

济南市土壤重金属污染现状及其土壤生物学表征

王存龙¹ 董志成² 夏学齐³ 郭卫华⁴ 蒋文惠¹ 季顺乐¹

(1. 山东省地质调查院, 山东 济南 250013; 2. 鲁东大学地理与规划学院, 山东 烟台 261025;
3. 中国地质大学地球科学与资源学院, 北京 100083; 4. 山东大学生命学院, 山东 济南 250100)

摘要:以济南市市区及郊区农田土壤为对象,研究土壤中重金属污染的特征,结果表明,土壤重金属污染不仅引起了生态环境的恶化,而且影响土壤生物多样性,降低了土壤活性。济南市土壤动物各类群的数量与土壤重金属元素含量的相关性统计结果显示:土壤原生动物的数量与 Co、Ni 含量呈明显负相关;土壤线虫数量与 Cu、Mo 含量呈显著负相关;旱生土壤动物数量与 Cu 含量呈显著负相关;说明重金属元素对土壤动物多样性具有不利影响,土壤线虫是耐污种类,旱生动物多为不耐污种类,土壤线虫与旱生动物密度之比可以作为土壤重金属污染程度的生物学指标。通过对土壤地球化学元素含量与土壤生物学参数的相关性分析,找到了重金属的敏感生物指标:Pb 污染的生物学指标为土壤线虫;As 污染的生物学指标是真菌 PLFA 含量等,用土壤生物作为敏感、快速的土壤重金属污染生物毒性的指示物,具有广阔的应用前景。

关键词:土壤重金属污染;生物多样性;敏感生物指标;土壤污染修复;济南市

中图分类号:X141 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)03-0818-09

人类活动对自然界的干扰是多方面的,其中对土壤动物产生较为明显影响的如森林采伐、土地利用、施肥、杀虫剂与除草剂的施放等等。目前的工作大多集中于杀虫剂和不同种类重金属的污染方面。重金属污染物在环境中稳定累积,超过土壤背景值后,不仅对土壤动物产生毒害作用,严重影响土壤生态系统的功能和稳定性,而且在食物链中富集,给人类带来潜在危害。因而土壤重金属污染问题的研究受到广泛关注,成为环境科学和应用生态学的重要研究课题。土壤动物是土壤生态系统的重要组成部分,对重金属污染反应比较敏感,因而通过污染区土壤动物群落结构和污染指示种类的研究,可为土壤质量评价和土壤污染监测提供生物学指标^[1-5]。近年来,国际上土壤原生动物用于生态系统受污程度指示的工作刚开展,其中包括重金属对土壤原生动物的毒性效应。中国土壤原生动物用于环境监测才刚刚起步,对污染严重地区土壤原生动物的种群分布

和数量缺少了解,土壤原生动物分类学研究的滞后和方法学上的欠缺是阻碍其作为监测生物的瓶颈^[6]。国内有人对铅锌矿湿地系统中的土壤原生动物进行研究,结果表明土壤中高含量的重金属对土壤原生动物的危害极大,可使其丰度显著地减少^[9]。随着城市化速度的加快、人口数量的增长、环境污染的加重,城市环境污染,特别是城市土壤污染问题日益引起研究者的重视,同时城市土壤动物群落的研究的日趋深入,土壤动物在生态系统中的作用也愈显重要^[7-8]。

本文旨在通过开展土壤生物多样性剖面测量,系统地查明济南市土壤重金属污染区不同土壤地球化学环境质量条件(即土壤重金属污染元素背景区、过渡区及污染区)下,土壤生物群体的多样性、分布特征及其变化规律等。在土壤生物多样性系统调查的基础上,结合土壤地球化学环境质量调查和农产品安全性评价研究,通过系统分析,研究土壤动物、土壤微生物类群、功能、结构以及土壤种子库与土壤

