

弹尾目昆虫在土壤重金属污染生态风险评估中的应用*

许杰¹ 柯欣¹ 宋静² 骆永明^{2†}

(1 中国科学院上海生命科学院植物生理生态研究所, 上海 200032)

(2 中国科学院南京土壤研究所土壤与环境生物修复研究中心, 南京 210008)

摘要 土壤弹尾目昆虫作为无脊椎动物和中型土壤动物的典型代表, 其具有丰富的种类和巨大的生物量, 在重金属污染环境评估中具有十分重要的地位和独特的优势。本文简要概述弹尾目昆虫在污染土壤生态风险评估中、生态毒理学研究以及其他相关生物标志物研究上的一些方法体系及检测主要指标参数(群落结构、种群特征、生存率、生长率、繁殖率、金属硫蛋白和酶活指标)。最后对弹尾目昆虫在重金属污染土壤生态风险评估应用中目前存在的一些问题和应用前景进行了分析讨论。

关键词 重金属污染; 风险评估; 弹尾目昆虫; 生物标志物

中图分类号 X171.5

文献标识码 A

随着地球环境的恶化, 人们对环境问题日益重视。有关重金属污染土壤的风险评估和修复也得到越来越多的关注。传统化学方法只能提供土壤中目标污染物浓度, 不能提供因污染而对土壤生态系统产生影响的全部信息^[1]。而土壤中重金属的毒理评价是以其生物有效性而不是总量为标准^[2, 3]。尤其是重金属复合污染, 很难单纯的用化学分析的数据来解释和评估可能存在的生态风险, 因此, 重金属污染土壤生态的生物评价是对化学评价的有效补充和相互验证^[4, 5]。

目前, 除最常使用蚯蚓外, 还有很多土壤动物作为指示生物被用于土壤重金属污染生态风险评估中^[6~11], 例如, 土壤线虫^[12~14]、原生动物的^[15~17]和甲螨^[18]等在土壤生态功能中起着主要作用的物种; 每个物种因其本身的生物特性和对污染物的敏感性、耐受性不同, 导致它们在不同污染环境中作为指示生物也就各有其应用的范围。在重金属污染风险生物评估的应用中, 某一种或两种指示生物很难完整和确切的反应复杂污染生态的全部真实情况。因此, 针对这些问题, 环境风险评估体系的真实性和可靠性应建立在多物种、多指标基础上。

土壤弹尾目昆虫作为一种古老的生物, 最早的

化石 (*Rhyniella praecursor*) 形成于距今 4 亿年的泥盆纪, 目前已发现和记录的跳虫种类多达 6 500 种^[19], 是土壤中的优势物种之一, 属于中型土壤动物。弹尾目昆虫因其在土壤中的特殊地位和功能, 其群落结构和种群特征被作为土壤质量评估的指标特征, 多年来一直被广泛应用^[20, 21]。随着环境污染问题的提出和重视, 弹尾目昆虫的群落结构和种群特征也被逐步用于重金属、农药和其他类型的污染土壤环境评估中^[22, 23]。尤其近年来, 弹尾目昆虫作为土壤无脊椎动物的代表, 在对污染环境的生态评估研究中得到越来越多的重视^[24~27]。

1 弹尾目昆虫作为重金属环境污染指标的前提和基础

指标生物物种的选择是生态风险评估的第一步, 也是最重要的一步。弹尾目昆虫作为土壤中的优势物种, 不但种类繁多、数量巨大 ($10^3 \sim 10^5$ 个 m^{-2}), 而且分布广泛, 在各类土壤环境中都有其活动的踪迹^[28]。因此, 弹尾目昆虫具有土壤生物的典型代表性, 这是其作为指标生物的首要前提。

蚯蚓最早被作为指标生物, 除了它具有土壤动

* 国家科技部 973 项目 (2002CB410810)、国家自然科学基金杰出青年和重点项目 (40125005, 40432005) 以及环境修复与生态健康教育部重点实验室开放基金项目资助

