

农药污染对蚯蚓毒性毒理研究进展

左海根¹,林玉锁²,龚瑞忠² (1.南京农业大学 资源与环境学院,江苏 南京 210095; 2.国家环境保护总局 南京环境科学研究所/国家环境保护农药环境评价与污染控制重点实验室,江苏 南京 210042)

摘要: 综述了农药污染对蚯蚓个体毒性、种群毒性及复合毒性 3 个方面的研究进展,认为农药污染对蚯蚓的毒理学研究将会取得更大的发展。

关键词: 农药; 蚯蚓; 毒理; 复合污染

中图分类号: X17115 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-5906(2004)04-0068-05

Toxicology of pesticide pollution to earthworms. ZUO Hai2gen¹, LIN Yu2suo², GONG Rui2zhong² (1. College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China; 2. Nanjing Institute of Environmental Sciences, State Environmental Protection Administration/ Key Laboratory of Pesticide Environmental Assessment and Pollution Control, State Environmental Protection Administration, Nanjing 210042, China). *Rural Eco2Environment*, 2004, 20(4): 68 - 72

Abstract: Using earthworm as bioindicator has become an important measure in studying effect of pesticide pollution on terrestrial ecosystem. The progresses in researches on toxicity of pesticide pollution to earthworm individuals, and population and combined toxicity were reviewed. Some primary views on future development of the research field were introduced.

Key words: pesticide; earthworm; toxicology; combined pollution

蚯蚓作为陆地上生物量最大的一类土壤动物^[1],是农田生态系统土壤物质小循环中的重要一环,它通过取食、挖掘等活动促进有机质的分解、土壤层次的混合、土壤团粒的形成,提高土壤的孔隙度、排水能力和通气性能,从而改善土壤的物理、化学、生物属性^[2-3]。据估算,每年通过蚯蚓体内的土壤平均为 94.5 t km^{-2} ^[4],因而蚯蚓在维持土壤肥力方面起着非常重要的作用。

蚯蚓不但是土壤中有机腐化物质的分解者,而且是土壤生态系统许多动物如蛇类、鸟类等的重要食物来源,影响着农田生态系统中的物质循环和能量流动,在食物链中起着污染物传递的桥梁作用。由于具有独特的生物学特征,不少学者已将它作为土壤环境污染状况的指示生物^[5-6],从而大大促进了蚯蚓生态毒理学研究的发展。

1 农药对蚯蚓毒性研究状况

土壤污染生态毒理诊断研究得到了国际性的广泛重视^[7]。研究农药污染对蚯蚓影响的毒理学方法不断成熟,目前主要有实验室毒理试验法和田间测试法,前者应用广泛,而后者尽管更能反映农药污染对生态环境的实际影响,但由于试验条件的复杂性,试验方法和评价方法的标准还不完善,应用还较少。实验室毒理试验方法较多,如将蚯蚓浸入含有不同浓度的液体中一定时间后转移到干净土壤中^[8],将被测物质直接注入蚯蚓体内^[8]或口中^[9]等。但普遍采用 OECD 规定的滤纸接触法(contact filter paper test)和人工土壤法(artificial soil test)^[10]等。其中滤纸法可通过标准化的统计方法得到 LC₅₀值,但只给出蚯蚓的经皮毒性信息,很难评估

农药在真实环境中的毒性。人工土壤法则较真实反映了蚯蚓生活的土壤环境,综合考虑了化学污染物对蚯蚓的经皮毒性和经口毒性。

由于蚯蚓种类繁多,不同地域存在不同的优势种群,而且不同蚯蚓种类对农药的敏感程度存在着差异,因而蚯蚓品种的选择和标准化也是研究蚯蚓毒理的一个重要方面。目前应用较广泛的是赤子爱胜蚓(*Eisenia fetide* 和 *Eisenia an2drei*),因为此种蚯蚓的生活习性和对农药的敏感程度较适合用作农药的毒性情况评估^[10-11]。