收稿日期:2011-08-29;改回日期:2011-12-29

基金项目:中国地质调查局、山东省人民政府计划项目(1212010511206)资助。

作者简介:王存龙,男,1962年生,高级工程师,主要从事地球化学勘查及生态地球调查与评价工作;E-mail:wcl598@163.com。

地球化学环境质量和农产品品质之间的相关关系,研究土壤生物多样性与土壤重金属污染之间的关系,确定土壤重金属污染区的特异土壤微生物,为环境污染的生态修复提供技术支撑,为该地区社会经济发展和规划提供依据。

1 研究区概况

山东省济南市,南依泰山,北跨黄河,地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的交接带上,地势南高北低。地形可分为三带:北部临黄带,中部山前平原带,南部丘陵山区带。济南境内河流主要有黄河、小清河两大水系。湖泊有大明湖、白云湖等。煤、铁、石油、地热等矿产资源丰富,乡镇企业星罗棋布,农作物种类繁多,大宗作物有小麦、玉米、大豆等^[9]。本区位于华北地块南部,以小清河为界,北部是黄河冲积平原,南部是泰沂山脉山前坡麓和山前平原,发育第四纪地层,局部地段出露早古生代灰岩和中生代火山岩^[9]。

2 研究方法

2.1 样品采集

在济南市开展土壤重金属污染区生物多样性及其作用调查,控制面积 900 km²,剖面长 15 km,采集土壤原生动物、湿生土壤动物和旱生动物土壤样品各 16 份,共计 48 份^[9]。

大型土壤动物:在取样点,划出 0.5 m² 区域,挖出深 5 cm 的土壤,分拣出其中的土壤动物装入玻璃瓶内,用 75%酒精保存。

中小型旱生土壤动物:在取样点用土壤取样器钻取 0~15 cm 深土壤 100 mL 3 份,均装入 PE 封口袋(聚乙烯封口袋)中带回实验室。将土样用 Tullgren 干漏斗法进行分离,收集于玻璃瓶内,用 75%酒精保存。

中小型湿生土壤动物:在取样点用土壤取样器钻取 0~15 cm 深土壤 50 mL,装入 PE 封口袋(聚乙烯封口袋)中带回实验室。将土样用 Baermann 湿漏斗法进行分离,收集于玻璃瓶内,用 75%酒精保存。

土壤原生动物:在取样点用土壤取样器钻取 0~15 cm 深土壤 100 mL,装入 PE 封口袋(聚乙烯封口袋)中带回实验室,用消毒纱布覆盖自然风干备用。

2.2 鉴定和统计

借助 Olympus 体视显微镜观察,依据尹文英等

研究资料^[10],将大型土壤动物准确鉴定至科,中小型旱生土壤动物鉴定至目,中小型湿生土壤动物仅发现线虫动物,由于标本处理复杂和现有条件的限制,难以进一步准确鉴定。

土壤原生动物的定量研究采用了尹文英等三级十倍环式稀释法^[10],具体操作如下:(1)稀释土样:将风干土样混合均匀,从中随机取出 2g 土样加 18 mL 无菌蒸馏水,充分震荡(笔者用摇床剧烈振荡 30 min),这时的稀释度为 10。然后用定量吸管吸出 2 mL 放入 18 mL 无菌水中摇匀,这时稀释度为 102,再从 102 的稀释液中吸出 2 mL,加 18 mL 无菌水,则稀释度为 103。再从 103 的稀释液中吸出 2 mL,加 18 mL 无菌水,则稀释度为 104。根据原生动物的丰富度选择土壤的稀释度,但每一定量土样均要选择连续的 3 个稀释度,即“3 级 10 倍”之意。我们研究的土壤用 102~104 共 3 个稀释度。

(2)培养基的配备:0.5 g NaCl+1.2%琼脂+98%蒸馏水。消毒灭菌,趁热倒入直径为 9 cm 的培养皿,使其完全覆盖皿底,约 1/3 高度。趁还未凝固时埋入 5 个小玻璃环(专门加工的内径 1.8 cm 高 0.6 cm)。每个大培养皿中有 5 个培养环。按照顺时针顺序记住 5 个培养环的编号,在第一与第五个培养环之间留有较大的空间,以免编号混淆。每种稀释度有 10 个环,故有 2 个培养皿。每个定量土样须有 3 种稀释度,即应有 30 个环,6 个培养皿。