† 通讯作者, E-mail: ymluo@issas.ac.cn

作者简介: 许杰 (1978~), 男, 博士研究生, 主要从事污染土壤动物生态毒理学、风险评估及生物标志物研究。E-mail: jixu@sibs.ac.cn

收稿日期: 2006-03-28; 收到修改稿日期: 2006-08-22

物的典型代表性外,还与它在土壤生态中重要作用和主要生态地位有关^[6,29]。只有被作为指示生物的物种在所处的环境中居于主要的生态地位,其群落结构及其他一些生物标志物的变化才能反应和代表其所处生态环境的变化情况。与蚯蚓一样,弹尾目昆虫是土壤形成和发育的主要驱动者,是土壤生态中食物网的重要组成部分,处在食物网的底部,不仅以菌类的子实体、菌丝和孢子为食,植物的枯枝落叶、枯根、朽木和新鲜根系也为它们提供了丰富的食物源^[30],弹尾目昆虫对微生物的取食又释放出了原先被微生物固定的养分,加速了C、N及其他养分向植物根系的转移,从而促进植物根系的生长^[31]。其作为土壤形成和发育的主要驱动者,在土壤物质循环中起重要作用^[32]。

弹尾目昆虫(至少是部分种类)是最重要的食真菌者,这使得它们成为菌根共生体的重要调控者。弹尾目昆虫还能提高土壤中的微生物量,通过体内和体外携带大量微生物,来帮助微生物运动而保持生态平衡,同时与土壤微生物共同作用,对土壤中有机物进行分解。Cragg 和 Bardgett^[33]在微宇宙中进行的研究表明,弹尾目昆虫能够对分解过程产生迅速而显著的影响,从而源源不断地为植物的生长提供所需无机养分;此外,弹尾目昆虫还通过其运动、挖掘,使土壤腐殖质与土壤矿物混合,不断改善着土壤的质地、结构、通气性、透水性,为植物生长创造有利的环境条件,植物根系在土壤中的生长又为弹尾目昆虫的生存、移动创造了空间条件。

所以,从物质循环和食物网的角度来讲,土壤弹尾目昆虫不仅对土壤物质循环中起着重要的作用,而且与微生物、植物的生态系统的健康维持都有密切的关系。

2 弹尾目昆虫在重金属污染环境评估中所具备的物种优势

首先,弹尾目昆虫的群落和种群结构特征的改变对所栖息土层环境的改变具有指示作用。弹尾目昆虫的活动、取食、繁殖及其他全部的生命活动范围一般都在土壤的表层(0~25 cm)内^[34],它们是土壤环境变化的受害者和直接目击者。因此,能不间断地与污染物发生接触,研究统计弹尾目昆虫群落结构和种群特征的变化能有效地反映土壤污染的实际情况。

其次,弹尾目昆虫对污染环境变化具有很高的

敏感性。弹尾目昆虫的捕食食性与功能密切相关,微生物活性的增加可以导致食细菌弹尾目昆虫在弹尾目昆虫群落中所占比例发生改变,通过微生物数量的变化可反馈食细菌弹尾目昆虫的状况,进而对环境的某些变化做出响应^[21,33]。此外,随环境污染情况的变化,弹尾目昆虫自身的一些敏感生物标志物也会发生相应的变化。例如,当环境处在污染(如金属离子或有机毒素)胁迫条件下,弹尾目昆虫体内的热激蛋白(Hsp70)和金属硫蛋白(MT)不仅会大量表达,而且其在蛋白水平和 mRNA 水平的表达量都和环境某些因素的变换之间有一定的相关性^[28,35~37],因此,弹尾目昆虫的热激蛋白和金属硫蛋白等其他一些敏感环境生物标志物可以作为指标对土壤的污染进行早期预警和生态毒理评估。