1.1 农药对蚯蚓个体急性毒性的研究

蚯蚓急性毒性试验是对蚯蚓毒性进行简单、快速的测定方法,能对其生态毒性进行初步的评估,为深入研究农药的慢性毒性和复合毒性提供基本依据。通过蚯蚓急性毒性实验可以大致确定农药对蚯蚓毒性大小情况,因为不同农药的化学结构和功能不同,对蚯蚓有不同的致毒机理,从而使蚯蚓表现出不同的中毒症状。而且不同农药对蚯蚓的主要侵入方式、在蚯蚓体内的吸收、分布、代谢速度以及在土壤环境中的分解难易程度等不同,都会影响蚯蚓的急性毒性。蔡道基等人研究发现,蚯蚓对甲基对硫磷与克百威的毒性反应快,用土壤法处理半小时后皮肤发红充血,遇光或受机械触动刺激,急剧卷曲、扭动,失去逃避能力。受害严重的蚯蚓 1 周死亡,死亡前颜色变淡,环节松弛、脱节,甚至溃烂;而蚯蚓

基金项目:973 国家重点基础研究发展规划(2002CB410805)

收稿日期:2004-05-12

对 - 666 毒性反应慢,5 d 才出现中毒症状,10 d 才有明显反应;受轻度毒害的蚯蚓 2~3 周能恢复正常,且重新钻入土壤中^[12]。

1.2 农药对蚯蚓个体慢性毒性的研究

对蚯蚓慢性毒性的研究已逐渐成为蚯蚓生态毒理学研究的重点。当蚯蚓长期接触土壤中低剂量农药时,尽管蚯蚓不会快速死亡,但为了避开、隔离生存环境中的农药及代谢产物、排泄蚯蚓体内的农药,改变了体内一系列生理生化过程。有害化学残留物质对蚯蚓的生殖、生理、代谢、染色体以及基因等深层次影响,是一个非常活跃、十分有研究意义的领域^[8]。目前农药对蚯蚓的慢性毒性研究主要集中在:农药对蚯蚓行为的影响,农药对蚯蚓呼吸的影响,蚯蚓对农药的富集,蚯蚓超微结构受损情况,农药对蚯蚓体内重要生化指标的影响等。

1.2.1 农药对蚯蚓行为的影响

蚯蚓行为研究作为生态毒理学研究的一种方法已在许多研究中应用,蚯蚓行为的变化影响蚯蚓个体健康状态,从而对高层次的生态过程(种群及群落)产生一定影响。蚯蚓的口前叶和环节表皮上分布着许多对化学物质敏感的感觉接受器,对环境中低剂量污染物有很强的敏感性,从而可以避开不良的生存环境。Capowiez 等研究表明,将 2 种不同种类的蚯蚓放在盛有土壤的玻璃容器中饲养,在有吡虫啉(imidacloprid)存在的情况下,2 种蚯蚓的行为能力(蚯蚓掘洞的长度、洞穴覆盖的范围、洞穴再利用率)均出现明显的下降^[13]。

农药污染对蚯蚓的生长发育和繁殖也产生一些负面影响,Ahmed 研究表明,蚯蚓暴露在 50 mg kg⁻¹除虫脲(diflufenzuron)污染的土壤一段时间后,其体重减少到 84%^[14]。Bouwman 等研究也表明,当赤子爱胜蚓暴露在 2 mg kg⁻¹呋喃丹污染的土壤中,蚯蚓个体不能发育出环带和产卵^[15]。刘喜悦等研究单甲脒农药对蚯蚓生长影响的实验发现,500 倍、300 倍和 200 倍稀释浓度组的单甲脒农药对蚯蚓的生长并不构成危害,它们能够继续生长,并长出标志性成熟的环带、产卵茧和孵出幼蚓;100 倍稀释浓度单甲脒,可干扰蚯蚓的生殖,虽产有卵茧,但未见幼蚓孵出;50 倍稀释浓度可抑制蚯蚓生长^[16]。

