DOI: 10.5846/stxb201301310202
李孝刚, 丁昌峰, 王兴祥.重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物群落结构的影响.生态学报,2014,34(21):6198-6204.
Li X G, Ding C F, Wang X X.Effects of heavy metal pollution on soil microarthropods in upland red soil.Acta Ecologica Sinica,2014,34(21):6198-6204.

重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物群落结构的影响

李孝刚[1], 丁昌峰[1], 王兴祥[1,2,*]
(1.中国科学院土壤环境与污染修复重点实验室,南京土壤研究所,南京 210008;
2. 江西省红壤生态研究重点实验室,中国科学院红壤生态实验站,鹰潭 335211)

摘要:土壤重金属污染对农田土壤节肢动物的影响是其环境风险评价和监测的重要方面。基于现有国家土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995),设计 2 个浓度重金属 Cd(0.3 mg/kg,0.6 mg/kg)、Pb(125 mg/kg,250 mg/kg)和 As(30 mg/kg,60 mg/kg)污染的田间试验,分别研究 Cd、Pb 和 As 对红壤旱地小节肢类土壤动物群落组成和多样性的影响。结果表明,试验土壤小节肢类动物共 11 类群,其中符跳属、棘跳属、蜱螨目为本地区红壤旱地的主要类群,占全部捕获小节肢类土壤动物总数的 78%。重金属 Pb、As 高浓度污染分别显著降低了土壤弹尾目的个体密度 73.5%、55.2%,而 Cd 高浓度污染对其无显著影响,仅降低 15.9%;As 和 Cd 高浓度污染分别显著降低了土壤蜱螨目的个体密度 74.3%、36.4%,而 Pb 高浓度污染对其无显著影响。Pb、As 和 Cd 污染对小节肢类土壤动物群落多样性指数均无明显影响。因此,与丰度相比,多样性指数对重金属污染反应的灵敏度较差。主成分分析表明,前气门亚目、符跳属和棘跳属的得分值较高,为小节肢类土壤动物群落中的主导因子,可作为未来该地区重金属污染环境影响监测的重要指标生物和重金属污染阈值研究的重要生态受体。

关键词:重金属;红壤;小型节肢动物;风险评价;监测指标

Effects of heavy metal pollution on soil microarthropods in upland red soil

LI Xiaogang[1], DING Changfeng[1], WANG Xingxiang[1,2,*]
1 *Key Laboratory of Soil Environment and Pollution Remediation, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing* 210008, *China*
2 *Jiangxi Key Laboratory of Ecological Research of Red Soil, Experimental Station of Red Soil, Chinese Academy of Sciences, Yingtan* 335211, *China*

Abstract: The rapid development of industrialization, urban-rural integration and agricultural activities are raising pollutions in China, especially pollutants of heavy metals in farmland soil. Effect of heavy metal pollutants on soil arthropods was an important part of their risk assessment and environmental impact monitoring. Based on the methods of National Soil Environmental Quality Standard of China (GB 15618—1995), Cd (0.3 mg/kg and 0.6 mg/kg), Pb (125 mg/kg and 250 mg/kg) and As (30 mg/kg and 60 mg/kg) were added to upland of red soil respectively, to evaluate their effects on the composition and diversity of soil microarthropods under field conditions. Eleven taxonomic groups of soil microarthropods were observed and *Folsomia*, *Onychiurus* and *Acarina* were the dominant groups, accounting for up to 78% of the total soil microarthropods obtained. Pb and As pollution in high concentration levels significantly decreased the abundance of *Collembola* by 73.5%, 55.2% respectively, and Cd pollution in high concentration levels did not have significant effects on *Collembola*. As and Cd pollution in high concentration levels significantly decreased the abundance of *Acarina* by 74.3%, 36.4% respectively, and Pb pollution in high concentration levels did not have significant effects on *Acarina*. However, Pb, As and Cd showed no significant influences on soil biodiversity, as estimated by the Shannon and Simpson indices.