再次,某些弹尾目昆虫同时对重金属污染土壤环境具有很强的耐受性。很多研究结果表明,污染区的土壤生物类群,在数量上主要是以弹尾昆虫和蛴螬类代表的中型土壤动物为优势类群,占90%以上^[38]。其他一些生物种,如蚯蚓(主要以巨蚓科(*Megascolecidae*)和正蚓科(*Lumbricidae*)为主)对重金属污染土壤环境的适应性和敏感性都有一定的限度^[9],当土壤重金属含量稍偏高或长时间污染的大田中很难寻获到蚯蚓,蚯蚓生物指标在这种情况下也就毫无实际应用意义。而我们的大田调查研究表明,即使在重金属浓度很高污染土壤中(如Cu 5 000 mg kg⁻¹和/或Zn 3 000 mg kg⁻¹的浓度下)仍有相当数量和种类的弹尾目昆虫存在。因此,在高风险污染环境中,弹尾目昆虫更具有可以选择性。

最后,弹尾目昆虫的鉴定与实验操作简单易行。取样分离较简单低耗。在实验室条件下,弹尾目昆虫的繁殖不受季节的影响,且具有繁殖周期短和繁殖高率的特点,能够极方便地进行实验室个体同步化繁殖(Synchronized)研究和人为地调控,短期可完成环境对弹尾目昆虫的多世代影响研究^[23]。以孤雌生殖 *F. Candida* 为例,在适合的条件下,从成虫产出卵到孵育出幼虫再繁殖的一个周期,仅需要6~7周,这样,一头跳虫在3个月内就可以扩大繁殖到上万头,这样就能够在种群水平上研究污染土壤环境对弹尾目昆虫繁殖率、世代突变率、遗传学等等。此外,弹尾目昆虫孤雌生殖和有性生殖方式共存(如,孤雌生殖 *F. candida*,两性生殖 *F. fimetaria*等)作为实验室模式生物^[23,39],也为遗传学研究提供了较好的模式生物,在生理生化和遗传方面,可以开展对弹尾目昆虫在生长繁殖过程中对环境适应性

和生活习性变化的研究。在实际应用中,弹尾目昆虫不但具有较低的养殖成本和养殖所需空间小等特点,而且还可以根据实际情况在不同环境中对本地土生种进行选择、培养,使用当地种进行实验室生态毒理研究,更符合实际情况,从而能适用于不同重金属污染土壤环境的评估研究。

基于以上优点,土壤弹尾目昆虫应成为土壤健康状况的指示生物。

3 弹尾目昆虫在重金属污染生态风险评估中目前常用的方法体系和指标参数

3.1 农田污染调查研究方面

研究方法:传统的群落结构和种群特征研究仍是大田污染状况的必要数据内容。目前对重金属污染土壤环境评估上,已经积累了很多有关于弹尾目昆虫群落结构和种群特征的研究资料,建立了较完善标准方法体系^[23]。主要包括:样本的定量采集、镜检、鉴定分类和统计分析^[40,41]。因此,弹尾目昆虫样品的采集和分析更为简洁和准确,更适合于快速、大面积、多重复性的大田分析,从而有效地减少人为误差。

检测主要指标参数:(1)群落结构指标:弹尾目昆虫群落结构特征指标比较成熟,主要采用个体数密度、类群(物种)丰富度、多样性指数和均匀度4个群落参数。(2)种群特征指标:弹尾目昆虫种群特征指标是在污染土壤质量评价中的量化表达,在对土壤环境污染进行评价时,需通过污染物对种群指标特征的毒理作用来反映。毒性指标主要包括 NOEC 和 HCx 两个内容,NOEC 是指土壤中未引起物种消失(物种丰富度指标)和多样性降低(种群优势度、Shannon-Wiener 指数)等的污染物最高浓度;HCx 是指土壤中 x%物种消失(物种丰富度指标)或受损害的污染物浓度^[42,43]。此外还有风险评价指标,根据不同国家和地区的实际而制定。目前国际上普遍采用 HC5 作为土壤中污染物的临界值,即保护土壤中 95%的物种时污染物浓度^[44,45]。

