contaminated soil for 48 h

在PFOS污染的土壤中,两种跳虫的回避行为有所不同。F. fimetaria在PFOS较低的浓度条件下就达到了70%以上的回避率。比较两者的EC_{50},F. fimetaria低于F. candida。从跳虫回避行为来看,F. fimetaria对于PFOS的毒性作用更加灵敏。

2.3 慢性毒性实验

由图5可知,F. candida繁殖的幼虫数量随着PFOS浓度的增加而减少,在第1个处理0.05 mg•kg^{-1}条件下,幼虫数量与对照组幼虫数量无显著性差异,但在0.2 mg•kg^{-1}处理条件下,繁殖的幼虫数量下降趋势明显,在随后0.4和1 mg•kg^{-1}处理条件下,幼虫数量与对照土幼虫数量均有显著性差异($p<0.05$)。在1 mg•kg^{-1}处理条件下,跳虫的繁殖率达到最低,繁殖幼虫数量仅为52只。利用SPSS计算慢性毒性实验中PFOS对F. candida的半数效应浓度EC_{50}为0.13 mg•kg^{-1}。PFOS对F. candida的繁殖有较强的抑制作用,慢性毒性作用显著。

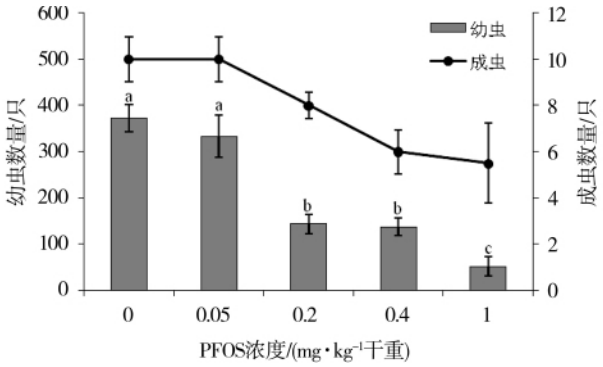

图5 F. candida在PFOS污染土壤中暴露28 d后成虫存活数量和繁殖幼虫数量($p<0.05$)

Fig. 5 Number of reproduction and adult survival of F. candida exposed to PFOS-contaminated soils for 28 d

由图6可知,F. fimetaria繁殖的幼虫数量随着PFOS浓度的增加逐渐减少,在0.05、0.1、1和10 mg•kg^{-1}浓度条件下,幼虫数量与对照土幼虫数量均有显著性差异($p<0.05$)。在10 mg•kg^{-1}浓度条件下,跳虫的繁殖率达到最低,繁殖幼虫数量仅为82只。利用SPSS计算慢性毒性实验中PFOS对F. candida的半数效应浓度EC_{50}为0.05 mg•kg^{-1}。PFOS对F. fimetaria慢性毒性作用显著。

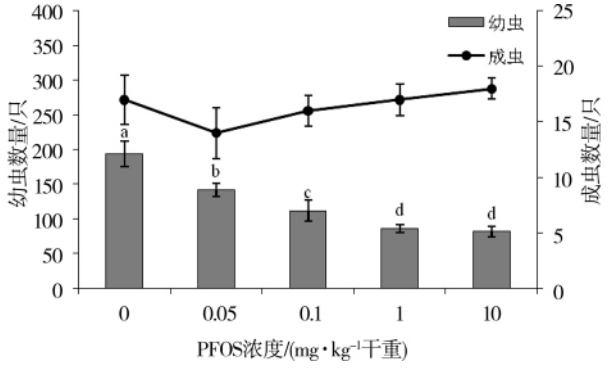

图 6　F. fimetaria 在 PFOS 污染土壤中暴露 21 d 后成虫存活数量和繁殖幼虫数量($p < 0.05$)

Fig. 6　Number of reproduction and adult survival of F. fimetaria exposed to PFOS-contaminated soils for 21 d

