

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20230831001

王蕾, 姜锦林, 董姝楠, 等. 我国土壤环境基准受试无脊椎动物筛选研究[J]. 生态毒理学报, 2024, 19(1): 91-102

Wang L, Jiang J L, Dong S N, et al. Screening of test invertebrate organisms for deriving soil environmental criteria in China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2024, 19(1): 91-102 (in Chinese)

我国土壤环境基准受试无脊椎动物筛选研究

王蕾^{1,2}, 姜锦林^{1,*}, 董姝楠², 吴慧毅^{1,2}, 李勖之¹, 曹少华¹

1. 国家环境保护土壤环境管理与污染控制重点实验室, 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042

2. 河海大学农业科学与工程学院, 南京 211100

收稿日期: 2023-08-31 录用日期: 2023-12-11

摘要: 为筛选土壤环境基准受试土壤无脊椎动物, 依据其生态学意义、地理分布范围等选出具有代表性的本土土壤无脊椎动物, 从公开发表的文献、ECOTOX 等权威数据库中搜集其毒性数据, 采用物种敏感度分布法对土壤无脊椎动物的物种毒性数据进行敏感性分析。结果表明: 环节动物门正蚓科的爱胜蚓属(赤子爱胜蚓、安德爱胜蚓)、正蚓属(陆正蚓、粉正蚓)、异唇蚓属(背暗异唇蚓)、带丝蚓科的带丝蚓属(夹杂带丝蚓)、钜蚓科的环毛蚓属(威廉环毛蚓)、线蚓科的白线蚓属(球肾白线蚓、白线蚓)可作为土壤环节动物类基准受试生物; 节肢动物门长角科的长角属(白符蚱、跳虫、曲毛裸长蚱)、等节科的等节属(小原等节蚱)、洼甲螨科的平懒甲螨属(盾平懒甲螨)可作为土壤节肢动物类基准受试生物; 软体动物门玛瑙螺科的玛瑙螺属(非洲大蜗牛)可作为土壤软体动物类基准受试生物; 线虫动物门小杆线虫科的广杆线虫属(秀丽隐杆线虫)、异皮线虫科的根结线虫属(南方根结线虫)可作为土壤线虫动物类基准受试生物。根据毒性数据筛选获得 17 种土壤无脊椎动物分属 4 门、15 科, 可以作为土壤环境基准受试生物。

关键词: 土壤环境基准; 土壤无脊椎动物; 物种敏感度分布; 基准受试生物

文章编号: 1673-5897(2024)1-091-12 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Screening of Test Invertebrate Organisms for Deriving Soil Environmental Criteria in China

Wang Lei^{1,2}, Jiang Jinlin^{1,*}, Dong Shunan², Wu Huiyi^{1,2}, Li Xuzhi¹, Cao Shaohua¹

1. State Key Laboratory of Soil Environmental Management and Pollution Control for Environmental Protection, Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China

2. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China

Received 31 August 2023 accepted 11 December 2023

Abstract: In order to screen soil invertebrates for deriving soil environmental criteria, representative native soil invertebrates were selected according to their ecological significance and geographical distribution range. The toxicity data of soil invertebrates were collected from published literature and authoritative databases such as ECOTOX, and further analyzed with sensitivity distribution method. The results showed that: *Eisenia* (*Eisenia fetida*, *Eisenia andrei*), *Lumbricus* (*Lumbricus terrestris*, *Lumbricus rubellus*), *Allolobophora* (*Allolobophora caliginosa trapezoides*), *Lumbriculus* (*Lumbriculus variegatus*), *Pheretima* (*Pheretima guillelmi*), and *Fridericia* (*Fridericia bulbosa*, *En-*

基金项目: 国家重点研发计划重点专项(2023YFC3708700); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(GYZX220202)

第一作者: 王蕾(1998—), 女, 硕士研究生, 研究方向为生态毒理学, E-mail: 1572288425@qq.com

* 通信作者(Corresponding author), E-mail: jjl@nies.org

chytraeids albidus) can be used as the test soil Annulata organisms for deriving soil environmental criteria; *Dolichoceras* (*Folsomia candida*, *Folsomia fimetaria*, *Sinella curviseta*), *Isomeris* (*Proisotoma minuta*), and *Platychothys* (*Platynothrus peltifer*) can be used as the test soil Arthropod organisms for deriving soil environmental criteria; *Achatina* (*Achatina fulica*) of the Achatinidae family can be used as the test soil Mollusca organisms for deriving soil environmental criteria. *Caenorhabditis* (*Caenorhabditis elegans*) and *Meloidogyne* (*Meloidogyne incognita*) can be used as the test soil Nematoda organisms for deriving soil environmental criteria. According to the toxicity data, 17 soil invertebrates species belonging to 4 phyla and 15 families were selected, which could be used as the test organisms for deriving soil environmental criteria.

Keywords: soil ecological environment criteria; soil invertebrates; species sensitivity distribution; base subject organism

土壤动物是指终生或者某一发育阶段在土壤中度过,且对土壤有一定影响的动物。主要包括原生动物、轮形动物、线形动物、扁形动物、环节动物、软体动物、节肢动物和缓步动物 8 个动物门^[1]。土壤无脊椎动物可被分为大、中、小型动物^[2]。小型土壤动物(体宽 2 ~ 100 μm):包括线虫、原生动物和一些不常见种类,小型土壤动物通常生活在充满水的孔隙中以及土壤基质的水膜里,它们代表了不同的营养群,其中植食性和食真菌、细菌的种类最丰富。原生动物和大部分的线虫在土壤中的活动能力是有限的,对土壤的物理结构的影响较小。原生动物因为数量多、周转速度快以及作为主要的细菌消费者,而占据食物网中一些重要的节点。线虫是地球上数量最多且功能类群最丰富的多细胞动物。线虫普遍存在于不同的土壤中,在 4 000 m 及以上的高山土中也普遍存在。一些农业生态系统的土壤中,5 m 多深的地方也能发现植物寄生性线虫。土壤线虫的另一个主要功能是作为指示生物来评价生态系统的土壤生物学效应、土壤健康水平、生态系统演替或受干扰的程度^[3-5]。中型土壤动物(体宽 100 μm ~ 2 mm):包括部分跳虫、螨类以及线蚓,大多数生活在充满空气的孔隙中,也是不同营养关系的种类的混合。甲螨是土壤螨类中种类和数量最多的一类,大多数甲螨栖息在凋落物和土壤中,大多数以真菌为食或者以微生物和凋落物等植物材料的混合物为食。跳虫,也称弹尾虫,是除螨类以外的另一大类节肢动物。它们分布广,除了水面以下,几乎任何有生命存在的地方都有跳虫生存^[6]。大型土壤动物(体宽 2 ~ 20 mm):包括部分等足目、倍足类、甲虫、蝇类幼虫、陆生贝类及蚯蚓等,体型较大,它们的取食或掘土活动常常会破坏土壤的物理结构^[7]。