3.2 生态毒理研究方面

研究方法:目前,报道最多的主要是弹尾目昆虫单一物种实验系统(Single Species Test),该实验系统已被欧洲经济合作与发展组织(OECD)、欧洲经济共同体(EEC)和国际标准化组织(ISO)等国际组织所采纳作为国际标准化方法或指标的方法^[43,46~48]系统,该系统有较好的重复性,是目前国际上较为公认

的生物毒理评估的标准实验室体系。主要包括石膏/活性炭平皿喂食实验体系和小宇宙单物种检测实验体系,主要通过同步化后的弹尾目昆虫的喂食、接触实验来检测重金属对其可能的毒理影响,以此来评价污染物对弹尾目昆虫和其他无脊椎动物甚至整个土壤动物区系造成的可能影响。

检测主要指标参数:(1)生存率(Survival),是指弹尾目昆虫成虫或幼虫在污染环境中能否正常存活调查;(2)生长率(Growth),是指弹尾目昆虫在污染环境中的生长状况调查,主要包括对虫体体长、湿重和干重测量数据的综合分析结果;(3)繁殖率(Reproduction),是指弹尾目昆虫在污染环境中的生殖能力的调查,一般通过对一定数量的同步化成虫在一个繁殖周期内产生的全部子一代数目和对照的比较计算出来的;此外,还有孵化率(Hatchability)、产卵量(Batch of eggs)和行为(Behavior)等等特定研究使用的检测指标参数。

3.3 生物标志物研究方面

生物标志物可以用来指示在半致死效应变得明显前污染物对土壤动物在个体水平上所产生的影响,并作为早期预警系统对土壤污染进行检测。随着研究的深入和细化,很多研究表明生物体受到污染胁迫时,生物体在分子、细胞和生理水平上都会发生明显的变化,最终表现在群落结构的变化上。正是因为生物体的这些特性,使得它们具有指示外界污染的价值。近年来,分子、生物化学和生理反应(生物标志物)指标越来越多地被应用于生态毒理风险评估中^[49,50]。

以弹尾目昆虫为指示生物的生物标志物研究目前还在前期摸索阶段^[28],主要包括:(1)金属硫蛋白指标:绝大多数动物体内都有金属硫蛋白(MT)的存在,MT是富含半胱氨酸低分子量的蛋白质。其可对内源性重金属起调节作用和对外源性重金属起到解毒作用。同样,土壤中弹尾目昆虫(*Orchesella cincta*)在重金属污染环境中也产生的金属硫蛋白^[28,37,51],因此MT可作为一种重金属暴露的生物标志物。(2)酶活指标:主要包括代谢过程中的一些转氨酶(主要指谷草转氨酶和谷丙转氨酶)以及消化系统中分解酶活等,Stuher^[52]早在1988年就研究表明,在金属锌污染的环境中,弹尾目昆虫的谷草转氨酶和谷丙转氨酶酶活和等位基因的表达特异性都会发生变化,该类酶活指标可以作为污染环境检测使用。(3)胁迫蛋白指标:胁迫蛋白又称热激蛋白(Hsp),是由一系列不同分子量的蛋白谱系组成,其中较为广泛利用

的生物标志物是 Hsp70(66 ~ 78 kDa) 和 Hsp 60(58 ~ 60 kDa)。土壤昆虫弹尾类动物(*Folsomia candida*)对二硝基酚类杀虫剂地类酚的暴露试验也表明,可以诱发的 Hsp70 呈增加趋势^[36]。除此以外,其他一些指标,如重金属离子对 DNA 损伤指标、肠道微生物区系指标等等,应该同样可以适用于弹尾目昆虫在重金属污染生态风险评估中。