虽然 PFOS 对两种跳虫均有显著的慢性毒性作用,但两种跳虫之间有所差异。F. fimetaria 在低浓度 0.05 mg•kg^{-1} 处理条件下繁殖幼虫数量就与对照组有显著性差异($p < 0.05$),而 F. candida 在 0.2 mg•kg^{-1} 处理条件下繁殖幼虫数量才与对照组有显著性差异($p < 0.05$)。再比较两者 EC_{50} 值,F. candida 的 EC_{50} 值是 F. fimetaria 的 2 倍多,PFOS 对 F. fimetaria 的慢性毒性大于 F. candida。综上所述,F. fimetaria 对于 PFOS 的慢性毒性作用最为灵敏。

2.4　跳虫实验参数比较

用生态毒理实验中常见的半数致死浓度 LC_{50} 和半数效应浓度 EC_{50} 这两个参数定量的评价化学品对跳虫毒性的大小。两种不同跳虫的 LC_{50} 和 EC_{50}(表 1)直观地说明了 PFOS 对跳虫的生态毒性。EC_{50} 要远小于 LC_{50},更加灵敏,回避实验和慢性毒性实验更适合进行 PFOS 的生态毒性评价。3 种跳虫毒性实验结果表明,与 F. candida 相比,F. fimetaria 对 PFOS 产生的毒性作用更加灵敏。

表 1　PFOS 对两种跳虫生态毒性实验的 LC_{50} 和 EC_{50} 值

Table 1　LC_{50} and EC_{50} values of PFOS on three ecotoxicity tests with two kinds of springtails (mg•kg^{-1})

实验类型	参数(95%置信区间)	跳虫种类	
		F. candida	F. fimetaria
急性毒性实验	LC_{50}	4777(3444 ~7947)	2219(1 424 ~364 9)
回避实验	EC_{50}	0.51(0.41 ~0.65)	0.31(0.03 ~0.49)
慢性毒性实验	EC_{50}	0.13(0.07 ~0.20)	0.05(0.05 ~0.06)

3　讨论(Discussion)

跳虫的 3 种毒性实验均能从不同方面表征土壤中 PFOS 的生态毒性,其中急性毒性实验和回避实验暴露时间较短,用于评价 PFOS 的急性毒性。同样利用土壤模式动物蚯蚓(Eisenia fetida)暴露在 PFOS 污染土壤中进行急性毒性实验[17, 18],得到相同生态毒性参数 LC_{50} 为 373 ~955 mg•kg^{-1}。跳虫的 LC_{50} 大于蚯蚓的,因此利用跳虫急性毒性实验评价 PFOS 的急性毒性灵敏度较低。跳虫急性毒性实验可以作为慢性毒性实验的预实验,从而保证慢性毒性实验的成功率。徐冬梅等[17]研究 PFOS 污染土壤中蚯蚓回避行为,PFOS 作用时间相同(均为 48 h),蚯蚓在 PFOS 浓度 10 mg•kg^{-1} 条件下仍未表现出回避行为,但 F. fimetaria 在 PFOS 浓度 0.2 mg•kg^{-1} 条件下就表现出明显的回避行为,灵敏度远大于蚯蚓。比较两种土壤动物,利用跳虫的回避实验进行 PFOS 毒性作用评价更加灵敏。

PFOS 的大鼠经口半数致死剂量(LD_{50})为 250 mg•kg^{-1},吸入 1 h 半数致死量(LC_{50})为 5.2 mg• L^{-1}。根据世界卫生组织化合物急性毒性分类标准,PFOS 属于中等毒性化合物[5]。PFOS 作为持久性有机污染物,性质稳定,广泛分布于环境中,对其长期低剂量暴露的慢性毒性研究更为重要。跳虫慢性毒性实验 EC_{50} 是急性毒性 LC_{50} 几万分之一,而且小于回避实验的 EC_{50},灵敏度非常高,跳虫的慢性毒性实验可以更好地评价 PFOS 的生态毒性。整体上两种跳虫均能有效表征 PFOS 的生态毒性,与铜污染土壤跳虫毒理实验结果相似[27]。两种跳虫之间比较发现,有性生殖的 F. fimetaria 各个毒性参数均小于孤雌生殖的 F. candida,尤其是 F. fimetaria 的慢性毒性实验对土壤中 PFOS 产生的毒性作用最灵敏。