在土壤生态安全方面,目前各国基本建立了相

应的土壤环境基准值确定方法,如美国的生态筛选值(ecological soil screening levels, ECO-SSLS)、加拿大的土壤质量指导值(soil quality guideline, SQG)、英国的土壤筛选值(soil screening values, SSVS)、澳大利亚的生态调查值(ecological investigation levels, EIL)、新西兰的生态安全环境指导值(environmental guideline values, EGV)^[8],我国于 20 世纪 80 年代后陆续开展土壤背景值和土壤环境容量的调查工作^[9],1995 年颁布了《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)^[10],并于 2018 年重新修订发布了《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)^[11]。我国的研究工作虽有考虑到土壤污染物生态风险,并通过标准制修订工作规定了部分污染物的限值,但主要出发点还是基于农产品人体健康风险,针对土壤生物保护考虑的还远远不够,相关研究数据积累也较少。目前我国较多地区都存在土壤污染问题、类型复杂和污染物种类广泛^[12],总体情况不容乐观,其中,我国土壤生态风险评估的难度升高,土壤环境基准研究发展相对缓慢。因此,“十四五”期间开展我国土壤生态风险评估和生态环境基准中关键技术的探索有着现实必要性,这其中生态毒性数据便是最为基础且重要的一环。但现有的生态毒性数据相对缺乏,并存在污染物涵盖不足、涉及生物物种相对单一、终点指标及试验方法不统一等问题。在目前的陆生生态毒理试验中,土壤无脊椎动物中的赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)、安德爱胜蚓(*Eisenia andrei*)、跳虫(*Folsomia fimetaria*)、线蚓(*Enchytraeus*)等^[13-14]都是现阶段标准化陆生生态毒理实验中常用的受试物种。从推荐物种来看,无脊椎动物物种较少。使用基础信息与来源较为全面的受试生物有助于获得更为精确的毒性数据^[15-16]。此外在制定生态环境基准时,国内外均开

展了受试生物的筛选研究^[17-18]。因此本文以受试生物中土壤生物的筛选开展研究,为生态毒理试验提供可参考的备选试验材料,并进一步得到更多相关陆生生态毒理试验物种的生态毒性数据。现有工作中,水生淡水水生生物水质基准制定推荐了相关受试物种,土壤环境基准推荐物种名录工作也亟待进行,水生物种筛选研究方法和路线可借鉴于土壤环境介质受试物种的筛选研究。

针对我国陆生生态系统特征和环境管理需求,为筛选土壤环境基准受试土壤无脊椎动物,基于生态毒理学、生物分类学和统计学等研究手段,依据其生态学意义、地理分布范围等选出具有代表性的本土土壤无脊椎动物,从公开发表的文献、ECOTOX等权威数据库中搜集其毒性数据,采用物种敏感度分布法对土壤无脊椎动物的物种毒性数据进行敏感性分析。根据毒性数据筛选获得17种土壤无脊椎动物分属4门、15科,可以作为土壤环境基准受试生物,为探索保护陆生生态的土壤环境基准推导方法奠定基础。

1 材料与方法 (Materials and methods)

1.1 代表性土壤无脊椎动物筛选

由于标准化土壤动物推荐物种较少,筛选我国土壤环境基准制定受试物种工作拟直接纳入当前推荐标准化土壤动物物种。本土受试土壤动物筛选通过查阅《中国动物志》、中国动物主题数据库(<http://www.zoology.csdb.cn>)、中国生物物种名录2022(<http://www.sp2000.org.cn/CoLChina>)、Web of Science(<https://access.clarivate.com>)、CNKI数据库(<http://www.cnki.net>)公开发表的文献,依据相关土壤动物在我国的地理分布范围(3个省份及以上)、生态学意义、经济价值及易获得性(易获得、易于在实验室条件下驯养繁殖)等指标,充分考虑生态毒理试验中常用的测试物种,筛选出具有代表性且毒理试验常用的本土受试土壤动物。

1.2 毒性数据筛选与分析

从ECOTOX数据库及公开发表的文献(WOS和CNKI等数据库)中搜集筛选出的代表性土壤生物的毒性数据,参考美国水生生物基准制定技术^[18]和我国淡水水生生物水质基准制定技术指南^[19]的数据筛选原则,确定数据筛选原则为:(1)土壤动物的急性毒性试验指标为LC或EC;(2)优先选择对实际暴露浓度有监控和说明的毒性数据以及参考了标准化试验的数据结果;(3)同种污染物的急性毒性数据

如果差异过大,应被判断为有问题或者有疑点的数据而谨慎使用;(4)一些有问题或有疑点的数据(如未设立空白对照组等设计不科学的试验、试验生物曾经接触过该污染物的)均不能采用^[20];(5)所有毒性数据都要求包括明确的测试终点、测试时间及对测试阶段或指标的描述,对于同一个物种或同一个终点有多个毒性值可用时,使用其几何平均值。记录毒性数据相对丰富(即含有3种及3种以上污染物毒性数据)的受试生物。

对筛选得到的合规急性毒性数据进行整理和排序,利用物种敏感度分布法(species sensitivity distribution, SSD)^[21]对同一物种的不同污染物的毒理学参数从小到大进行排序,选择对本土土壤动物比较敏感的污染物类别,并筛选出对各物种均有毒性数据的毒性污染物。对这些污染物的本土土壤动物敏感性进行排序,在实际土壤环境基准推导工作中尽量选择敏感性高的物种作为基准受试生物。选择方法为:(1)当SSD图中超过(含)8个物种毒性数据时,选择敏感性排序位于前3位的物种作为土壤环境基准受试土壤动物;(2)当SSD图中少于8个物种毒性数据时,选择敏感性排序居于首位的物种作为土壤环境基准受试土壤动物。

2 结果与讨论 (Results and discussion)

土壤中高度异质的空间结构、化学组成复杂多样的底物为不同大小、物理行为、活动和特征的生物群体提供了各种各样的栖息场所^[22]。土壤动物大约占全球所有被描述过的生物多样性的23%^[23],一克土壤中包含着数以万计的原生动物,几十到几百条线虫以及数量众多的弹尾类、螨类等^[24]。土壤动物种类繁多、数量庞大,对很多研究者来说传统的形态学鉴定是一个瓶颈;某一功能类群内的物种多样性可以推断可利用资源的开发程度以及生态系统功能的互补性。主要土壤动物类型的物种数目和密度如表1所示。然而,受传统分类的限制,继深海、热带森林树冠生物多样性之后,土壤生物的物种多样性和丰富度研究被认为是第3个生物学研究前沿领域。分子技术可能会很大程度上推动对土壤动物多样性的研究。目前,很多土壤动物方面的研究已经开始了分子技术方面的尝试性研究。比如,传统的土壤线虫形态鉴定是非常耗时的,并且很多幼虫很难鉴定。整体来看,国内对土壤动物类群多样性和生态功能研究还远远不够,即便是已经应用于多国标准化测试的寡毛类(如陆栖蚯蚓)研究的资料仍然十分匮乏。