4 问题与展望

目前,以弹尾目昆虫为指标生物进行环境生态风险评估仍存在一些问题。这些问题主要涉及到:(1)污染物诱导的土壤动物耐受性(Pollution-induced tolerance),长期污染胁迫下土壤动物的自然选择性。由于土壤动物个体对污染物的环境适应、遗传适应和敏感种的消失等而产生对污染物的忍耐性。因此,评估过程中应该考虑到不同物种(或同一物种)之间产生耐受性能力的差别;(2)实验条件的选择,主要包括:实验底物(产生最佳水份条件的泥炭量;当然对供试物质的结合也应考虑在内),食物来源(实验的结果决定于是最佳的还是次佳的食料;如同添加食物的程序,食料对供试物质的不同吸收和积累也应考虑在内),环境温度(影响繁殖和生长),以及繁殖的难易程度,个体最初的大小和年龄也会影响繁殖实验的结果。实验如在田间进行,其方案和解释都更为复杂。季节性变异和不可预见的气候变化不仅会影响弹尾目昆虫的活动,也还会影响弹尾目昆虫的移动性和躲避极端条件的方式^[53]。此外,研究对象(如重金属污染物)在田间的不均匀分布,以及弹尾目昆虫寻找小生境的能力都会增加对结果解释的难度;(3)弹尾目昆虫在污染环境中的生活史、功能等研究和检测指标的不完善性;关于高重金属排泄功效^[37]、高生长率、较短幼虫期、以及污染条件下具较高死亡率等适应性特征研究还很欠缺,检测指标需要进一步补充完善,如 DNA 遗传信息多样性变化指标、雌雄比例快速鉴定指标等的建立。

目前,欧盟国家对蚯蚓、弹尾目昆虫、微生物的生态毒理学及风险评价的研究都已经有了相当的基础。从管理角度来看,通过较完善和系统的风险评价可以确定优先污染物和优先治理的污染场所,为制定环境质量标准提供依据。我国在评定土壤环境质量时,欠缺生态学考虑,目前的标准更多以化学分析相关指标制定标准值。进一步深化和完善生态毒理学风险评价的研究将为我国制定更合理的环境质量