(3)接种、培养和镜检:将 3 种不同稀释度的土壤液摇匀后分别用微量进样器将稀释液吸出 1 mL,接种于各自的培养环内。将培养皿置于 25℃培养箱中黑暗条件下培养,保持相对湿度 80%。分别在第 4,7,11 天时在低倍镜下观察每个环中是否有原生动物,按肉足虫、鞭毛虫、纤毛虫分别记录。

(4)统计:经过 4,7,11 天 3 次镜检后,就可以获知三大类原生动物在哪几号环中出现过,有多少环中没有出现。然后根据 Stout“3 级 10 倍”环式稀释法原生动物密度换算表推算每克土壤中的数量。三大类的数量相加,即为原生动物总数。这是根据微生物数量统计法的原理求出的最或然数(MPN),以此推断每克风干土壤中原生动物的数量。

2.3 数据分析

以实验所得土壤动物的类群及数量描述各样地土壤动物区系,结合区域生态地球化学评价取得提供的土壤无机元素(重金属为主)含量,借助统计分析软

件 SPSS 12.0 求出相关系数, 由此进一步推断各类土壤动物的丰富度与重金属元素含量的相互关系。

3 问题与讨论

3.1 济南市土壤重金属污染现状

土壤在自然界中处于大气圈、岩石圈、水圈和生物圈之间的过渡带, 是联系有机界和无机界的中心环节, 也是结合地理环境各组成要素的纽带。土壤作为重要的发生器、储存器、转换器、缓冲器和调控器, 其环境质量好坏最终会影响到人类健康和社会经济的可持续发展。然而, 随着工农业的发展, 土壤污染问题越来越突出, 各种重金属、有机物、放射性物质和病原微生物等对土壤环境构成了巨大威胁。根据多目标区域地球化学调查和区域生态地球化学评价资料^[9], 济南市土壤重金属元素砷、镉、铬、汞、镍、铅、锌 7 项单因子土壤环境质量评价^[13]结果(表 1, 图 1)表明: 符合 I 级(类)、II 级(类)土壤环境质量的土壤总面积均占 97% 以上。符合 I 级土壤环境质量的土壤面积占 51% 以上, 其中砷和镍达 90% 以上, 镉最低, 为 51.25%。7 项指标符合 III 级(类)和超 III 级(类)土壤环境质量的面积均在 3% 以下, 其中砷、镍、铅、锌不足 1%。符合超 III 类土壤环境质量的土壤面积均在 1% 以下, 其中砷、镍、铅没有超 III 类土壤^[9]。

综合环境质量评价结果表明: 符合 I 级、II 级土壤环境质量的土壤总面积占 96.87%, 其中 I 级占 55.02%, II 级占 41.85%。符合 III 级和超 III 级土壤环境质量的面积仅为 3.13%, 其中 III 级占

2.87%, 超 III 级占 0.26%。由综合环境质量分级图(图 1)可以看出, 济南市土壤重金属元素单因子评价和综合评价结果反映出, 济南市土壤环境质量总体状况良好, 绝大多数土地的环境质量达到 I 类和 II 类标准, 生态环境良好, 对人体健康也没有明显的影响。但济南城区小清河沿岸化工、冶炼和南部水泥、炼油等污染企业集中分布区有岛状重度土壤污染区。