土壤无脊椎动物生物量通常小于土壤生物总生物量的 10%, 土壤动物之间, 土壤动物与微生物之间存在着复杂的相互作用关系。土壤动物的生态功能主要通过取食作用(trophic effect)和非取食作用(non-trophic effect)来实现。原生动物数量庞大、周转速度快, 故原生动物本身的取食作用对碳氮矿化的贡献可以接近甚至超过细菌的贡献; 然而大多数中小型土壤动物的本身代谢过程对碳氮矿化的贡献远低于土壤微生物, 但它们可以通过取食作用来调节微生物进而影响碳氮的矿化。大型节肢动物中的蜘蛛和地表甲虫等捕食者经常活跃于地表, 它们常常会通过级联效应对土壤生态系统产生重要的影响。蚯蚓、白蚁等大型土壤动物除了可以通过取食

作用, 还可以通过非取食作用调控土壤微生物, 进而显著影响土壤碳氮过程。

2.1 代表性土壤无脊椎动物及毒性数据丰度

依据地理分布范围对标准推荐种和我国本土物种进行筛选, 同时结合文献调研情况, 选出 29 个在我国有分布的代表性土壤无脊椎动物, 各物种的主要分布及毒性数据量见表 2。由于目前土壤动物基本资料匮乏, 部分物种未细化到主要分布区域。其中, 12 个物种拥有 5 个或大于 5 个的污染物研究毒性数据, 分布在爱胜蚓属、正蚓属、带丝蚓属、环毛蚓属、长角属、白线蚓属、平懒甲螨属、玛瑙螺属、根结线虫属和广杆线虫属; 另 17 个物种毒性数据过少。各类污染物的生物毒性数据范围为 $10^{-2} \sim 10^3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 主要土壤动物类型的物种数目和密度^[25-31]

Table 1 Species number and density of major soil animal types^[25-31]

土壤动物类型 Soil animal types		已命名物种数目 Number of named species	预计总物种数目 Estimated total number of species	物种密度 Species density
原生动物	Protozoa	土壤中已命名 1 500 多种 More than 1 500 species have been named in soils	36 000 多种 More than 36 000 species are known	一般每克土 1 000 ~ 10 000 条; 每平方米 $10^7 \sim 10^9$ 条或 0.05 ~ 3 g 鲜质量 Generally 1 000 ~ 10 000 pieces per gram of soil; $10^7 \sim 10^9$ pieces per square meter or 0.05 ~ 3 g fresh mass
线虫	Nematode	已知约 30 000 种 About 30 000 species are known	约 1 000 000 种 About 1 000 000 species	每平方米 $10^6 \sim 10^7$ 条或 1 ~ 10 g 鲜质量 $10^6 \sim 10^7$ pieces per square meter or 1 ~ 10 g fresh mass
螨类	Acari	已知约 50 000 种 About 50 000 species are known	约 1 000 000 种 About 1 000 000 species	每平方米范围为几千到 1 000 000 只, 大多数 为 20 000 ~ 200 000 只或 0.5 ~ 60 g 鲜质量 The range per square meter is thousands to 1 million, most of which are 20 000 to 200 000 pieces or 0.5 to 60 g fresh mass
跳虫	Collembola	已知 7 600 多种 More than 7 600 species are known	超 50 000 种 Over 50 000 species	每平方米 100 ~ 670 000 只, 大多数为每平方米 10 000 ~ 100 000 只或 0.03 ~ 6 g 鲜质量 100 ~ 670 000 per square meter, most of which are 10 000 ~ 100 000 pieces per square meter or 0.03 ~ 6 g fresh mass
蚯蚓	Earthworm	已知约 4 000 种 More than 4 000 species are known	超 8 000 种 Over 8 000 species	每平方米 100 ~ 500 条, 约 30 ~ 100 g 鲜质量 100 ~ 500 pieces per square meter, about 30 ~ 100 g fresh mass
蜘蛛	Spider	已知 43 678 种 43 678 species are known	76 000 ~ 170 000 种 76 000 ~ 170 000 species	不确定 Indeterminate
地表甲虫	Ground beetle	已知 40 000 多种 More than 40 000 species are known	不确定 Indeterminate	每平方米在少于 1 只到多于 1 000 只之间波动 It fluctuates from less than 1 to more than 1 000 animals per square meter

表 2 我国有研究记载土壤无脊椎动物分布及其毒性数据量
Table 2 The distribution and toxicity data of soil invertebrates that have been recorded in China

物种信息 Species information				主要分布区域 Main distribution area	数据量 Data volume
科 Family	属 Genus	物种名 Species name	拉丁学名 Latin name		
正蚓科 Lumbricidae	爱胜蚓属 <i>Eisenia</i>	赤子爱胜蚓	<i>Eisenia fetida</i>	黑龙江(哈尔滨)、 四川(成都)、 北京(东城、石景山)等 Heilongjiang (Harbin), Sichuan (Chengdu), Beijing (Dongcheng, Shijingshan), et al.	Y(>160)
		安德爱胜蚓	<i>Eisenia andrei</i>	n.a.	Y(>40)
	正蚓属 <i>Lumbricus</i>	陆正蚓	<i>Lumbricus terrestris</i>	n.a.	Y(12)
		粉正蚓	<i>Lumbricus rubellus</i>	东北、西北 Northeast China, Northwest China	N(3)
	异唇蚓属 <i>Heterocheilus</i>	背暗异唇蚓	<i>Allolobophora caliginosa trapezoides</i>	n.a.	N(3)
	双胸蚓属 <i>Amphithorax</i>	微小双胸蚓	<i>Bimastus parvus</i>	n.a.	N(1)
带丝蚓科 Filamentidae	带丝蚓属 <i>Lumbriculus</i>	夹杂带丝蚓	<i>Lumbriculus variegatus</i>	黑龙江、江苏(南京) Heilongjiang, Jiangsu (Nanjing)	Y(7)
钜蚓科 Superlumbricidae	环毛蚓属 <i>Pheretima</i>	威廉环毛蚓	<i>Pheretima guillelmi</i>	江苏、浙江、湖北等 Jiangsu, Zhejiang, Hubei, et al	Y(6)
		秉氏环毛蚓	<i>Pheretima carnosa</i>	江苏、浙江、安徽等 Jiangsu, Zhejiang, Anhui, et al	N(3)
		壮伟环毛蚓	<i>Pheretima robusta</i>	江苏、浙江、福建等 Jiangsu, Zhejiang, Fujian, et al	N(3)
		环毛蚓	<i>Pheretima tschiliensis</i>	华北、长江流域等 North China, Yangtze River basin, et al	N(3)
	寒螭蚓属 <i>Ocnerodrilus</i>	西土寒螭蚓	<i>Ocnerodrilus occidentalis</i>	国内各地均有分布, 但数量不多 It is distributed all over the country, but the number is not large	N(3)
巨蚓科 Megalobiliidae	远盲蚓属 <i>Telomonas</i>	皮质远盲蚓	<i>Amyntas corticis</i>	台湾(屏东) Taiwan (Pingdong)	N(1)
链胃蚓科 Streptostomidae	杜拉蚓属 <i>Dura</i>	日本杜拉蚓	<i>Drawida japonica</i> Michelsen	北京、河北、辽宁等 Beijing, Hebei, Liaoning, et al	N(1)
长角科 Longicornithidae	长角属 <i>Dolichoceras</i>	白符蛭	<i>Folsomia candida</i>	我国大部分地区 Most parts of our country	Y(31)
		跳虫	<i>Folsomia fimetaria</i>	n.a.	N(4)
		曲毛裸长蛭	<i>Sinella curviseta</i>	n.a.	N(3)
		茉莉花长角蛭	<i>Entomobrya</i> sp.	n.a.	N(2)