标准提供科学依据。

参考文献

- [1] Kurakov A, Ivyaginsev D G, Umarov M. Assessment of soil quality by biological methods: Experience from arable soils in Czech Republic. Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science. Montpellier, France, 1998. 148 ~ 150
- [2] Allen H E, Yin Y. Combining chemistry and biology to derive soil quality criteria for pollutants. Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science. Montpellier, France, 1998. 58 ~ 60
- [3] Sauv S. Derivation of soil quality criteria using chemical speciation of Pb²⁺ and Cu²⁺. Proceedings of the 16th World Congress of Soil Science. Montpellier, France, 1998. 28 ~ 29
- [4] Solomon K R, Sibley P. New concepts in ecological risk assessment: Where do we go from here? Marine Pollution Bulletin, 2002, 44: 279 ~ 285
- [5] Crouan Y, Moia C. The relative sensitivity of growth and reproduction in the springtail *Folsomia candida* exposed to xenobiotics in the laboratory. An indicator of soil toxicity. Ecotoxicol. Environ. Saf., 2006, 64(2): 115 ~ 121
- [6] Kula H, Kokta C. Side effects of selected pesticide on earthworms under laboratory and field conditions. Soil Biol. Biochem., 1992, 24(12): 1711 ~ 1714
- [7] 王振中, 郭永灿, 邓继福, 等. 土壤重金属污染对蚯蚓(*Opisthopora*)影响的研究. 环境科学学报, 1994, 14(2): 236 ~ 243. Wang Z Z, Guo Y C, Deng J F, et al. Effect of heavy metals in soil on earthworm (*Opisthopora*) (In Chinese). Acta Scientiae Circumstantiac, 1994, 14(2): 236 ~ 243
- [8] 王振中, 张友梅, 邢协加. 土壤环境变化对土壤动物群落影响的研究. 土壤学报, 2002, 39(6): 892 ~ 897. Wang Z Z, Zhang Y M, Xing X J. Effect of change in soil environment on community structure of soil animal (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 892 ~ 897
- [9] Edwards C A, Coulson J M. Choice of earthworm species for laboratory tests. In: Smith G, et al. eds. Ecotoxicology of Earthworms. Andover, Hants, UK: Intercept Publ., 1992. 36 ~ 43
- [10] Edwards C A. Testing the effects of the micals on earthworms: The advantages and limitations of field tests. In: Smith G, et al. eds. Ecotoxicology of Earthworms. Andover, Hants, UK: Intercept Publ., 1992. 75 ~ 84
- [11] 邱江平. 蚯蚓及其在环境保护上的应用. 蚯蚓生态毒理学. 上海农学院学报, 1999, 17(4): 301 ~ 308. Qiu J P. Earthworms and their application in environmental protection. Ecotoxicology of earthworm (In Chinese). Journal of Shanghai Agriculture College, 1999, 17(4): 301 ~ 308
- [12] Bongers T, Ferris H. Nematode community structure as a bioindicator in environmental monitoring. Trends Ecol. Evol., 1999, 14: 224 ~ 227
- [13] Lau S S, Fuller M E, Ferris H. Development and testing of an assay for soil ecosystem health using the bacterial-feeding nematode *Cruzema tripartitum*. Ecotoxicol. Environ. Safety, 1997, 36(2): 133 ~ 139