1.2.2 农药对蚯蚓呼吸的影响

蚯蚓作为一种体表呼吸的动物,其呼吸作用受农药污染土壤影响很大。王振中等研究表明,随着农药污染程度增高或接触时间增长,蚯蚓呼吸强度逐渐减弱甚至死亡;而在同一浓度下,蚯蚓呼吸强度则随接触历时的延长而下降^[17]。邢协加等人发现,在乐果污染的最初 10 min 内,土壤中蚯蚓呼吸代谢强度随农药浓度的递增而加大,农药的触杀作用使实验动物呼吸异常^[18]。夏卫生等人研究表明,采用滤纸接触法对蚯蚓进行染毒,发现蚯蚓呼吸强度与甲胺磷浓度的自然对数、蚯蚓的接触时间均呈线性相关^[19]。

1.2.3 农药在蚯蚓体内的富集作用

从生态学角度来看,蚯蚓位于陆地生态食物链金字塔的

底部,尽管土壤环境中低剂量的农药对蚯蚓不会造成严重伤害,但由于蚯蚓的富集作用,体内的农药含量比实际环境中接触的农药含量高,而且随着食物链的传递而放大,从而威胁食物链中更高级的生物。Lee 应用蚯蚓监测环境污染,认为蚯蚓组织中的某些农药含量可作为环境污染程度的监测指标^[20]。尽管蚯蚓(*Lumbricus terrestris*)对涕灭威(aldicarb)的富集因子在 0.05~0.15 间,对硫丹(endosulfan)的富集因子在 0.48~0.85 间,但如此小的富集因子却导致蚯蚓的死亡率、生长速率和蛋白质含量均产生很大的变化^[21]。

1.2.4 农药对蚯蚓体超微结构的损伤

在蚯蚓的慢性毒性试验中,尽管未出现死亡现象,但体内的一些组织微形态结构已受到损伤而出现了病变。采用电子显微镜技术,通过扫描电镜和透射电镜对蚯蚓的受损部位进行微形态病变的观察,从组织结构的病变上反映蚯蚓一些生理功能的变化及对蚯蚓的毒害状态,能提供大量普通毒理学研究无法提供的信息。甘雅玲发现,溴氰菊酯引起蚯蚓的表皮和肠道严重破坏,肌间的神经细胞固缩变形,肠粘膜的上皮细胞组织上的微绒毛有少量的破裂,据此可以认为蚯蚓的运动功能已受到很大影响,但肠道的基本吸收功能尚能维持^[22]。郭永灿等在透射电镜下观察重污染地区农药残留对蚯蚓的超微结构损伤时发现,壮伟环毛蚓(*Pheretima robusta*)肠粘膜上皮细胞核内外膜的核周腔发生局部扩张,染色体呈不规则的团块集中分布在细胞核内核膜附近,甚至可观察到上皮细胞的细胞核内染色质稀疏,核膜发生断裂,染色质外溢,说明农药残留可使蚯蚓核遗传物质产生损伤,导致细胞坏死^[5]。因而农药污染土壤中蚯蚓超微结构损伤的情况能灵敏反映蚯蚓生理功能变化,可用于评价土壤的污染状况。

1.2.5 农药对蚯蚓体内重要生化指标的影响

1121511 农药对蚯蚓体内一些重要物质含量的影响

农药污染土壤中不但蚯蚓体重受到影响,而且蚯蚓的蛋白质、氨基酸、葡萄糖等体内物质也发生了变化,有人已应用蚯蚓的蛋白质含量减少和酶活性的增加来评价农药对蚯蚓的影响。Mosleh 等人发现氟啶脲(chlorfluazuron)处理的土壤中蚯蚓体内的可溶性蛋白质含量 1 周后下降了 54.21%^[23];Ismail 等人研究表明,当土壤中农药涕灭威(aldicarb)的浓度为 LC₂₅时,蚯蚓(*Aporrectodea caliginosa*)的蛋白质含量与空白比较下降了 39.07%^[24]。