基金项目:公益性行业(农业)科研专项 (200903015); 江西省赣鄱英才 555 工程项目
收稿日期:2012-01-31; **网络出版日期**:2014-03-13
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: xxwang@issas.ac.cn

Therefore, the biodiversity was less sensitive to heavy metal pollution than the abundance of soil invertebrates under field conditions. The results of the Principal Component Analysis suggested that the values of *Folsomia*, *Onychiurus* and *Prostigmata* were higher in the comprehensive principal component, indicating they were the dominant factors of the soil microarthropoda community, and could act as one of the indicator species to monitor the environmental impacts of heavy metal pollution as well as the important ecological receptors for studying the threshold of heavy metal pollution in the future.

Key Words: heavy metal; red soil; microarthropods; risk assessment; monitoring indicators

土壤重金属污染与危害是当前人类所面临的重要环境问题之一。工业、城市化进程和农业活动等都可能引起土壤重金属污染,随即带来的潜在健康风险已引起国内外学者的关注[1-3]。单纯用化学分析的数据很难全面解释和评估土壤重金属污染存在的生态风险,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]。

小节肢类土壤动物是农田土壤生态系统中重要组成部分,在土壤的物质能量转化及有机物质降解等方面发挥着重要作用,直接影响着农田土壤健康,并能很好地表征土壤的污染程度[6-8]。重金属污染对小节肢类土壤动物的影响国内外已开展了大量研究,但研究内容主要集中在室内条件下重金属对土壤动物如弹尾目、蜱螨目等毒理机制,以及野外关于重金属污染区的实地调查研究,其结果都为多种重金属复合污染[3-5, 9]。李忠武等和张永志等分别就 Cd 和 Cu 对土壤动物群落结构的影响进行了室内模拟研究,但大田尺度下不同重金属污染对土壤动物群落的长期影响还需开展,以客观评价重金属污染对土壤生物的生态效应[10-11]。Cd、Pb 和 As 是我国农田土壤主要重金属污染物之一,鉴此,本研究基于土壤环境质量二级标准(GB 15618—1995),在大田条件下研究了不同浓度的 Cd、Pb 和 As 污染对小节肢类土壤动物群落结构及生态学指标的影响,旨在为土壤重金属污染的生物监测和土壤环境质量生物学指标的确定提供理论和实践依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况及实验设计

试验地位于江西省余江县中国科学院红壤生态实验站(28°13′N, 116°55′E),土壤类型为第四纪发育红黏土。年平均降水量为 1795 mm,雨季为 4 月至 6 月下旬。月平均温度从 1 月份最低 5.9℃到 7 月份最高温度 30.0℃之间。试验地土壤的基本理化性质见表 1。试验地选择在一个前茬为花生的连作地,远离村庄、沟渠、堆肥和其他道路等人为活动影响较强的地方。实验布置前,采集土壤样品,经实验室检测重金属含量符合土壤环境质量一级标准,属自然无污染土壤(表 1)。

参照土壤质量环境二级标准,重金属 Cd、As 和 Pb 设置 2 种单一污染水平。取出一个小区面积为 1 m×2 m 大小的 0—20 cm 根层土壤,根据容重计算每个小区重金属的添加量。然后在每个小区中以溶液形式喷洒上述重金属,其中 Cd 以 $3CdSO_4 \cdot 8H_2O$ 形式添加,添加浓度分别为 0.3 mg/kg (Cd1)、0.6 mg/kg (Cd2);As 以 $Na_3AsO_4 \cdot 12H_2O$ 形式添加,添加浓度分别为 30 mg/kg (As1)、60 mg/kg (As2);Pb 以 $Pb(NO_3)_2$形式添加,添加浓度分别为 125 mg/kg (Pb1)、250 mg/kg (Pb2)。以田间周边水库灌溉水作对照处理。每个小区处理随机排布,设置 3 个重复。为了保持土壤-植物-动物生态系统,2012 年 3 月 27 日(重金属老化 3 个月后),施加底肥后(按每亩 50 kg NPK 复合肥折算成每小区施用 150 g),条播一定数量的胡萝卜,每个小区 4 条,行距 20 cm,深 2—3 cm,胡萝卜齐苗后,间苗 2—3 次,定苗苗距 20 cm,田间管理按照胡萝卜生产常规方式管理。