- [14] 张薇,宋玉芳,周启星.土壤线虫对环境污染的指示作用.应用生态学报,2004,15(10):1973~1978. Zhang W, Song Y F, Zhou Q X. Soil nematode as a bioindicator of environment pollution (In Chinese). Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(10): 1973~1978
- [15] Stout J D. The protozoan fauna of a seasonally undated soil under grassland. Soil Biol. Biochem., 1984, 16:121~125
- [16] Treonis A M, Lussenhop J F. Rapid response of soil protozoa to elevated CO₂. Biol. Fertil. Soils, 1997, 25: 60~62
- [17] 宋雪英,宋玉芳,周启星.土壤原生动物的生物指示作用.应用生态学报,2004,15(10):1979~1982. Song X Y, Song Y F, Zhou Q X. Bio-indicating function of soil protozoa to environmental pollution (In Chinese). Chin. J. Appl. Ecol., 2004, 15(10): 1979~1982
- [18] 陈国定,朱文,黎明达,等.应用甲螨检测土壤污染.中国环境监测,1992,8(1):6~10. Chen G D, Zhu W, Li M D, et al. The acarid as indicator in environment of pollution (In Chinese). Environmental Monitoring in China, 1992, 8(1): 6~10
- [19] Brussaard L, Behar-Pelletier V, Bignell D E. Biodiversity and ecosystem functioning in soil. Ambio., 1997, 26: 563~570
- [20] 柯欣,徐建明,谢荣栋.浙江衢州中型土壤动物群落结构及其季节性变化.动物学研究,2003,24(2):86~93. Ke X, Xu J M, Xie R D. Community structure and seasonal change of soil mesofauna in Quzhou region, Zhejiang (In Chinese). Zoological Research, 2003, 24(2): 86~93
- [21] van Straalen N M, van Gestel C A M. Soil invertebrates and microorganisms. In: Calow P. ed. Handbook of Ecotoxicology. Oxford: Blackwell Scientific, 1993. 251
- [22] van Gestel C A M, Weeks J M. Recommendations of the 3rd International Workshop on Earthworm Ecotoxicology. Aarhus, Denmark, August 2001
- [23] Lock K, Janssen C R. Ecotoxicity of chromium () to *Eisenia fetida*, *Enchytraeus albidus*, and *Folsomia candida*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2002, 51(3): 203~205
- [24] 梁文举,闻大中.土壤动物及其对土壤生态学发展的影响.应用生态学报,2001,12(1):137~140. Liang W J, Wen D Z. Soil biota and its role in soil ecology (In Chinese). Chin. J. Appl. Ecol., 2001, 12(1): 137~140
- [25] 尹文英.中国土壤动物.北京:科学出版社,2000. Yin W Y. ed. Soil Animals of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000
- [26] Sorensen T S, Holmstrup M. A comparative analysis of the toxicity of eight common soil contaminants and their effects on drought tolerance in the collembolan *Folsomia candida*. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(2): 132~139
- [27] Nursita A I, Singh B, Lees E. The effects of cadmium, copper, lead, and zinc on the growth and reproduction of *Proisotoma minuta* Tullberg (Collembola). Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005, 60(3): 306~314
- [28] Sterenberg I, Roelofs D. Field-selected cadmium tolerance in the springtail *Orchesella cincta* is correlated with increased metallothionein mRNA expression. Insect Biochem. Mol. Biol., 2003, 33(7): 741~747
- [29] 柯欣,岳巧云,傅荣恕.浦东滩涂中型土壤动物群落结构及土质酸碱度生物评价分析.动物学研究,2002,23(2):129~135. Ke X, Yue Q Y, Fu R S. Soil fauna community and bioassessment of soil acidity in beach land of eastern Shanghai (In Chinese). Zoological Research, 2002, 23(2): 129~135
- [30] Bardgett R D. Causes and consequences of biological diversity in soil. Zoology (Jena), 2002, 105(4): 367~75
- [31] Gange A. Arbuscular mycorrhizal fungi, Collembola and plant growth. Trends Ecol. Evol., 2000, 15(9): 369~372
- [32] 尹文英.土壤动物学研究的回顾与展望.生物学通报,2001,36(8):1~3. Yin W Y. Review of soil zoology and its prospect (In Chinese). Bulletin of Biology, 2001, 36(8): 1~3
- [33] Gragg R D, Bardgett R D. How changes in soil faunal diversity and composition within trophic group influence decomposition processes. Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33:2073~2081
- [34] Gillet S, Ponge J F. Changes in species assemblages and diets of Collembola along a gradient of metal pollution. Applied Soil Ecology, 2003, 22(2): 127~138
- [35] Nadeau D, Corneau S, Plante I. Evaluation of Hsp70 as biomarker of effect of pollutants on the earthworm *Lumbricus terrestris*. Cell Stress Chaperones., 2001, 6(2): 153~163
- [36] Staempfli C, Becker-Van Slooten K, Tarradellas J. Hsp70 instability and induction by a pesticide in *Folsomia candida*. Biomarker, 2002, 7(1): 68~79
- [37] Hensbergen P J, Nugroho R A, Donker M H. Metallothionein bound cadmium in the gut of the insect *Orchesella cincta* (Collembola) in relation to dietary cadmium exposure. Comparative Biochem. Phys., 2000, 126(1): 17~24
- [38] 张友梅,王振中,邓继福,等.重金属污染和土壤动物.见:尹文英著.中国土壤动物.北京:科学出版社,2000. 319~324. Zhang Y M, Wang Z Z, Deng J F, et al. Heavy metal pollution and soil animal. In: Yin W Y. ed. Soil Animals of China (In Chinese). Beijing: Science Press, 2000. 319~324
- [39] Fountain M T, Hopkin S P. Continuous monitoring of *Folsomia candida* (Insecta: Collembola) in a metal exposure test. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2001, 48(3): 275~286
- [40] Smit C E, van Gestel C A. Influence of temperature on the regulation and toxicity of zinc in *Folsomia candida* (Collembola). Ecotoxicology and Environmental Safety, 1997, 37(3): 213~222
- [41] Sterenberg I, Roelofs D. Field-selected cadmium tolerance in the springtail *Orchesella cincta* is correlated with increased metallothionein mRNA expression. Insect Biochemistry and Molecular Biology, 2003, 33(7): 741~747
- [42] Aldenberg T, Slob W. Confidence limits for hazardous concentrations based on logistically distributed NOEC toxicity data. Ecotoxicology and Environmental Safety, 1993, 25(1): 48~63
- [43] Torstenson L. Soil Biological Variables in Environmental Hazard Assessment. Guidelines. Swedish Environmental Protection Agency, 1994. 362~387
- [44] Crommentuijn T, Brils J, van Straalen N M. Influence of cadmium on life-history characteristics of *Folsomia candida* (Willem) in an arti-