续表2

物种信息				主要分布区域	数据量
Species information					
科	属	物种名	拉丁学名	Main distribution area	Data volume
Family	Genus	Species name	Latin name		
等节科	等节属	小原等节蛭	<i>Proisotoma minuta</i>	n.a.	N(3)
Isomeridae	<i>Isomeris</i>				
原目球角科	角蛭属	四刺泡角蛭	<i>Ceratophy sella duplicispinosa</i>	n.a.	N(2)
Protosphaeroceridae	<i>Goniosaltus</i>				
原目棘科	棘蛭属	符氏直棘蛭	<i>Orthonychiurus folsomi</i>	n.a.	N(2)
Proto-Acanthidae	<i>Acanthophora</i>				
线蚓科	白线蚓属	球肾白线蚓	<i>Fridericia bulbosa</i>	南京、海南岛等地	Y(5)
		白线蚓	<i>Enchytraeids albidus</i>	Nanjing, Hainan Island, et al	Y(5)
Filiculidae	<i>Fridericia</i>			n.a.	Y(5)
洼甲螨科	平懒甲螨属	盾平懒甲螨	<i>Platynothrus peltifer</i>	n.a.	Y(6)
Phoridae	<i>Platycthyus</i>				
玛瑙螺科	玛瑙螺属	非洲大蜗牛	<i>Achatina fulica</i>	n.a.	Y(8)
Onychidae	<i>Achatina</i>				
异皮线虫科	根结线虫属	南方根结线虫	<i>Meloidogyne incognita</i>	n.a.	Y(10)
		北方根结线虫	<i>Meloidogyne hapla</i>	n.a.	N(3)
Heterodermatidae	<i>Meloidogyne</i>				
小杆线虫科	广杆线虫属	秀丽隐杆线虫	<i>Caenorhabditis elegans</i>	n.a.	Y(>100)
Rhabdidae	<i>Euryrhabditis</i>				
异皮线虫科	胞囊线虫属	大豆胞囊线虫	<i>Heterodera glycines</i>	n.a.	N(2)
Heterodermatidae	<i>Cystonematode</i>				

注:Y 为有 5 个或 5 个以上毒性数据;N 为有 5 个以下毒性数据。
Note: Y indicates that there are 5 or more toxicity data; N indicates that there are less than 5 toxicity data.

2.2 土壤环境基准受试土壤动物筛选分析

研究一共筛选出 2 799 篇符合要求的相关毒性研究论文,主要来源于《中国动物志》、中国动物主题数据库(<http://www.zoology.csdb.cn>)、中国生物物种名录 2022(<http://www.sp2000.org.cn/CoLChina>)、Web of Science(<https://access.clarivate.com>)、CNKI 数据库(<http://www.cnki.net>)公开发表的国内外文献。对数据丰度较高的土壤动物的污染物毒性数据进行分析,选择毒性数据较多(4 个或以上毒性数据)的污染物进行比较,结果见表 3。由表 3 可知,对土壤动物毒性较大且毒性数据较多的污染物分别为重金属、氯化铜、农药类和菲等。通过对各污染物的物种敏感性排序(图 1)可知,白线蚓、陆正蚓、夹杂带丝蚓等土壤无脊椎动物对 Cd 敏感度较高,夹杂带丝蚓、背暗异唇蚓等土壤无脊椎动物对 Pb 敏感度较高,粉正蚓、陆正蚓等土壤无脊椎动物对 Cu 敏感度较高,而跳虫类对 Hg、Ni 的敏感度处在较敏感水平,壮伟环毛蚓对甲胺磷敏感度较高。

2.3 讨论

土壤环境基准研究中敏感受试生物的筛选国内外研究甚少,开展我国土壤生态风险评估和生态环境基准中关键物种选择和生态毒性数据获取是相关研究领域最为基础且重要的一环。但现有陆生生态受试物种选择主要基于国外标准化研究推荐物种,污染物生态毒性数据相对缺乏,存在污染物涵盖不足、涉及生物物种相对单一、终点指标及试验方法不统一等问题。陆生无脊椎动物是土壤生态系统的重要组成部分,它们通常与土壤颗粒和孔隙水直接接触;当它们暴露于污染土壤中时,所产生的毒害效应要比其他动物更容易被观测到在目前的陆生生态毒理试验中,土壤无脊椎动物中常使用赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)、安德爱胜蚓(*Eisenia andrei*)、跳虫(*Folsomia fimetaria*)、线蚓(*Enchytraeus*)等^[13-14];为筛选土壤生态环境基准受试土壤无脊椎动物,依据其生态学意义、地理分布范围等选出具有代表性的本土土壤无脊椎动物,从公开发表的文献、ECOTOX 等

表 3 土壤动物的毒性污染物和数据量^[32-60]

Table 3 Toxic contaminants and data volumes for soil animals^[32-60]

分类 Sort	污染物 Pollutants	有效物种毒性 数据量/个 Amount of available species toxicity data /number	数据来源 Data source	分类 Sort	污染物 Pollutants	有效物种毒性 数据量/个 Amount of available species toxicity data /number	数据来源 Data source
重金属 Heavy metal	Cd	13	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX	无机化合物 Inorganic compound	氯化铜 Copper chloride	4	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX
	Pb	9	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX	常见有机化合物 Common organic compounds	菲 Phenanthrene	3	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX
	Cu	12	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX		乙二醇 Ethylene glycol	2	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX
	Hg	7	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX	农药 Pesticide	甲胺磷 Methamidophos	6	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX
	Ni	7	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX		氯氧乐果 Chloromethoate	3	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX
	Zn	7	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX		毒死蜱 Chlorpyrifos	3	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX
					马拉硫磷 Malathion	3	知网(CNKI)、 WOS、ECOTOX