1.2　土壤样品采集和小节肢类土壤动物的收集

8 月上旬收获胡萝卜,然后用土钻采集 0—15 cm 的土样,每个小区随机采集 5 个点,混为一个土样,装入无菌塑料袋中,立即带回实验室收集土壤动物小节肢类。采用烘干法测定所采土样的含水量。称取相当于 500 g 烘干土的样品,采用改良的 Tullgren 法收集小节肢类土壤动物标本。考虑到土壤材料的体积和室内温度对土壤动物分离的影响,采用 15 W 光照分离器,以持续照射 72 h 分离出来的小节肢类个体数作为统计标准。获得的土壤动物

标本置于75%的酒精中保存。利用 Nikon-SMZ1500(日本)体视显微镜初步鉴定小节肢类土壤动物样本,然后对蜱螨目和弹尾目类群,采用 Nikon-TE2000(日本)相差显微镜进行亚目或属的鉴定。动物分类主要参考《中国土壤动物检索图鉴》、《中国亚热带土壤动物》等著作进行分类鉴定[12-13]。

表 1 试验地土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical soil properties in the upland field

pH	有机质 Organic matter/(g/kg)	阳离子交换量 Cation exchange capacity/(cmol/kg)	全氮 Total N/(g/kg)	全磷 Total P/(g/kg)	有效磷 Olsen-P/(mg/kg)	全钾 Total K/(g/kg)	速效钾 Available K/(mg/kg)	Cd/(mg/kg)	Pb/(mg/kg)	As/(mg/kg)
4.84	9.36	9.31	0.56	0.48	20.29	9.44	343.75	0.12	25.4	15.0

1.3 数据统计与分析

采用幼虫和成虫综合的方式统计小节肢类土壤动物数量,并对各个样方进行群落多样性分析[14]。采用群落的物种丰富度(S)、个体数量(N)、蜱螨目与弹尾目比值(A/C)、Shannon-Wiener 物种多样性指数(H)、Simpson 优势度指数(C)等参数分析群落的动态与结果特征[15]。其具体计算公式为:

$$C = 1 - \sum_{i=1}^{s} (P_i)^2$$

$$H = - \sum_{i=1}^{s} P_i \ln P_i$$

式中,S 为所调查到的物种数,P_i 为各个种群的个体数量与群落总个体数量的比值。方差分析及主成分分析采用 SPSS 13.0 完成。

2 结果与分析

2.1 重金属污染红壤旱地小节肢类土壤动物群落组成

本试验地共采集到小型节肢类土壤动物 11 类群,其中蜱螨目(39.4%)、符跳属(19.7%)、棘跳属(18.9%)为小节肢类土壤动物的优势类群,其总量占总收集个体数量的 78%,说明这些类群为本地区红壤旱地小节肢类土壤动物的主要组成成分。其他所收集到的小节肢类土壤动物如中气门亚目、端足目、双尾目、小等跳属、长跳属、土跳属等为常见类群(表 2)。

表 2 不同重金属污染处理下小节肢类土壤动物群落组成

Table 2 The community structure of soil micro arthropods in upland red soil treated with different heavy metals

种类 Taxa	处理 Treatments							频数 Abundance
	Ck	Pb1	Pb2	As1	As2	Cd1	Cd2	
棘跳属 *Onychiurus*	2.12±0.63	0.60±0.56	0.60±0.56	0.60±1.03	0.60±0.56	1.48±0.43	0.83±0.73	18.9%
土跳属 *Tullbergia*	0.00	0.00	0.00	0.46±0.40	0.00	0.00	0.37±0.63	2.3%
符跳属 *Folsomia*	1.84±0.42	0.00	0.46±0.40	0.88±0.99	1.19±0.56	1.56±0.57	1.71±0.53	19.7%
小等跳属 *Isotomiella*	0.00	0.00	0.00	0.23±0.40	0.00	0.23±0.40	0.23±0.40	1.8%
长跳属 *Entomobrya*	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.23±0.40	0.23±0.40	1.1%
蜱螨目 *Acarina*	3.61±1.07	1.66±0.84	2.29±0.81	1.61±0.45	0.92±0.40	1.06±1.04	2.29±0.49	39.4%
其他类群 Other groups	0.69±0.69	0.23±0.40	0.92±0.80	0.92±1.09	1.43±1.28	0.92±0.40	0.46±0.40	16.8%
个体数 Individual total	8.03	2.48	4.27	4.71	4.14	5.48	6.12	