3.2 重金属元素污染对土壤动物多样性的影响

土壤由气相、液相和固相三相组成, 是生物赖以生存的重要载体, 又是具有物理、化学性质及生命形式的复合体。土壤生物是整个土壤圈的核心, 它在促进有机质分解、土壤矿质营养循环、维持及提高土壤肥力方面发挥着关键作用, 土壤生物多样性反映了土壤中生物类群的多变性和土壤的生物活性, 土壤生物多样性和土壤活性是培育健康土壤的基础, 是健康土壤的重要指标^[10]。土壤重金属污染不仅引起了生态环境的恶化, 而且影响土壤生物多样性, 降低了土壤活性。中小型土壤节肢动物生活在干燥土壤隙缝中, 体型较小, 包括螨类、跳虫、小型昆虫和幼虫、小型多足类等, 重金属污染区的中小型土壤节肢动物的优势类群一般为蜱螨类和弹尾类, 它们有着比较强的耐污能力, 构成重金属污染区土壤动物群落的主体^[14-16]。国内室内人工可控实验的研究结果表明, 土壤动物以弹尾目、蜱螨目和膜翅目为优势类群, 随着重金属 Cu 污染程度的增加, 土壤动物的数量急剧减少^[17]。Cd 污染对土壤动物影响的模拟实验结果表明, 土壤动物的种类与个体数量与 Cd 处理浓度的大小呈明显负相关^[18]。

表 1 济南市城市生态系统土壤单因子和综合环境质量评价结果

Table 1 Statistical result of soil environmental quality assessment in urban ecosystem of Jinan City

指标	I 类土壤		II 类土壤		III 类土壤		超 III 类土壤	
	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%	面积/km ²	百分比/%
砷	364.2033	91.05	34.7627	8.69	1.034	0.26	0	0
镉	205.0009	51.25	188.1123	47.03	4.6427	1.16	2.2441	0.56
铬	314.9917	78.75	76.8357	19.21	5.1666	1.29	3.006	0.75
汞	261.8531	65.46	131.7136	32.93	4.4355	1.08	1.9978	0.5
镍	387.2866	96.82	12.1289	3.03	0.5845	0.15	0	0
铜	339.877	84.97	60.123	15.03	0	0	0	0
铅	319.2113	79.8	80.7233	20.18	0.0654	0.02	0	0
锌	339.945	84.99	57.0361	14.26	2.0659	0.52	0.953	0.24
综合	220.0622	55.02	167.4144	41.85	11.4724	2.87	1.051	0.26