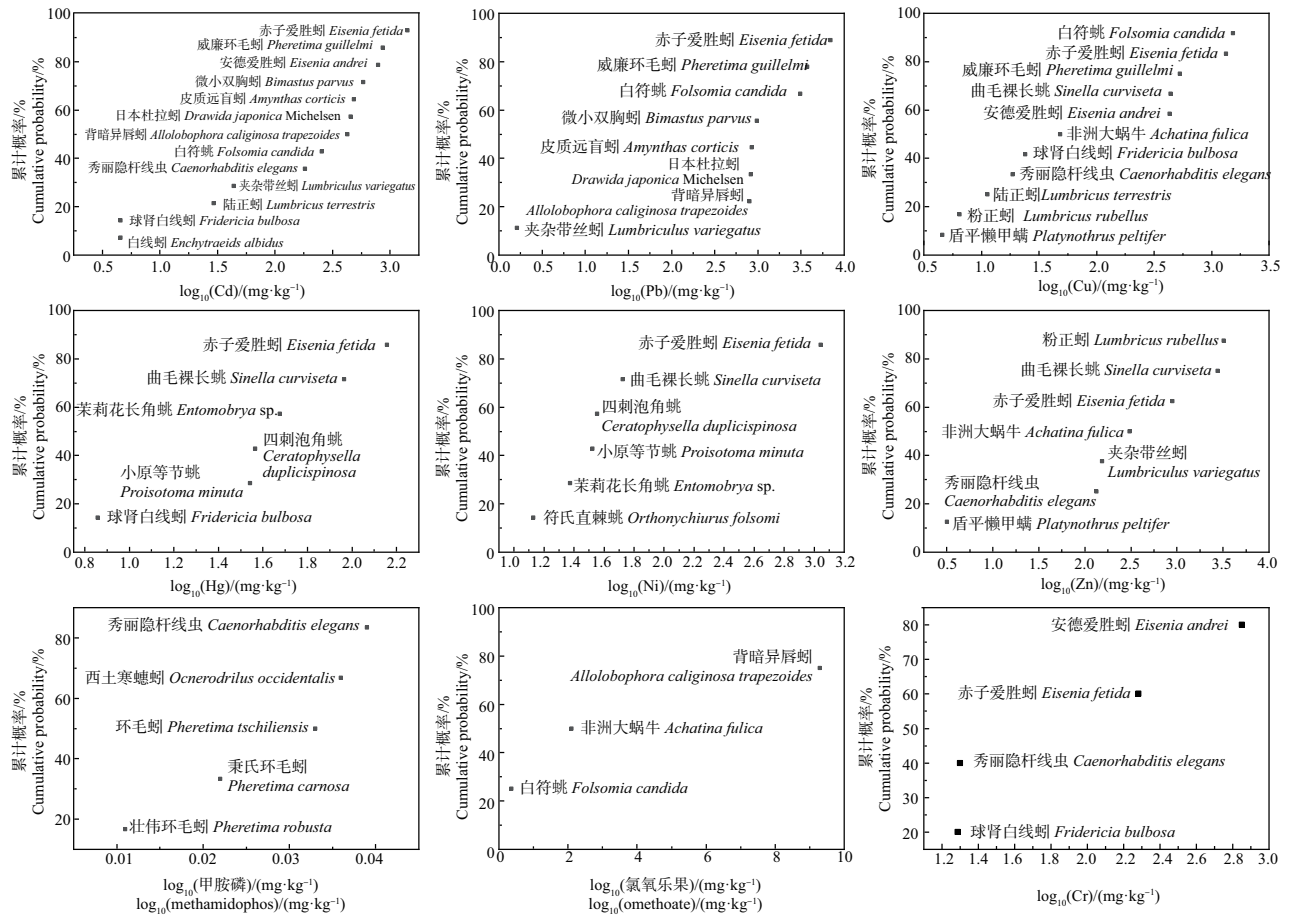


图 1 部分土壤无脊椎动物物种敏感度分布

Fig. 1 Sensitivity distribution of some soil invertebrate species

权威数据库中搜集其毒性数据,采用物种敏感度分布法对土壤无脊椎动物的物种毒性数据进行敏感性分析。该研究使用物种敏感度分布法(SSD)对基准研究的受试生物进行了初步筛选。SSD法已被世界各国广泛应用于生态风险评估^[61]和水质基准推导^[62-63]中,该法可以通过物种敏感性排序对生物的敏感性进行判断^[64]。

该研究通过物种敏感性分析得出,17种土壤无脊椎动物分属4门、15科,可以作为土壤环境基准受试生物。对数据丰度较高的土壤动物的污染物毒性数据进行分析,选择毒性数据较多(4个或以上毒性数据)的污染物进行比较^[65],结果分析可知,对土壤动物毒性较大且毒性数据较多的污染物分别为重金属、氯化铜、农药类和菲等。不同物种对Cu的敏感性存在较大差异。白符蛭(*Folsomia candida*)毒性响应最敏感,其EC/NOEC数值为 $12.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,符氏直棘蛭(*Onychiurus folsomi*)敏感性最弱,其EC/NOEC数值为 $2\,500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其余物种敏感性由强到弱依次为:白线蚓(*Enchytraeus albidus*)、线虫(Nematoda)、绿色异唇蚓(*Allolobophora chlorotica*)、赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)、跳虫(*Folsomia fimetaria*)、秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)、安德爱胜蚓(*Eisenia andrei*)、螨虫(*Platynothrus peltifer*)、曲毛裸长蛭(*Sinella curviseta*)、粉正蚓(*Lumbricus rubellus*),EC/NOEC数值依次为 $20.6, 32.0, 33.8, 35.7, 38.0, 45.0, 56.0, 63.0, 67.2, 73.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同物种对Cd的敏感性存在较大差异。物种敏感性由强到弱依次为:蚯蚓(*Enchytraeus albidus*)、白符蛭(*Folsomia candida*)、赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),EC数值依次为 $35.7, 63.0, 127 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同物种对Zn的敏感性存在较大差异。物种敏感性由强到弱依次为:白符蛭(*Folsomia candida*)、曲毛裸长蛭(*Sinella curviseta*),EC数值依次为 $123, 180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同物种对Pb的敏感性存在较大差异。蜗牛(*Achatina fulica*)敏感性最弱,其EC/NOEC数值为 $1\,200 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其余物种敏感性由强到弱依次为:赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*)、秀丽隐杆线虫(*Caenorhabditis elegans*)、蚯蚓(*Dendrobaena rubida*)、粉正蚓(*Lumbricus rubellus*)、白符蛭(*Folsomia candida*)、曲毛裸长蛭(*Sinella curviseta*)、跳虫(*Proisotoma minuta* Tullberg)、安德爱胜蚓(*Eisenia andrei*)、蚯蚓(*Aporrectodea caliginosa*),EC/NOEC数值依次为 $68.0, 130, 130, 200, 400, 642, 750, 769, 1\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。不同物种对砷的敏感性存