2.2 重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物个体密度的影响

由图 1 可以看出,与对照相比,Pb1 和 Pb2 污染水平中弹尾目个体密度均有显著降低,分别降低了85.1%和73.5%;As1 和 As2 污染水平中弹尾目个体密度分别降低了45.7%和55.2%,其中 As2 污染水平中发生了显著降低。但与对照相比,Cd1 和 Cd2 污染水平对土壤弹尾目个体密度都没有明显影响,仅分别降低 12.5%和 15.9%。与对照相比,Pb1 和 Pb2 污染水平中蜱螨目个体密度分别降低了 54.0%和36.4%;As1 和 As2 污染水平中蜱螨目个体密度均显著降低,分别降低了 55.2%和 74.3%;Cd1 和 Cd2 污染水平蜱螨目个体密度也均有显著降低,分别降低了70.6%和36.4%(图 1)。Pb 污染显著升高了蜱螨

目(A)与弹尾目(C)比值(A/C)值,而其他 2 种重金属污染对 A/C 值没有显著影响(图 2)。总之,对不同重金属污染的单因素方差分析可以看出,Pb、As 污染对土壤弹尾目个体密度有显著影响,而 Cd 污染对其没有显著影响;As、Cd 污染对土壤蜱螨目个体密度有显著影响,而 Pb 污染对其没有显著影响;不同重金属污染对其他类群个体密度均无显著影响(表 3)。

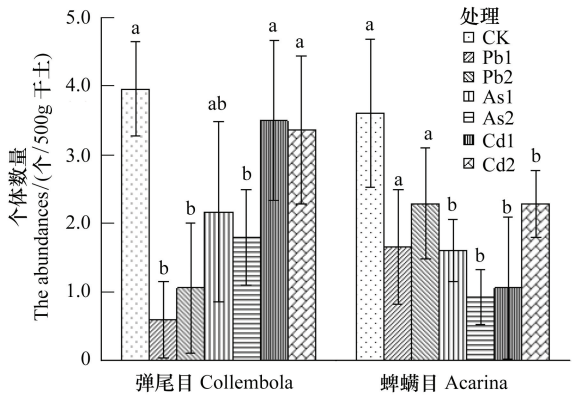

图 1　不同重金属污染对弹尾目和蜱螨目个体密度的影响

Fig. 1　Effects of different heavy metals pollution on the abundances of Collemnola, Acatina

图中不同小写字母表示重金属污染处理与对照差异显著

2.3　重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物群落多样性的影响

群落物种多样性是群落中物种数和各物种个体数构成群落结构特征的一种表示方法[16]。通过对收集到的小节肢类土壤动物数据的统计分析,计算出不同重金属污染水平小节肢类土壤动物群落物种多样性的 2 个指标:多样性、优势度(图 2)。与对照相比,Pb、As 和 Cd 的不同污染水平对小节肢类土壤动物的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Simpson 优势度指数均无明显影响。对不同重金属污染的单因素方差分析也可以看出,Pb、As 和 Cd 污染对小节肢类土壤动物群落多样性均无显著影响(表 3)。