- cial soil substrate. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1993, 26 (2) : 216 ~ 227
- [45] van Gestel C A M, Lön C D, van Straalen N M. Evaluation of soil fauna ecotoxicity tests regarding their use in risk assessment. In: Tarradellas J, Bitton G, Rossel D. eds. *Soil Ecotoxicology*. New York: Lewis Publishers, 1997. 292 ~ 317
- [46] Riepert F. ISO Ring Test of A Method for Determining the Effects of Soil Contaminants on the Reproduction of Collembola. ISO Report to TC190/ SC4. 1993
- [47] ISO. Draft Soil Quality-Soil Quality-Effects of Pollutants on Collembola (*Folsomia candida*): Method for the Determination of Effects on Reproduction. International Standardization Organization. 1994
- [48] Annex V. Part C. Methods for the determination of ecotoxicity. Level I. C () 4: Toxicity for earthworms. Artificial soil test. EEC Directive 79/831. 1985, DG XI/ 128/ 82
- [49] Wardle D A, Bardgett R D. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304:1 629 ~ 1 633
- [50] Vasseur ?, Cossu-Leguille C. Biomarkers and community indices as complementary tools for environmental safety. *Environ. Int.*, 2003, 28(8) : 711 ~ 717
- [51] Gruber C, Sturzenbaum S, Gehrig P, et al. Isolation and characterization of a self-sufficient one-domain protein. (Cd)-metallothionein from *Eisenia foetida*. *Eur. J. Biochem.*, 2000, 267(2) : 573 ~ 582
- [52] Stuber C W, Wendel J F, Goodman M M. Techniques and Scoring Procedures for Starch Gel Electrophoresis of Enzyme from Maize. North Carolina: North Carolina State Univ., 1988
- [53] Falkengren-Grerup U. Long-term changes in pH of forest soils in southern Sweden. *Environ. Pollut.*, 1987, 43(2) : 79 ~ 90

ROLE OF COLLEMBOLA IN ASSESSMENT OF ECOLOGICAL RISK OF HEAVY METAL CONTAMINATION OF SOILS

Xu Jie¹ Ke Xin¹ Song Jing² Luo Yongming^{2†}

(1 Institute of Plant Physiology and Ecology, Shanghai Institutes for Biological Sciences, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200032, China)

(2 Soil and Environment Bioremediation Research Centre, Institute of Soil Sciences, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

Abstract Soil collembolan is deemed as an epitome of soil invertebrate and medium sized soil animals because of its abundance in species and hugeness in biomass. So it plays an important role and demonstrates its unique advantages over other soil animals in the assessment of heavy metal contamination of environment; This review first briefly summarizes some methodological systems and major parameters (community structures, species character, survival, growth, reproduction, metallothionein, and enzyme) used in the study of ecotoxicology and other related biomarkers in applying Collembola in ecological risk assessment of polluted soils. In the end of this review, problems existing in and prospects of the application of Collembola in the ecological risk assessment of heavy metal contamination of soils are analyzed and discussed.

Key words Heavy metal contamination; Risk assessment; Collembola; Biomarkers