在较大差异。蜗牛(*Achatina fulica*)敏感性最弱,其EC/NOEC数值为 $2\,800 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;其余物种敏感性由强到弱依次为:白符蛭(*Folsomia candida*)、跳虫(*Folsomia fimetaria*)、线蚓(*Enchytraeus*)、安德爱胜蚓(*Eisenia andrei*)、粉正蚓(*Lumbricus rubellus*)、赤子爱胜蚓(*Eisenia fetida*),EC/NOEC数值依次为 $5.0, 10.0, 11.0, 38.0, 40.0, 50.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。通过对各污染物的物种敏感性排序可知,白线蚓、陆正蚓、夹杂带丝蚓等土壤无脊椎动物对Cd敏感度较高,夹杂带丝蚓、背暗异唇蚓等土壤无脊椎动物对Pb敏感度较高,粉正蚓、陆正蚓等土壤无脊椎动物对Cu敏感度较高,而跳虫类对Hg、Ni的敏感度处在较敏感水平,壮伟环毛蚓对甲胺磷敏感度较高。

由于毒性数据的缺乏,一部分土壤无脊椎动物未进行物种敏感性评价,因而未进入推荐的基准受试生物名单中。未来,随着土壤无脊椎动物毒性数据的不断积累,仍将有敏感的土壤无脊椎动物不断加入到基准受试名单中。基准受试生物名单是一份动态清单,根据目前土壤方向的研究,进一步加强对土壤无脊椎动物毒性数据的收集和补充说明,为了我国土壤污染防治提供支撑。

综上所述,本研究表明:

(1)环节动物门正蚓科的爱胜蚓属(赤子爱胜蚓、安德爱胜蚓)、正蚓属(陆正蚓、粉正蚓)、异唇蚓属(背暗异唇蚓)、带丝蚓科的带丝蚓属(夹杂带丝蚓)、钜蚓科的环毛蚓属(威廉环毛蚓)、线蚓科的白线蚓属(球肾白线蚓、白线蚓)可作为土壤环节动物类基准受试生物;节肢动物门长角科的长角属(白符蛭、跳虫、曲毛裸长蛭)、等节科的等节属(小原等节蛭)、洼甲螨科的平懒甲螨属(盾平懒甲螨)可作为土壤节肢动物类基准受试生物;软体动物门玛瑙螺科的玛瑙螺属(非洲大蜗牛)可作为土壤软体动物类基准受试生物;线虫动物门小杆线虫科的广杆线虫属(秀丽隐杆线虫)、异皮线虫科的根结线虫属(南方根结线虫)可作为土壤线虫动物类基准受试生物。

(2)未来需进一步完善土壤环境基准受试无脊椎动物物种名录和相关实验室测试技术,有助于健康土壤培育,保护土壤生物多样性及其功能。土壤健康是指土壤持续保护陆地生态系统生产力、生物多样性和环境服务的能力。现阶段该领域亟需解决的科学技术问题之一是土壤生物多样性时空演变及其生态服务功能解析与调控,但目前土壤健康现状不清,时空演变过程与机理不明,土壤生物网络及

其生态功能知之甚少,调控机理和途径基本不清楚,究其原因,还是表征土壤健康的生物指标研究基础不足,物种名录和相关测试技术的发展有助于丰富土壤健康的生物指标和评价。

(3)基准受试生物名单是一份动态清单,根据目前土壤方向的研究,进一步加强对土壤无脊椎动物毒性数据的收集和补充说明,进一步开展已有成果的专家评议和科普推广工作,让更多的公众和科研人员了解、认识和广泛参与,为了我国土壤污染防治提供支撑。

通信作者简介:姜锦林(1984—),男,研究员,博士,研究方向为生态毒理学。

参考文献 (References):

- [1] 尹文英. 土壤动物学研究的回顾与展望[J]. 生物学通报, 2001, 36(8): 1-3
- [2] Cortet J, Vauflery A G D, Poinso-Balaguer N, et al. The use of invertebrate soil fauna in monitoring pollutant effects [J]. *European Journal of Soil Biology*, 1999, 35(3): 115-134
- [3] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 1999, 14(6): 224-228
- [4] Shao Y H, Zhang W X, Liu Z F, et al. Responses of soil microbial and nematode communities to aluminum toxicity in vegetated oil-shale-waste lands [J]. *Ecotoxicology*, 2012, 21(8): 2132-2142
- [5] Shao Y H, Zhang W X, Shen J C, et al. Nematodes as indicators of soil recovery in tailings of a lead/zinc mine [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(8): 2040-2046
- [6] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6614-6625
- Shao Y H, Zhang W X, Liu S J, et al. Diversity and function of soil fauna [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6614-6625 (in Chinese)
- [7] 郭建英, 吴岷. 土壤无脊椎动物的功能群[J]. *动物学杂志*, 1998, 33(5): 38-40
- [8] 马瑾, 刘奇缘, 陈海燕, 等. 世界主要发达国家土壤环境基准与标准理论方法研究[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 36-187
- [9] 葛峰, 徐珂珂, 刘爱萍, 等. 国外土壤环境基准研究进展及对中国的启示[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 331-343
- Ge F, Xu K K, Liu A P, et al. Progress of the research on soil environmental criteria in other countries and its enlightenment to China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(2): 331-343 (in Chinese)
- [10] 国家环境保护局, 国家技术监督局. 土壤环境质量标准: GB 15618—1995 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2006
- [11] 中华人民共和国生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018
- [12] Hu B F, Shao S, Ni H, et al. Assessment of potentially toxic element pollution in soils and related health risks in 271 cities across China [J]. *Environmental Pollution*, 2021, 270: 116196
- [13] United States Environmental Protection Agency (US EPA). Guidance for developing ecological soil screening levels [R]. Washington DC: US Environmental Protection Agency, 2002
- [14] European Commission. Working Document Guidance Document on Terrestrial Ecotoxicology under Council Directive 91/414/EEC [R]. SANCO/10329/2002 rev 2 final. Brussels: European Commission, 2005
- [15] 罗晶晶, 吴凡, 张加文, 等. 我国土壤受试植物筛选与毒性预测[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(7): 3295-3305
- Luo J J, Wu F, Zhang J W, et al. Screening of soil test plants and developing of their toxicity prediction models in China [J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(7): 3295-3305 (in Chinese)
- [16] 刘娜, 金小伟, 王业耀, 等. 生态毒理数据筛查与评价准则研究[J]. *生态毒理学报*, 2016, 11(3): 1-10
- Liu N, Jin X W, Wang Y Y, et al. Review of criteria for screening and evaluating ecotoxicity data [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, 11(3): 1-10 (in Chinese)
- [17] 中华人民共和国环境保护部. 淡水水生生物水质基准制定技术指南: HJ 831—2017 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2017
- [18] Office of Science and Technology. Guidelines for deriving numerical national water quality criteria for the protection of aquatic organisms and their uses [R]. Washington DC: United States Environmental Protection Agency, 1985
- [19] 中华人民共和国生态环境部. 淡水水生生物水质基准制定技术指南: HJ 831—2022 [S]. 北京: 中国环境出版社, 2022
- [20] 孟伟, 闫振广, 刘征涛. 美国水质基准技术分析与中国相关基准的构建[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(7): 757-761
- Meng W, Yan Z G, Liu Z T. Analysis of guidelines for deriving water quality criteria in the United States and construction of related criteria in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(7): 757-761 (in Chinese)
- [21] Schwarz C J, Tillmanns A R. Improving statistical methods to derive species sensitivity distributions [R]. Victoria,