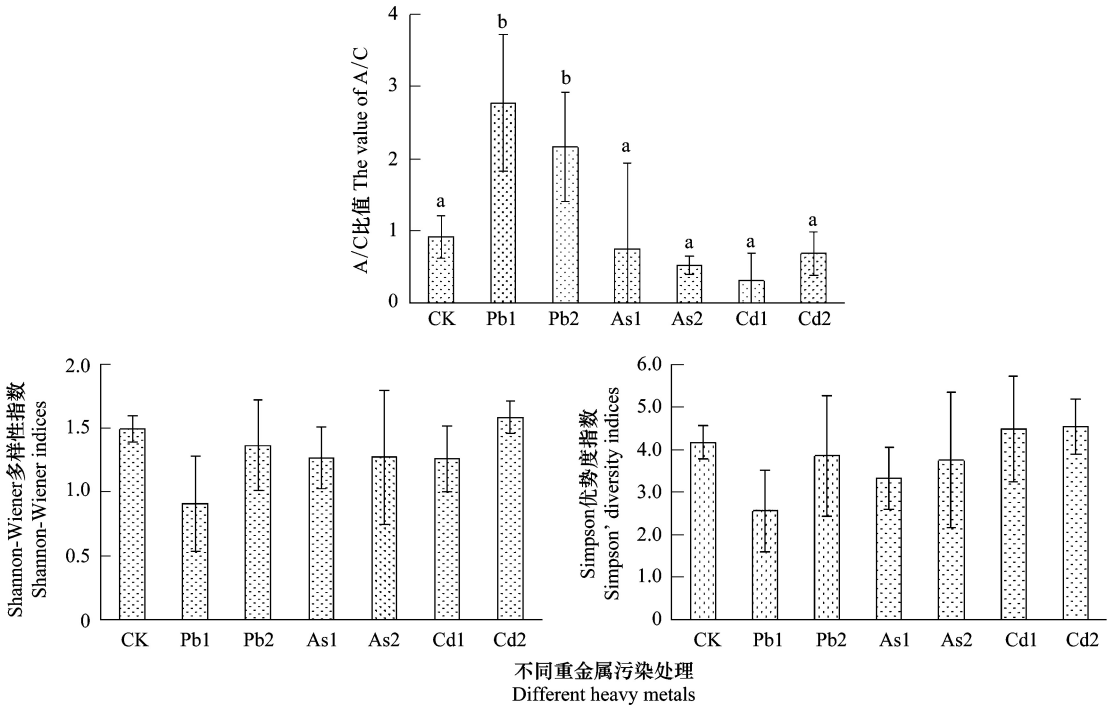

图 2　重金属污染对红壤旱地小节肢类土壤动物群落多样性和 A/C 的影响

Fig.2　Effects of different heavy metals pollution on the value of A/C and the species diversity of soil micro arthropods' community

2.4　重金属污染红壤旱地小节肢类动物群落组成的主成分分析

采用主成分法分析了各小节肢类土壤动物在重金属污染旱地中的贡献大小,以筛选出适合未来本地区重金属污染环境影响评估和监测的指标生物。以特征值 >1 选取成分,共提取了 2 个主成分。以每个主成分所对应的特征值占所提取主成分总的特征值之和的比例作为权重计算主成分综合模型,然后

对所调查的物种进行综合评价比较,结果见表 4。在综合主成分中得分较高的前 3 位为前气门亚目、符跳属和棘跳属,其得分值分别为 2.75、2.59、2.19。这与此 3 种节肢动物为红壤旱地小节肢类土壤动物的优势物种具有一致性。第一主成分、第二主成分的累计贡献率分别达到 67.32%、85.97%,可以代表重金属污染土壤中的主导因子。

表 3 小节肢类土壤动物多样性指数及主要小节肢类数量的单因素方差分析

Table 3 One-Way ANOVA of certain main soil microarthropods′s quantities and the diversity indices of soil microarthropods

因素 Effects	Pb			As			Cd		
	df	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*	*df*	*F*	*P*
弹尾目 *Collembola*(C)	1 :8	18.09	<0.01	1 :8	8.63	0.02	1 :8	0.3	0.75
蜱螨目 *Acarina*(A)	1 :8	3.56	0.10	1 :8	11.51	0.01	1 :8	5.90	0.04
其他类群 Other groups	1 :8	0.88	0.46	1 :8	0.39	0.70	1 :8	0.60	0.58
A/C 值 A/C value	1 :8	1.67	0.27	1 :8	1.32	0.34	1 :8	2.18	0.19
Shannon-Wiener 多样性指数 Shannon-Wiener diversity indices	1 :8	2.79	0.14	1 :8	0.41	0.68	1 :8	0.17	0.85
Simpson 优势度指数 Simpson′ dominant indices	1 :8	1.96	0.22	1 :8	0.46	0.66	1 :8	0.14	0.87