本研究使用 ISO 标准规定的人工土壤开展跳虫毒理实验,得出 PFOS 对跳虫毒性的相关数据和参数可为开展实际污染土壤评价提供一定指导。前文中已提到实际土壤中 PFOS 的含量最高可达 483 ng•g^{-1},本实验中 F. fimetaria 慢性毒性实验结果 EC_{50} 为 0.05 mg•kg^{-1},与实际浓度近似相等。但根据前人的实验结果[28],人工土壤由于含有较高的有机质,往往会降低污染物的实际毒性,跳虫在自然污染土中灵敏度要高于人工土壤,因此针对性质各异的实际污染土壤还需要深入研究,从而构建全面的基于跳虫的土壤质量评价方法。

通讯作者简介: 乔敏(1981—),女,博士,副研究员,主要研究方向为生态毒理学,发表学术论文20余篇。

朱永官(1967—),男,博士,研究员,主要研究方向为土壤生物学,发表学术论文百余篇。

参考文献:

[1] 梅胜放. 我国 PFOS/PFOA 的生产、应用以及国内外标准现状[J]. 有机氟工业, 2008, (1): 21 -25

[2] Lewandowski G, Meissner E, Milchert E. Special applications of fluorinated organic compounds [J]. Journal of Hazardous Materials, 2006, 136(3): 385 -391

[3] Lau C, Anitole K, Hodes C, et al. Perfluoroalkyl acids: A review of monitoring and toxicological findings [J]. Toxicological Sciences, 2007, 99(2): 366 -394

[4] Prevedouros K, Cousins I T, Buck R C, et al. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates [J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(1): 32 -44

[5] 金一和, 汤先伟, 曹秀娟, 等. 全球性全氟辛烷磺酰基化合物环境污染及其生物效应[J]. 自然杂志, 2002, 24(6): 344 -348
Jin Y H, Tang X W, Cao X J, et al. Global environmental pollution and biological effects of perfluorooctane sulfonate [J]. Nature Magazine, 2002, 24(6): 344 -348 (in Chinese)

[6] Jin Y H, Liu W, Sato I, et al. PFOS and PFOA in environmental and tap water in China [J]. Chemosphere, 2009, 77(5): 605 -611

[7] Higgins C P, Jennifer A, Criddle C S, et al. Quantitative determination of perfluorochemicals in sediments and domestic sludge [J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(11): 3946 -3956

[8] 郭睿, 蔡亚岐, 江桂斌, 等. 全氟辛烷磺酰基化合物(PFOS)的污染现状与研究趋势[J]. 化学进展, 2006, 18(6): 808 -813
Guo R, Cai Y Q, Jiang G B, et al. Current research of perfluorooctane sulfonate [J]. Progress in Chemistry, 2006, 18(6): 808 -813 (in Chinese)

[9] Sepulvado J G, Blaine A C, Hundal L S, et al. Occurrence and fate of perfluorochemicals in soil following the land application of municipal biosolids [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45(19): 8106 -8112

[10] 张德勇, 许晓路. 全氟辛烷磺酰基化合物(PFOS)类有机污染物在生物体中的污染现状[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(5): 639 -646
Zhang D Y, Xu X L. Review on perfluorooctanesulphonate (PFOS) contamination of organisms [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 5(5): 639 -646 (in Chinese)

[11] Blake D, Howell R D, Criddle C S. Fluorinated organics in the biosphere [J]. Environmental Science & Technology, 1997, 31(9): 2445 -2454

[12] Jin Y, Saito N, Harada K H, et al. Historical trends in human serum levels of perfluorooctanoate and perfluorooctane sulfonate in Shenyang, China [J]. The Tohoku Journal of Experimental Medicine, 2007, 212(1): 63 -70