张友梅等人对农药污染区蚯蚓进行 PTC-氨基酸分析发现,清洁区蚯蚓体壁和消化道壁中氨基酸含量均高于污染区蚯蚓相应部位的氨基酸含量^[25]。

有研究发现,不同的农药品种对蚯蚓体内的葡萄糖含量影响也不同,而蚯蚓体内的葡萄糖含量变化与蚯蚓的体重增长情况有很大的关系,氟啶脲处理使蚯蚓体内葡萄糖含量呈现上升趋势,而莠去津处理呈现下降趋势;涕灭威和甲霜灵(metalaxyl)处理则出现起伏变化的趋势^[23]。

1121512 农药对蚯蚓溶酶体膜稳定性的影响

溶酶体是主要负责消化过程的细胞器,主要参与吸收和隔离外源化合物,而蚯蚓溶酶体膜透性的改变可通过中性红试验的中性红保留时间(NRRT)来表征,其方法已应用于细胞毒理学(cell toxicity)和大量化合物的细胞色素毒性(cytotox2icity)评估^[26]。Eason 等研究表明,受毒死蜱污染的土壤中蚯蚓(*Eisenia andrei*)的NRRT有明显的缩短^[27]。Booth 等人研究表明,即使毒死蜱和二嗪农在正常田间使用的低剂量下,NRRT的变化也能非常灵敏地指示蚯蚓的中毒状况^[26]。

1121513 农药对蚯蚓 DNA 损伤试验

该试验主要应用单细胞凝胶电泳(SCEG)技术评价蚯蚓DNA的损伤、细胞死亡和细胞凋亡情况,可敏感地检测单个细胞中由于毒性引起的DNA直接损伤,以及由于细胞死亡相关的DNA降解而引起的DNA间接损伤,是一种单细胞水平上检测DNA链损伤的方法^[28]。由于该实验现象在电子荧光显微镜下观察像夜空中的彗星,故又称为“彗星实验”。有人利用彗星实验得出吡虫啉($0.05 \sim 0.50 \text{ mg L}^{-1}$)和抑食肼($5 \sim 100 \text{ mg L}^{-1}$)2种农药诱发的细胞损伤率在各浓度间均呈明显的剂量-效应关系,各剂量组与阴性对照组有显著的相关性^[29]。有人采用彗星试验评价马拉硫磷污染土壤中蚯蚓精细胞核中的DNA损伤情况,发现尽管不同时期各处理组中蚯蚓的精子数目与空白相比均没多大差异,但5d后高剂量处理组中蚯蚓精细胞DNA受损伤的细胞核比率与空白相比呈现出明显的差异^[30]。

1121514 农药对蚯蚓精子数和畸变的影响

毒理学研究认为,生殖系统是对外源化合物反应最敏感、最容易受到不良环境因素影响的器官。郭永灿等人研究表明,生活在农药污染土壤中的蚯蚓,其精子发生畸变,受精能力丧失,导致不育,而敏感种类在农药污染区是无法繁衍下去的^[6]。孔志明等人研究表明,当吡虫啉在土壤中的剂量增至 0.5 mg kg^{-1} 时,蚯蚓的精子畸变率与对照组相比有极显著差异,并呈现明显的剂量-效应关系。蚯蚓精子畸变反应症状最多是头部钩状弯曲,其次是顶端成环,有少数为胖头和尾折叠^[31]。

1121515 农药对蚯蚓体内重要酶活性的影响

农药引起蚯蚓体内重要酶活性的改变,主要包括:

(1) 谷胱甘肽硫转移酶(GST) 谷胱甘肽硫转移酶是蚯蚓体内一类重要的解毒酶,主要参与对外源化合物在体内的解毒作用。当蚯蚓生存环境中的农药浓度增加时,此酶在体内的活性也能被相应激活。Hans 等人发现,林丹、硫丹和艾氏剂能够诱导蚯蚓(*Pheretima posthuma*)体内GST的活性^[32]。Booth 发现在实验室条件下,蚯蚓暴露在毒死蜱(28 mg kg^{-1})和二嗪农(60 mg kg^{-1})的土壤中14d后,其体内GST酶的活性与空白相比分别诱导了56%和148%^[33]。