表 4 不同重金属污染小节肢类土壤动物的主成分分析

Table 4 Principal component analysis on soil microarthropodas communities in upland red soil polluted by different heavy metals

种类 Taxa	第一主成分 PRIN 1	第二主成分 PRIN 2	综合主成分 Comprehensive PRIN
前气门亚目 *Prostigmata*	3.72	−0.76	2.75
符跳属 *Folsomia*	2.94	1.29	2.59
棘跳属 *Onychiurus*	2.63	0.58	2.19
端足目 *Amphipoda*	0.94	0.35	0.81
甲螨亚目 *Oribatida*	0.87	0.15	0.72
双尾目 *Diplura*	0.77	0.34	0.67
中气门亚目 *Mesostigmata*	0.60	−0.03	0.46
鞘翅目 *Coleoptera*	0.35	0.04	0.29
土跳属 *Tullbergia*	0.33	−0.08	0.25
小等跳属 *Isotomiella*	0.26	0.09	0.22
长跳属 *Entomobrya*	0.17	0.15	0.16
特征值 Eigenvalue	4.71	1.31	
贡献率 Contribution rates/%	67.32	18.65	
累积贡献率 Accumulative contribution rates/%	67.32	85.97	

3 讨论

由于重金属污染产生积累性、不可逆性和长期性等后果,有关重金属方面的研究一直是国内外环境科学、生态科学等领域的研究热点。作为土壤生态系统中重要组成部分的小节肢类土壤动物,具有数量大、种类多和对重金属污染敏感等特点,因此有必要就田间条件下重金属污染对小节肢类土壤动物种群的实际影响开展研究。很多研究发现随着重金属污染的加重,土壤动物的数量特别是优势类群的数量呈明显减少趋势。例如,张永志等室内实验研究发现随着 Cu 污染程度的增加,土壤动物的种类数和个体密度急剧减少[11]。杨责凯等野外调查发现随着污染程度的升高,土壤动物优势类群的密度呈有规律的递减,表明重金属污染会导致土壤动物数量分布不同[17]。本研究结果也发现 Pb、As 和 Cd 污染均明显降低了小节肢类土壤动物的数量,这与其他研究结果是一致的[11,17]。但是,不同种类重金属污染对土壤中一些小节肢类群的影响是不同的。如在本研究中,Pb 污染对弹尾目的影响明显大

于其对蜱螨目的影响,表明弹尾目对 Pb 的敏感性高于蜱螨目,这与 Santorufo 等的研究结果一致,其发现弹尾目丰度与土壤中 Pb 的浓度呈显著负相关[18]。Cd 污染显著降低了土壤蜱螨目的丰度,而对土壤弹尾目丰度无显著影响,因此弹尾目、蜱螨目等小节肢类土壤动物对不同重金属元素污染敏感性是不同的。

在生态学研究中使用的功能性分析和各种指数可用于评价环境胁迫对土壤生物的间接影响[16]。张永志等、杨责凯等的研究发现高浓度的重金属污染(Cd>15 mg/kg; Pb>450 mg/kg)会显著降低土壤节肢动物多样性[11, 17],而在本研究中,重金属 Cd、Pb 和 As 污染对小节肢类土壤动物各群落多样性指数均无显著影响。本研究结果与上述研究结果的不同可能是由于本研究采用的重金属最高污染水平远低于张永志等和杨责凯等在研究中的污染水平。事实上,很多研究也发现一定程度的重金属污染对土壤节肢动物多样性没有明显影响。如 Migliorini 等研究发现随着 Pb 浓度的升高,土壤节肢动物群落结构和多样性均无明显变化,而其丰度会发生显著降低[9]。Santorufo 等和 Grzes 等研究结果也发现随着土壤重金属污染程度升高,土壤节肢动物多样性即 Simpson 和 Shannon 指数也都较高[18-21]。