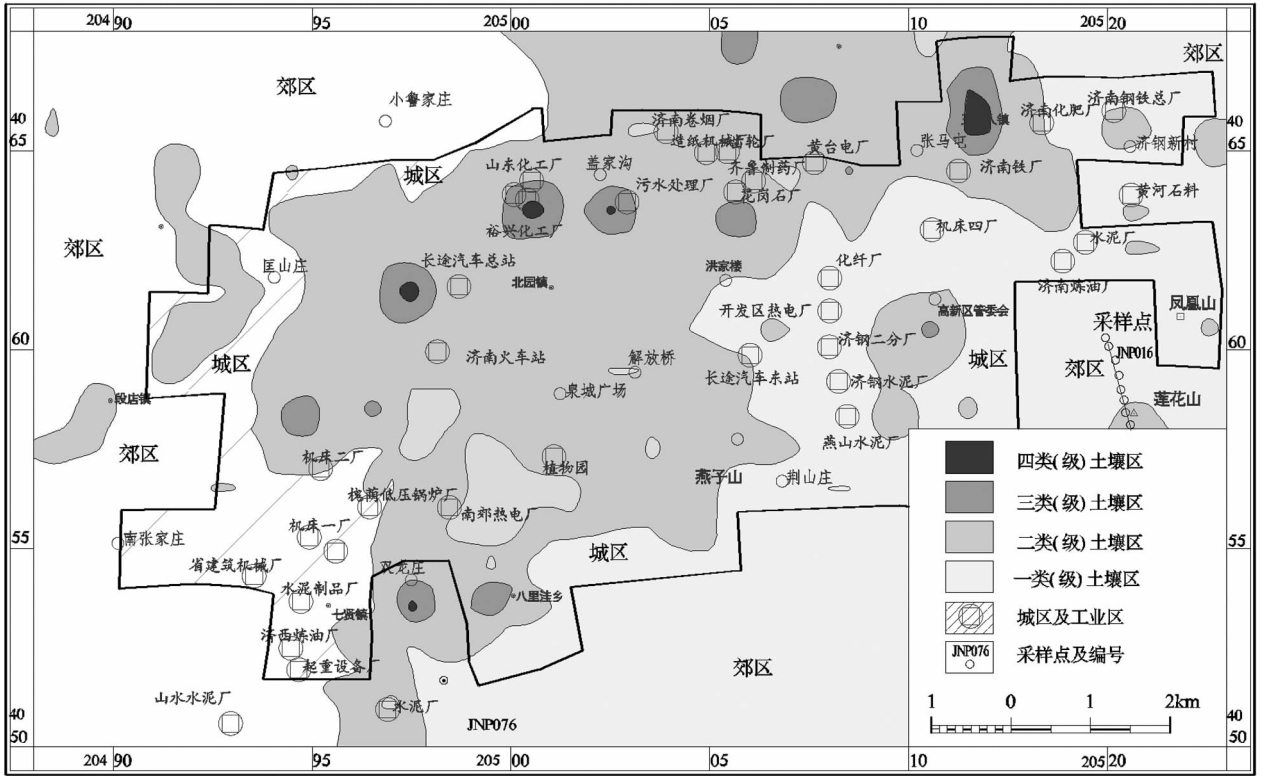


图 1 济南市城市生态系统土壤综合环境质量分区图

Fig.1 Grading plot of soil comprehensive environmental quality in urban ecosystem of Jinan City

从济南市土壤动物各类群的数量与土壤重金属元素含量的相关性统计结果(表 2)可以看出:土壤原生动物数量与 Co 含量呈明显负相关 ($r=-0.532, p<0.05$), 与 Ni 含量呈明显负相关($r=-0.518, p<0.05$), 与 Pb 含量呈显著负相关($r=-0.553, p<0.05$), 而与其他元素未显示明显相关关系^[13]。

土壤线虫数量与 Cu 含量呈显著负相关($r=-0.633, p<0.01$), 与 Mo 含量呈显著负相关($r=-0.516, p<0.05$), 而与其他元素未显示明显相关关系。

旱生土壤动物数量与 Cu 含量呈显著负相关($r=-0.521, p<0.05$), 而与其他元素未显示明显相关关系。

以上结果表明, 重金属元素污染会明显降低土

壤动物多样性, 并且不同种类元素对于不同动物类群抑制作用不同。有的重金属元素与土壤动物数量相关性不明显, 可能是由于重金属元素浓度未达到一定水平, 也可能是其他外在因素如耕作、施肥、喷药等干扰所致。实地验证结果是居民生活和工地施工等人类活动的强烈干扰, 显著降低了微生物的繁殖和生存能力。如 JNP006 样地具有最多的细菌、放线菌、固氮菌, 真菌数量也排在第二位(表 3)。由于 JNP006 样地是黄豆田, 说明黄豆能够显著促进微生物的增殖, 这是由于黄豆通过固氮作用可以降低腐殖质的 C/N, 提高腐殖质的质量, 而腐殖质又是微生物的食物来源, 可以促进微生物的繁殖^[19]。JNP016

表 2 济南土壤动物各类群数量与土壤重金属元素含量的相关性

Table 2 Correlation coefficients (r) between number of animal population and heavy metal content in Jinan City

化学元素	Cd	Co	Cr	Cu	Hg	Mn	Mo	Ni	Pb	V	Zn
原生动物	0.239	-0.532*	0.379	0.002	-0.081	-0.288	0.114	-0.518*	0.082	-0.418	-0.202
线虫	-0.078	0.161	-0.066	-0.633**	-0.489	0.288	-0.516*	0.191	-0.553*	0.129	-0.249
旱生动物	-0.259	0.087	0.324	-0.353	-0.202	-0.047	-0.321	0.337	-0.308	0.234	-0.521*

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关, ** 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 3 济南不同生理类群土壤微生物数量变化(单位: $10^5/g$ 土壤)
 Table 3 Changes in number of soil microorganisms of different physiological groups in Jinan City (10^5 number g^{-1} soil dw)