(2) 超氧化物歧化酶(SOD) 超氧化物歧化酶是消除细胞内生物氧化,产生超氧阴离子自由基的金属酶类,是生物体内重要的氧自由基消除剂^[34]。生物体有适应环境改变的能力,如果外界因素引起生物体内氧的产生量增加,则会诱

发SOD酶生物合成量的显著增加^[35]。钟远等研究发现,低浓度的吡虫啉对蚯蚓超氧化物歧化酶活力有抑制作用,而高浓度的吡虫啉和抑食肼对超氧化物歧化酶活力均有促进作用^[36]。

(3) 乙酰胆碱酯酶(AchE) 乙酰胆碱酯酶在蚯蚓的神经传递过程中起着重要作用,此酶的活性主要用于评价有机磷农药和氨基甲酸酯类农药对蚯蚓的毒性情况,这2类农药作用机理主要为抑制蚯蚓的乙酰胆碱酯酶活性,从而使蚯蚓神经传递受阻。Kale 等发现,西维因能抑制蚯蚓(*Pontosclex corethrurus*)乙酰胆碱酯酶80%的活性^[37]。Booth 等人发现,在施用亚致死剂量农药二嗪农和毒死蜱的土壤中,24h后2种农药均对蚯蚓乙酰胆碱酯酶的活性表现严重的抑制,而将蚯蚓移入未污染的土壤14d后乙酰胆碱酯酶的活性仍不能恢复到农药处理前的酶活性水平^[33]。

(4) 纤维素酶 蚯蚓作为一种土壤中的植食性动物,是土壤中有有机物质的分解者。蚯蚓体内的纤维素酶对土壤中有有机物质的分解起着重要作用,此酶活性变化情况会影响蚯蚓的生命活动和生态作用。钟远等研究表明,吡虫啉和抑食肼在一定剂量范围内均对蚯蚓纤维素酶活力有抑制作用,随着剂量和暴露时间的增加,纤维素酶在蚯蚓体内的活性水平逐渐降低^[38]。

(5) 其它酶类 生活在农药污染土壤中的蚯蚓体内还有一系列的酶活性发生变化,影响着蚯蚓的生命活动过程。据报道,在农药污染的土壤中,蚯蚓体内转氨酶的活性增加,而转氨酶的活性增加导致蚯蚓的DNA合成受阻,从而抵制蚯蚓的蛋白质合成。在农药氟啶脲(chlorfluazuron)存在下,1周后蚯蚓体内的谷氨酸草酰乙酸转氨酶(GOT)和谷氨酸丙酮酸转氨酶(GPT)的活性分别为空白组的130.1%和228.2%。而蚯蚓体内磷酸酯酶活性的增加,表明蚯蚓体内的磷酸酯和其它外源化合物的存在;6种不同农药(涕灭威、氯菊酯、丙溴磷、氟啶脲、莠去津、甲霜灵)污染土壤中的蚯蚓碱性磷酸酯酶(AIP)和酸性磷酸酯酶(AcP)的活性均增加^[24]。

1.3 农药污染对蚯蚓种群的影响

蚯蚓种群的生物多样性是伴随着蚯蚓对各种生态环境的适应而产生的^[3]。研究表明,农药污染对自然和农业生态系统的结构与功能均有影响,而且蚯蚓对农药很敏感,低剂量的农药即可引起蚯蚓数量的减少^[39-40]。当蚯蚓生存的土壤环境受到农药污染后,生态系统的结构和功能遭到破坏,食物来源、栖息环境等不适合其生存,蚯蚓的种类和数量也会随之改变,甚至出现某些敏感种群消亡的现象。因此,通过对污染土壤中蚯蚓进行调查分类和比较来了解蚯蚓种群的变化情况,通过对蚯蚓的一些重要生化指标的分析来了解蚯蚓的中毒程度,从而确定土壤污染的状况。郭永灿等对湖南农药厂附近污染土壤中蚯蚓的种类和数量进行了研究,发现蚯蚓的优势种在各污染区均有分布,而有的品种在污染区中出现灭绝的现象^[6]。