虽然对重金属污染的环境影响评价和监测已经成为共识,但是,监测的内容和方法尚未明确。选择的生态受体必须是维持土壤功能的重要生物,同时还应该选择最敏感的生态受体。为了分析各小节肢类土壤动物对该地区土壤节肢动物群落的贡献大小,利用主成分法对收集到的小节肢类土壤动物进行分析,结果表明,前气门亚目、符跳属和棘跳属在综合主成分中得分较高,即这 3 种小节肢类动物对总群落贡献较大,为红壤旱地小节肢类土壤动物群落中的主导因子。由此可见,前气门亚目、符跳属和棘跳属等小节肢类在大田调查中具有其数量相对稳定、分布较为均匀的特性,同时为该地区红壤旱地中的优势物种,可总体上反映小节肢类土壤动物总群落水平,因此可作为未来该地区重金属污染环境影响评估和监测的指标生物,也可以作为重金属污染阈值研究的生态受体之一。

总之,田间试验研究结果表明 Pb、As 和 Cd 污染显著降低了小节肢类土壤动物总数量及蜱螨目的丰度,Pb 和 As 污染显著降低了土壤弹尾目的丰度,而 Cd 污染对其没有显著影响。与其丰度相比,土壤动物的多样性指数对反应不同重金属污染的灵敏度较差。前气门亚目、符跳属和棘跳属可总体上反映小节肢类土壤动物总群落水平,可作为未来本地区重金属污染环境影响评估和监测的重要指示生物。须指出的是,现有农业用地土壤环境质量标准 GB 15618—1995 有关重金属阈值的制订未考虑到重金属污染对土壤生物受体即土壤节肢动物的影响[22-23]。美国环保署和加拿大等在制定农业用地土壤质量指导值时,其中考虑的主要生态受体包括土壤节肢动物[24-25]。我国一些学者也提出土壤节肢动物应作为污染物土壤生态风险分析的重要内容[23, 26]。但是,我国目前还非常缺乏不同重金属污染对土壤动物生态毒理方面的一手数据。从本研究结果可以看出,Pb、As 和 Cd 等不同重金属污染对小节肢类土壤动物群落的影响是不同的,因此,在未来制订土壤环境质量标准时,应对不同污染物分别找出有显著影响的主要途径进行剂量-效应关系研究,得出主要途径的土壤污染危害临界值,以此得出该土壤的污染危害阈值。

References:

[1] Zhang M K, Wang H, Zhang H M. Distinguishing different sources of heavy metals in soils on the coastal plain of eastern Zhejiang province. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(10): 1946-1954.

[2] Li T, Li C Y, Yu D N, Zhang J Y, Zheng R Q. Effects of heavy metals from road traffic on the community structure and spatial distribution of cropland soil animals. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(18): 5001-5011.

[3] Bai Y, Shi S D, Qi X, MaY J, Pan Z X. Influence of heavy metal pollution on soil animal community in Luqiao, Taizhou City. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(2): 421-430.

[4] Xu J, Ke X, Song J, Luo Y M. Role of collembola in assessment of ecological risk of heavy metal contamination of soils. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 544-549.

[5] Song B, Ma J H, Li J, Wei L H, Yin X Q. Soil animals and their response to soil pollution in Kaifeng city. Acta Pedologica Sinica, 2007, 44(3): 529-535.

[6] Yi W Y. Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 2000.

[7] Wang Z Z, Zhang Y M, Xing X J. Effect of change in soil environment on community structure of soil animal. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 892-897.

[8] Sun J W, Huang Y Z, Shi M C, Cui Y S, Li X F, Zhao L J, Du

X, Gao W G. The review of heavy metals biotoxicity in soil. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2861-2869.

[9] Migliorini M, Pigino G, Bianchi N, Bernini F, Leonzio C. The effects of heavy metal contamination on the soil arthropod community of a shooting range. Environmental Pollution, 2004, 129(2): 331-340.

[10] Li Z W, Wang Z Z, Zhang Y M, Xin X J. Effect of Cadmium on soil animal community structure. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(6): 931-934.

[11] Zhang Y Z, Xu J M, Ke X, Xie Z M. Effects of copper pollution on soil fauna community structure. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(S1): 127-130.

[12] Yin W Y, Hu S H, Shen Y F. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998.

[13] Yin W Y, Yang F C, Wang Z Z. Subtropical Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1992.

[14] Li X G, Liu B, Wang X X, Han Z M, Cui J J, Luo J Y. Field trials to evaluate effects of continuously planted transgenic insect-resistant cottons on soil invertebrates. Journal of Environmental Monitoring, 2012, 14(3): 1055-1063.