- Province of British Columbia: Water Science Series, 2019
- [22] Ferris H, Tuomisto H. Unearthing the role of biological diversity in soil health [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85: 101-109
- [23] Decaëns T, Jiménez J J, Gioia C, et al. The values of soil animals for conservation biology [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2006, 42: S23-S38
- [24] Phillips D A, Ferris H, Cook D R, et al. Molecular control points in rhizosphere food webs [J]. *Ecology*, 2003, 84(4): 816-826
- [25] Geisen S. Soil protists diversity, distribution and ecological functioning [D]. Cologne: University of Cologne, 2014: 22-63
- [26] Lavelle P, Spain A. *Soil Ecology* [M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2001: 1-6
- [27] Mora C, Tittensor D P, Adl S, et al. How many species are there on earth and in the ocean? [J]. *PLoS Biology*, 2011, 9(8): e1001127
- [28] Wall D H, Adams G, Parsons A N. *Soil Biodiversity* [M]/Chapin F S, Sala O E, Huber-Sannwald E. eds. *Global Biodiversity in a Changing Environment*. New York: Springer, 2001: 47-82
- [29] Ayoub S M. *Plant Nematology: An Agricultural Training Aid* [M]. Sacramento, CA: NemaAid Publication, 1980
- [30] Adis J, Harvey M S. How many Arachnida and Myriapoda are there world-wide and in Amazonia? [J]. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 2000, 35(2): 139-141
- [31] Lovei G L, Sunderland K D. Ecology and behavior of ground beetles (Coleoptera: Carabidae) [J]. *Annual Review of Entomology*, 1996, 41: 231-256
- [32] 崔春燕. 铬(VI)和非复合污染对土壤生物的毒性效应及危害性评价研究[D]. 上海: 东华大学, 2016: 33-48
- Cui C Y. Study on toxic effect and hazard evaluation of chromium (VI) and phenanthrene combined pollution on soil organisms [D]. Shanghai: Donghua University, 2016: 33-48 (in Chinese)
- [33] 陈剑东, 韩琪. 水体重金属对秀丽隐杆线虫 *Caenorhabditis elegans* 的急性毒性研究[J]. *农业科技与信息*, 2016(31): 43-44, 47
- Chen J D, Han Q. Study on acute toxicity of heavy metals in water to *Caenorhabditis elegans* [J]. *Agricultural Science-Technology and Information*, 2016(31): 43-44, 47 (in Chinese)
- [34] Faheem Azher. 新型杀虫剂和三种重金属对白符跳虫的单一及联合毒性[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 30-45
- Faheem Azher. Single and joint ecotoxicity of novel insecticides and three heavy metals to non-target soil invertebrates *Folsomia candida* [D]. Wuhan: HuaZhong Agricultural University, 2018: 30-45
- [35] 刘德鸿, 刘德辉, 成杰民. 土壤 Cu、Cd 污染对两种蚯蚓种的急性毒性[J]. *应用与环境生物学报*, 2005, 11(6): 706-710
- Liu D H, Liu D H, Cheng J M. Acute toxicity of Cu, Cd to two species of earthworms in soil [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, 11(6): 706-710 (in Chinese)
- [36] 袁方曜, 王玢, 牛振荣, 等. 华北代表性农田的蚯蚓群落与重金属污染指示研究[J]. *环境科学研究*, 2004, 17(6): 70-72
- Yuan F Y, Wang F, Niu Z R, et al. Earthworm community structure of representative agrotypes and its indicator function for heavy metals contamination in North China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(6): 70-72 (in Chinese)
- [37] 丁莹, 柯欣, 吴龙华. 土壤铅污染对白符蛭(*Folsomia candida*)的生态毒性研究[C]. 中国土壤学会土壤环境专业委员会. 中国土壤学会土壤环境专业委员会第十九次会议暨“农田土壤污染与修复研讨会”第二届山东省土壤污染防治与修复技术研讨会摘要集, 2017: 26-27
- [38] 朱江. 球肾白线蚓与赤子爱胜蚓生态毒理测试比较[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(6): 388-390
- Zhu J. Comparative study on ecological toxicology tests between *Fridericia bulbosa* and *Eisenia foetida* [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, 16(6): 388-390 (in Chinese)
- [39] 李星, 林祥龙, 孙在金, 等. 我国典型土壤中铜对白符蛭(*Folsomia candida*)的毒性阈值及其预测模型[J]. *环境科学研究*, 2019, 33(3): 744-750
- Li X, Lin X L, Sun Z J, et al. Toxicity thresholds and prediction model of copper to soil-dwelling springtail (*Folsomia candida*) in Chinese soils [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 33(3): 744-750 (in Chinese)
- [40] 杨道丽. 汞与溴苯腈复合污染对赤子爱胜蚓及球肾白线蚓的生态毒理效应研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013: 22-51
- Yang D L. Eco-toxicological effects of mercury and bromoxynil combined pollution on *Eisenia foetida* and *Eisenia leucocephala* [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013: 22-51 (in Chinese)
- [41] 董继鑫, 王晓燕, 郑袁明, 等. 不同土壤类型中外源汞对白符蛭(*Folsomia candida*)的毒性研究[J]. *生态毒理学报*, 2014, 9(5): 978-985
- Dong J X, Wang X Y, Zheng Y M. Toxicity of mercury to