1.4 农药复合污染对蚯蚓毒性的影响

目前,复合污染问题已成为人们研究的一个热点,但大

部分集中在对重金属复合污染的研究,而有机污染物复合污染的研究比较少。作为一类重要的有机污染物,国内外对单个农药品种对蚯蚓毒性的研究较多。但实际土壤环境中往往以多种农药形式存在,由于多种农药共存时的情况复杂,与单一农药对蚯蚓作用方式不同,在体内往往呈现交互作用,影响彼此的吸收、分布、代谢转化与毒性效应,因而农药复合污染对蚯蚓毒性的研究十分重要。但这方面的研究工作还处于起步阶段,对农药复合致毒机理方面的研究更少。朱鲁生等分别采用滤纸薄片法和自然土壤法,以蚯蚓的死亡率为指标,通过联合系数法评价农药复合毒性,他们发现辛硫磷及甲萘菊酯混配对蚯蚓复合效应均表现为相加作用^[41]。梁继东等研究发现,无论是低剂量水平还是高剂量水平的铜与甲胺磷复合,都能增强对蚯蚓的毒性;而低剂量水平和高剂量水平的铜与乙草胺复合污染对蚯蚓的毒性分别具有拮抗和协同作用^[42]。

2 结语

综上所述,尽管人们在农药对蚯蚓毒理方面做了很多研究,也取得一些成果,但仍有很多尚未解决的问题,如在农药污染的土壤环境中蚯蚓种类和数量的变化情况,以及与土壤质量、生态系统中其它生物关系等问题均有待于进一步的研究。此外,还应加强蚯蚓的生物标记物(biomarker)的研究,筛选出能更好表征蚯蚓毒理状况的生物标记物,加强蚯蚓慢性毒性的研究,将最新的分子生物学、生态学、土壤学、毒理学等学科结合起来,将蚯蚓的研究水平深入到组织、细胞、酶、分子水平,并探讨其作用机理,加强农药复合污染对蚯蚓毒性的研究,尤其是复合效应和污染机理方面的研究,并将复合污染研究成果运用到环境管理中。随着人们对生态环境的重视,农药污染对蚯蚓的毒理学研究将会得到进一步重视,并会取得更大的发展。

参考文献:

- 王献溥,刘玉凯.生物多样性的理论与实践[M].北京:中国环境科学出版社,1994
- 孔志明,臧宇,崔玉霞,等.两种新型杀虫剂在不同暴露系统对蚯蚓的急性毒性[J].生态学杂志,1999,18(6):20-23
- 邱江平.蚯蚓与环境保护[J].贵州科学,2000,18(1):116-133
- Edwards CA,Lofty JR. Biology of earthworms[M]. London: Chapman and Hall,1977
- 许智芳,吴容.蚯蚓及其养殖[M].北京:科学出版社,1986
- 郭永灿,王振中,赖勤,等.农药污染对蚯蚓的群落结构与超微结构影响的研究[J].中国环境科学,1997,17(1):67-71
- 孙铁珩,宋玉芳.土壤污染的生态毒理诊断[J].环境科学学报,2002,22(6):689-695
- 邱江平.蚯蚓及其在环境保护上的应用.蚯蚓生态毒理学[J].上海农学院学报,1999,17(4):301-308
- Stringer A,Wright MA. The toxicity of benomyl and some related substituted benzimidazoles to earthworm *Lumbricus terrestris* [J]. Pesticide Science,1976,7(5):459-464
- OECD1 Earthworm acute toxicity tests[Z] IOECD Guideline for testing of chemicals,NO 207. 1984
- Spurgeon DJ,Weeks JM,van Gestel CA. A summary of eleven years progress in earthworm ecotoxicology[J]. Pedobiologia,2004,47(5-6):588-606
- 蔡道基,张壬午,李治祥,等.农药对蚯蚓的毒性与危害性评估[J].农村生态环境,1986,2(2):14-18
- Capowiez Y,Rault M,Mazzia C,et al. Earthworm behaviour as a biomarker—a case study using imidacloprid[J]. Pedobiologia,2004,47(5-6):542-547
- Ahmed YM,Ismail SM,Shoukry A. An assessment of diflubenzuron to earthworms[C]//4th National Congress on Pests and Diseases of Vegetables and Fruits in Egypt,Ismaïlia,Egypt,1991
- Bouwman H,Reinecke AJ. Effects of carbofuran on the earthworm, *Eisenia fetida* using a defined medium[J]. Bull Environ Contam Toxicol,1987,38(2):171-178
- 刘喜悦,王丽.单甲胺农药对蚯蚓生长影响的实验[J].动物学杂志,1998,33(6):3-5
- 王振中,张友梅,夏卫生,等.有机磷农药对土壤动物群落结构的影响研究[J].生态学报,1996,16(4):357-366
- 邢协加,王振中,张友梅,等.乐果农药污染对土壤动物呼吸强度的影响[J].湖南师范大学自然科学学报,1998,21(1):89-92
- 夏卫生,王振中.甲胺磷影响蚯蚓呼吸强度的模拟研究[J].湖南师范大学自然科学学报,1994,17(3):77-82
- Lee KE. Some trends and opportunities in earthworm research[J]. Soil Biol Biochem,1992,24(12):1765-1772
- Möslh YY,ParişPalacios S,Guderchet M,et al. Acute and sublethal effects of two insecticides on earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) under laboratory conditions[J]. Environ Toxicol,2003,18(1):1-8
- 甘雅玲. 拟菌素对蚯蚓超微结构影响的研究[J]. 电子显微学报,2002,21(5):513-514
- Möslh YY,Ismail SM,Ahmed YM,et al. Comparative Toxicity and Biochemical Responses of Certain Pesticides to the Mature Earthworm *Aporrectodea caliginosa* under laboratory conditions[J]. Environ Toxicol,2003,18(5):338-346
- Ismail SM,Ahmed YM,Möslh YY. Comparative toxicity,growth rate and biochemical effect of certain pesticides on earthworm *Aporrectodea caliginosa*[C]//7th National Congress on Pests and Diseases of Vegetables and Fruits in Egypt,Ismaïlia,Egypt,1997
- 张友梅,王振中,邢协加,等.土壤污染对蚯蚓的影响[J].湖南师范大学自然科学学报,1996,19(3):84-89
- Booth LH,Heppelthwaite VJ,Webster Ray,et al. Lysosomal neutral red retention time as a biomarker of organophosphate exposure in the earthworm *Aporrectodea caliginosa*: laboratory and semi-field experiments[J]. Biomark,2001,6(1):77-82
- Eason C,Svensen C,O Hallorank,et al. An assessment of the lysosomal neutral red retention test and immune function assay in earthworms (*Eisenia andrei*) following exposure to chlorpyrifos, benzo(a)pyrene (BaP) and contaminated soil[J]. Pedobiologia,1999,43(5):641-645
- 惠秀娟.环境毒理学[M].北京:化学工业出版社,2003