[15] Magurran A E. Measuring Biological Diversity. Oxford: Blackwell Science, 2004.

[16] Ma K P, Liu C R, Liu Y M. Measurement of biotic community diversity Ⅱβ Measure methods of diversity. Biodiversity Science, 1995, 3(1): 38-43.

[17] Yang G K, An J M. Heavy metal contaminated soil animal diversity analysis. Guangdong Agricultural Sciences, 2012, 39(10): 85-87.

[18] Santorufo L, Van Gestel C A M, Rocco A, Maisto G. Soil invertebrates as bioindicators of urban soil quality. Environmental Pollution, 2012, 161: 57-63.

[19] Gaw S K, Kim N D, Northcott G L, Wilkins A L, Robinson G. Uptake of ΣDDT, arsenic, cadmium, copper, and lead by lettuce and radish grown in contaminated horticultural soils. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(15): 6584-6593.

[20] Nahmani J, Lavelle P. Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in a grassland of Northern France. European Journal of Soil Biology, 2002, 38(15): 297-300.

[21] Grześ I M. Ant species richness and evenness increase along a metal pollution gradient in the Bolesław zinc smelter area. Pedobiologia, 2009, 53(1): 65-73.

[22] Xia J Q. Detail for Soil Environmental Quality Standard. Beijing: China Environmental Science Press, 1996.

[23] Xia J Q, Luo Y M. Several key issues in research of soil environmental quality in China. Journal of Ecology and Rural Environment, 2007, 23(1): 1-6.

[24] USEPA (United States Environmental Protection Agency). Guidance for Developing Ecological Soil Screening Levels. Washington: Office of Solid Waste and Emergency Response, 2003.

[25] CCME (Canadian Council of Ministers of the Environment). A Protocol for the Derivation of Environmental and Human Health Soil Quality Guidelines. Winnipeg, 1996.

[26] Zhou Q X, Wang Y. Methodological systems of building agricultural soil quality criteria in China. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 12(S1): 38-44.

参考文献:

[1] 章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1946-1954.

[2] 李涛, 李灿阳, 俞丹娜, 张加勇, 郑荣泉. 交通要道重金属污染对农田土壤动物群落结构及空间分布的影响. 生态学报, 2010, 30(18): 5001-5011.

[3] 白义, 施时迪, 齐鑫, 马勇军, 潘志祥. 台州市路桥区重金属污染对土壤动物群落结构的影响. 生态学报, 2011, 31(2): 421-430.

[4] 许杰, 柯欣, 宋静, 骆永明. 弹尾目昆虫在土壤重金属污染生态风险评估中的应用. 土壤学报, 2007, 44(3): 544-549.

[5] 宋博, 马建华, 李剑, 魏林恒, 殷秀琴. 开封市土壤动物及其对土壤污染的响应. 土壤学报, 2007, 44(3): 529-535.

[6] 尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000.

[7] 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.

[8] 孙晋伟, 黄益宗, 石孟春, 崔岩山, 李小方, 招礼军, 杜心, 高卫国. 土壤重金属生物毒性研究进展. 生态学报, 2008, 28(6): 2861-2869.

[10] 李忠武, 王振中, 张友梅, 邢协加. Cd 对土壤动物群落结构的影响. 应用生态学报, 2000, 11(6): 931-934.

[11] 张永志, 徐建民, 柯欣, 谢正苗. 重金属 Cu 污染对土壤动物群落结构的影响. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊): 127-130.

[12] 尹文英, 胡圣豪, 沈韫芬. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.

[13] 尹文英, 杨逢春, 王振中. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.

[16] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性的测度方法Ⅱβ多样性的测度方法. 生物多样性, 1995, 3(1): 38-43.

[17] 杨责凯, 安建梅. 重金属污染区土壤动物多样性分析. 广东农业科学, 2012, 39(10): 85-87.

[22] 夏家淇. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.

[23] 夏家淇, 骆永明. 我国土壤环境质量研究几个值得探讨的问题. 生态与农村环境学报, 2007, 23(1): 1-6.