- springtail *Folsomia candida* in typical Chinese soils [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2014, 9(5): 978-985 (in Chinese)
- [42] 朱江, 李志刚, 杨道丽, 等. Hg 对赤子爱胜蚓的急性毒性效应研究[J]. 上海应用技术学院学报(自然科学版), 2011, 11(2): 95-99
- Zhu J, Li Z G, Yang D L, et al. Acute toxicological effects of Hg pollution on earthworm *Eisenia foetida* [J]. Journal of Shanghai Institute of Technology (Natural Science), 2011, 11(2): 95-99 (in Chinese)
- [43] 郭永灿, 王振中, 张友梅, 等. 重金属对蚯蚓的毒性毒理研究[J]. 应用与环境生物学报, 1996, 2(1): 132-140
- Guo Y C, Wang Z Z, Zhang Y M, et al. Studies on toxicity and toxicology of heavy metals to earthworms in polluted soils [J]. Journal of Applied and Environmental Biology, 1996, 2(1): 132-140 (in Chinese)
- [44] 吴声敢, 王彦华, 吴长兴, 等. 6 种重金属对赤子爱胜蚓的急性毒性效应与风险评价[J]. 生物安全学报, 2012, 21(3): 221-228
- Wu S G, Wang Y H, Wu C X, et al. Acute toxicological effects and risk assessment of six heavy metals on the earthworm, *Eisenia foetida* [J]. Journal of Biosafety, 2012, 21(3): 221-228 (in Chinese)
- [45] 张军辉, 李艳, 田舒宁, 等. 2 种蚯蚓对土壤锌离子的生理响应对比研究[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(14): 117-119
- Zhang J H, Li Y, Tian S N, et al. Physiological response of two earthworms to zinc ions and soil restoration effect [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2020, 26(14): 117-119 (in Chinese)
- [46] 张言诚, 石金礼, 曾四满, 等. 菲对秀丽隐杆线虫、中杆属和拟丽突属线虫毒性效应研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 935-940
- [47] 吴尔苗. 菲、芘对蚯蚓(*Eisenia fetida*)的毒性机理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011: 12-18
- Wu E M. Study on toxic mechanism of phenanthrene and pyrene to earthworm (*Eisenia fetida*) [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011: 12-18 (in Chinese)
- [48] 崔春燕, 沈根祥, 胡双庆, 等. 铬(VI)和菲单一及复合暴露对赤子爱胜蚓的急性毒性效应研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2070-2075
- Cui C Y, Shen G X, Hu S Q, et al. Acute toxicity of single and co-exposure of chromium(VI) and phenanthrene to *Eisenia foetida* [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2015, 34(11): 2070-2075 (in Chinese)
- [49] 严海娟, 郭晓瑜, 刘敏, 等. 3 种农药对土壤中白符蚬的毒性效应[J]. 农药, 2014, 53(1): 34-37
- Yan H J, Guo X Y, Liu M, et al. Toxic effects of three pesticides on *Folsomia candida* (Collembola) in soil [J]. Agrochemicals, 2014, 53(1): 34-37 (in Chinese)
- [50] 赵学平, 王彦华, 吴声敢, 等. 10 种常用农药对赤子爱胜蚓(*Eisenia foetida*)的急性毒性效应[J]. 生态毒理学报, 2011, 6(4): 435-440
- Zhao X P, Wang Y H, Wu S G, et al. Acute toxic effect of ten commonly used pesticides on earthworm (*Eisenia foetida*) [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2011, 6(4): 435-440 (in Chinese)
- [51] 姜锦林, 单正军, 周军英, 等. 常用农药对赤子爱胜蚓急性毒性和抗氧化酶系的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 466-473
- Jiang J L, Shan Z J, Zhou J Y, et al. Influence of commonly used pesticides on acute toxicity to earthworm *Eisenia foetida* and alteration of antioxidant enzyme activities [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(3): 466-473 (in Chinese)
- [52] 马普布. 吡虫啉和噻虫啉对非靶标土壤生物白符跳虫的毒性评价[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 29-79
- Mabubu J I. Toxicity evaluation of imidacloprid and thiacloprid to non-target soil organism *Lepidoptera albicans* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018: 29-79 (in Chinese)
- [53] 张家乐, 赵龙, 郭军康, 等. 不同环数多环芳烃对土壤白符蚬(*Folsomia candida*)的毒性差异[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(12): 2638-2646, 2584
- 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, 2584 (in Chinese)
- [54] 冯献捷, 王冕, 韩东锦, 等. 我国 15 种典型土壤中菲对白符蚬的毒性阈值及其预测模型[J]. 环境科学研究, 2023, 36(8): 1625-1633
- Feng X J, Wang M, Han D J, et al. Toxicity threshold and prediction model of phenanthrene to *Folsomia candida* in 15 typical soils in China [J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(8): 1625-1633 (in Chinese)
- [55] 王鑫, 党秀丽, 赵龙, 等. 镉对土壤秀丽隐杆线虫的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(4): 778-786
- Wang X, Dang X L, Zhao L, et al. Toxic effects of cadmium on *Caenorhabditis elegans* in soils [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(4): 778-786 (in Chinese)
- [56] 宋子杰, 赵龙, 党秀丽, 等. 土壤中三价铈的老化对秀丽隐杆线虫毒性的影响[J]. 环境科学研究, 2022, 35(9): 2195-2204
- Song Z J, Zhao L, Dang X L, et al. Effects of trivalent antimony aging on toxicity of soil-dwelling *Caenorhabditis*

- elegans* [J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35 (9): 2195-2204 (in Chinese)
- [57] 华欣, 陈海波, 李杰, 等. 农药对秀丽隐杆线虫毒性效应及其机制的研究进展[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(1): 34-43
Hua X, Chen H B, Li J, et al. Review on toxicology of pesticides in the nematode *Caenorhabditis elegans* [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2020, 15(1): 34-43 (in Chinese)
- [58] 张聪, 王志新, 刘新会, 等. 河北黄壤中铅和铬(VI)对赤子爱胜蚓的毒性效应[J]. 环境化学, 2021, 40(6): 1683-1690
Zhang C, Wang Z X, Liu X H, et al. Toxic effects of lead and chromium(VI) on the earthworm (*Eisenia fetida*) in Hebei soils [J]. Environmental Chemistry, 2021, 40(6): 1683-1690 (in Chinese)
- [59] 刘嫦娥, 肖艳兰, 谭佳欣, 等. 铅及铅镉复合暴露对赤子爱胜蚓急性毒性效应及其掘穴行为响应[J]. 农业现代化研究, 2021, 42(2): 330-338
Liu C E, Xiao Y L, Tan J X, et al. Acute toxicity of single and co-exposure of lead and cadmium to *Eisenia foetida* and response of their burrowing behavior [J]. Research of Agricultural Modernization, 2021, 42(2): 330-338 (in Chinese)
- [60] 孙丽娜, 黄开华, 高新华, 等. 10 种稻田常用杀菌剂对蚯蚓的急性毒性效应[J]. 上海农业学报, 2022, 38(3): 60-64
Sun L N, Huang K H, Gao X H, et al. Acute toxic effects of 10 common fungicides in paddy field on earthworms [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2022, 38(3): 60-64 (in Chinese)
- [61] Solomon K R, Giesy J P, LaPoint T W, et al. Ecological risk assessment of atrazine in North American surface waters [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2013, 32(1): 10-11
- [62] Hose G C, Van den Brink P J. Confirming the species-sensitivity distribution concept for endosulfan using laboratory, mesocosm, and field data [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 47(4): 511-520
- [63] Dyer S D, Belanger S E, Carr G J. An initial evaluation of the use of Euro/North American fish species for tropical effects assessments [J]. Chemosphere, 1997, 35(11): 2767-2781
- [64] Wheeler J R, Grist E P M, Leung K M Y, et al. Species sensitivity distributions: Data and model choice [J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 45(1-12): 192-202
- [65] 郑欣, 闫振广, 王晓南, 等. 水质基准甲壳类受试生物筛选[J]. 环境科学研究, 2014, 27(4): 356-364
Zheng X, Yan Z G, Wang X N, et al. Screening of native crustaceans for deriving aquatic life criteria [J]. Research of Environmental Sciences, 2014, 27(4): 356-364 (in Chinese) ◆