- [29] 封少林,罗屿,钟远,等.应用单细胞凝胶电泳技术测定农药对蚯蚓的 DNA 损伤[J].南京大学学报(自然科学),2000,36(5):649 - 652
- [30] Bustos Obregon E, Gicochea RI. Pesticide soil contamination mainly affected earthworm male reproductive parameters[J]. Asian Journal of Andrology, 2002, 4(3):195 - 199
- [31] 孔志明,臧宇,钟远,等.两种新型杀虫剂对蚯蚓精子形态的影响[J].癌变 畸变 突变,1999,11(1):14 - 16
- [32] Hans RK, Khan MA, Farooq M, et al. Gutathione S-transferase activity in an earthworm (*Pheretima posthuma*) exposed to three insecticides[J]. Soil Biol Biochem, 1993, 25(4):509 - 511
- [33] Booth LH, Heppelthwaite V, Eason CT. Cholinesterase and Gutathione S-transferase in the earthworm *Apporectodea caliginosa* as biomarkers of organophosphate exposure[C]// Pesticide Performance and Monitoring. Proceedings of 51st New Zealand Plant Protection Conference, 1998:138 - 142
- [34] 刘堰,李清漪.赤子爱胜蚓超氧化物歧化酶的纯化和部分性质研究[J].生物化学杂志,1994,10(5):605 - 610
- [35] 方中允,李文杰.自由基与酶——基础理论及其在生物学和医学中的应用[M].北京:科学出版社,1989
- [36] 钟远,臧宇,罗屿,等.新型杀虫剂对蚯蚓的生化毒理学研究[J].南京大学学报,2000,36(2):213 - 218
- [37] Kale RD, Krishnanorthy RV. Residual effect of Sevin on the acetyl cholinesterase activity of the nervous system of earthworm *Pontoscolex corethrurus*[J]. Current Science, 1982, 51(18):885 - 886
- [38] 钟远,臧宇,罗屿,等.新型杀虫剂对蚯蚓的毒理学研究[J].农业环境保护,1999,18(3):102 - 105
- [39] Edwards CA. The effect of contaminates on the structure and function of soil communities[C]// Digest of XI International Colloquium on Soil Zoology, Finland, 1992
- [40] Heibach F. Correlation between data from laboratory and field tests for investigating the toxicity of pesticides to earthworm [J]. Soil Biol Biochem, 1992, 24(12):1749 - 1753
- [41] 朱鲁生,樊德方,王玉军.辛硫磷、甲氰菊酯及其混剂对蚯蚓的毒性及安全性评价[J].浙江农业大学学报,1999,25(1):77 - 80
- [42] 梁继东,周启星.甲胺磷、乙草胺和铜单一与复合污染对蚯蚓的毒性效应研究[J].应用生态学报,2003,14(4):593 - 596

作者简介:左海根(1979—),男,湖南醴陵人,硕士生,研究方向为农药污染与生态毒理。

(上接第 63 页)

- [3] Yuan G, Lakulich LM. Phosphate adsorption in relationship to extractable iron and aluminum in spodosols[J]. Soil Sci Soc Am J, 1994, 58(2):343 - 346
- [4] Drizo A, Frost CA, Grace J, et al. Physicochemical screening of phosphate removing substrates for use in constructed wetland systems[J]. Water Research, 1999, 33(17):3595 - 3602
- [5] Roqić M, Cerjan-Stefanović K, Kurajica S, et al. Ammonical nitrogen removal from water by treatment with clays and zeolite[J]. Water Research, 2000, 34(14):3675 - 3681
- [6] 刘远金,张新明,李华兴,等.天然沸石对鱼塘水及生活污水氮磷的去除效应[J].农业环境保护,2002,21(4):331 - 333
- [7] 张曦,吴为中,温东辉,等.铵氮在天然沸石上的解吸及吸附[J].环境化学,2003,22(2):166 - 171
- [8] 李晖,谭光群,李瑞.蛭石对汞的吸附性能的研究[J].重庆环境科学,2001,23(2):65 - 67
- [9] 何宏平,郭龙皋,谢先德,等.蒙脱石等粘土矿物对重金属离子吸附选择性的实验研究[J].矿物学报,1999,19(2):231 - 235
- [10] 权新军,金为群,李艳,等.改性天然沸石处理富营养化公园水样的试验研究[J].非金属矿,2002,21(1):48 - 49
- [11] 赵丹,王曙光,栾兆坤,等.改性斜发沸石吸附水中铵氮的研究[J].环境化学,2003,22(1):59 - 63
- [12] 惠天凯,裘祖楠,汪学才,等.改性凹凸棒土对水溶液中苯的吸附研究[J].上海环境科学,2000,19(7):317 - 318,332
- [13] 吴平霄.改性插层蛭石对有机污染物苯酚和氯苯的吸附特征研究[J].矿物学报,2003,23(1):17 - 22
- [14] 鲁如坤,鲍士旦,秦怀英,等.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,1999
- [15] 李学垣.土壤化学及试验指导[M].北京:中国农业出版社,1997:254 - 255

作者简介:袁东海(1964—),男,安徽桐城人,博士后,副教授,主要从事湿地生态及人工湿地构建技术、流域利用和管理、土壤侵蚀等领域的研究和教学工作。