[13] Yeung L W Y, Miyake Y, Taniyasu S, et al. Perfluorinated compounds and total and extractable organic fluorine in human blood samples from China [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(21): 8140 -8145

[14] 董光辉, 张颖花, 何钦成, 等. 全氟辛烷磺酸(PFOS)对小鼠 T, B 淋巴细胞增殖功能和 NK 细胞活性的干扰效应研究[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(5): 641 -646
Dong G H, Zhang Y H, He Q C, et al. Disturbance of mice lymphocyte proliferation function and NK - cell activity by perfluorooctane sulfonate (PFOS) exposure [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 4(5): 641 -646 (in Chinese)

[15] Du Y, Shi X, Liu C, et al. Chronic effects of water - borne PFOS exposure on growth, survival and hepatotoxicity in zebrafish: A partial life-cycle test [J]. Chemosphere, 2009, 74(5): 723 -729

[16] 刘青坡, 钱丽娟, 郭素珍, 等. 全氟辛磺酸(PFOS)对非洲爪蟾(Xenopus laevis)生长发育, 甲状腺和性腺组织学的影响[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(5): 464 -472
Liu Q P, Qian L J, Guo S Z, et al. Effects of perfluorooctanesulfonate on the growth, metamorphosis, thyroid and gonadal histology of Xenopus laevis [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2008, 3(5): 464 -472 (in Chinese)

[17] 徐冬梅, 文岳中, 李立, 等. PFOS 对蚯蚓急性毒性和回避行为的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 215 -220
Xu D M, Wen Y Z, Li L, et al. Effects of perfluorooctane sulfonate on acute lethality and avoidance behavior of earthworm [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 215 -220 (in Chinese)

[18] Beach S, Newsted J, Coady K, et al. Ecotoxicological evaluation of perfluorooctanesulfonate (PFOS) [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2006, 186: 133 -174

[19] 陈建秀, 麻智春, 严海娟, 等. 跳虫在土壤生态系统中的作用[J]. 生物多样性, 2007, 15(2): 154 -161
Chen J X, Ma Z C, Yan H J, et al. Roles of springtails in soil ecosystem [J]. Biodiversity Science, 2007, 15(2): 154 -161 (in Chinese)

[20] Rusek J. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem [J]. Biodiversity and Conserva-

tion, 1998, 7(9): 1207 −1219

[21] Fountain M T, Hopkin S P. Folsomia candida (Collembola): A "standard" soil arthropod [J]. Annual Review of Entomology, 2005, 50: 201 −222

[22] Liu Y R, Zheng Y M, Zhang L M, et al. Effects of mercury on reproduction, avoidance, and heat shock protein gene expression of the soil springtail Folsomia candida [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2010, 29(3): 654 −659

[23] 岳丽蕊, 贾少波, 赵岩, 等. 重金属铜对 3 种跳虫的影响[J]. 生物学通报, 2011, 46(1): 51 −54

[24] 李晓勇, 骆永明, 柯欣, 等. 土壤弹尾目昆虫 Folsomia candida 对铜污染的急性毒理初步研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(1): 197 −201
Li X Y, Luo Y M, Ke X, et al. Acute toxicity of copper pollution to Folsomia candida (collembolan) in soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(1): 197 −201 (in Chinese)

[25] ISO 11267. Soil Quality-Inhibition of Reproduction of Collembola (Folsomia candida) by Soil Pollutants [S]. International Organization for Standardization, Geneva, 1998

[26] ISO 17512. Soil quality - Avoidance Test for Testing the Quality of Soils and the Toxicity of Chemicals on Behavior - Part 2: Test with Collembolans (Folsomia candida) [S]. International Organization for Standardization (Draft), 2010

[27] Pedersen M B, van Gestel C A M, Elmegaard N. Effects of copper on reproduction of two collembolan species exposed through soil, food, and water [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, 19(10): 2579 −2588

[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 (in Chinese) ◆