样地号	细菌	真菌	放线菌	固氮菌	氨化菌	硝化菌	反硝化菌	纤维素分解菌
JNP001	11.00	0.03	5.40	4.20	950.00	0.01	2.50	0.10
JNP006	93.33	0.06	27.50	25.43	45.00	0.45	25.00	1.10
JNP011	9.67	0.00	8.80	2.50	40.00	0.01	0.95	0.00
JNP016	2.67	0.00	6.77	0.10	45.00	0.03	0.45	0.03
JNP021	27.33	0.04	8.03	6.80	1150.00	0.45	45.00	0.25
JNP026	3.33	0.06	9.30	9.80	45.00	0.25	9.50	0.05
JNP031	18.33	0.02	16.80	7.47	45.00	0.95	4.50	0.45
JNP036	8.83	0.03	10.73	10.43	200.00	0.00	25.00	0.03
JNP041	72.00	0.09	9.93	16.83	250.00	0.03	1.50	0.03
JNP046	53.33	0.05	15.47	14.57	95.00	0.08	9.50	0.03
JNP051	44.33	0.03	11.00	10.40	65.00	0.10	2.50	0.00
JNP056	14.67	0.01	7.65	15.77	40.00	0.10	2.50	0.02
JNP061	25.00	0.03	18.30	11.45	95.00	0.05	15.00	0.03
JNP066	37.67	0.02	12.60	0.85	11000.00	0.00	0.95	0.03
JNP071	37.67	0.03	21.70	15.85	150.00	0.08	4.50	0.15
JNP076	32.00	0.02	8.53	4.50	20.00	0.01	4.50	0.00

样地具有最少的细菌、真菌、固氮菌,放线菌数量也排在倒数第二位。JNP016 样地为工地边的杂草丛,附近是居民区和工地,说明人类的干扰显著降低了微生物的繁殖和生存能力。由此可见,影响微生物群落的因素很广泛,地上植被和人类的干扰也是影响微生物群落的重要因素^[20-21]。重金属 Cd 与细菌、纤维素分解菌、放线菌、固氮菌成显著的正相关($p < 0.05$)(表 4),说明在低浓度下,Cd 元素的增加可以促进微生物的生长和繁殖^[22];N 素与放线菌、细菌、固氮菌、纤维素分解菌成显著正相关($p < 0.05$),这与其他学者的研究结果相同,N 素的增加可以显著促进微生物的生长和繁殖。究其原因是济南市的土壤由于人为干扰较多,尤其是工程施工,已经严重破坏了地下土壤微生物的结构,影响了土壤健康。真菌、放线菌、固氮菌数量均与土壤 P、N 含量成显著正相关,除此之外,固氮菌数量与 Cd 浓度亦呈显著正相关。影响纤维素分解菌的地球化学元素较多,纤维素分解菌与 Cd、P、SiO₂、Na₂O 呈显著正相关,而与 Co、Ni、V、TFe₂O₃、CaO 呈显著负相关,说明纤维素分解菌这一生理类群更敏感,可作为土壤污染的指示菌群。

3.3 土壤重金属污染的生物学表征

小型湿生土壤动物生活在潮湿土壤中,如线虫、线蚓、涡虫、熊虫等,重金属污染区的小型湿生土壤动物的优势类群为线虫类^[14]。土壤线虫对污染环境具有明显的生物指示作用,作为一种有效的生态毒理诊断指标具有良好的发展前景^[15]。大型土壤动物一般指肉眼可见的各类动物,如蜈蚣、马陆、蜘蛛、蚂蚁、甲虫、蚯蚓等,蚯蚓是重金属元素污染区的重要优势类群,耐污性强,并且体内对重金属元素的富集能力高^[17]。因此利用蚯蚓指示土壤污染状况已被作为土壤污染生态毒理诊断的一项重要指标,通过草甸棕壤条件下 Cu、Zn、Pb、Cd 单一/复合污染对蚯蚓的急性致死及亚致死效应的实验结果表明,Cu、Pb 浓度与蚯蚓死亡率显著相关^[23]。

与鱼台、寿光等土壤正常区对比,济南土壤重金属污染地区革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比例和细菌/真菌比例显著偏高(表 5)。说明以上指标可作为重金属复合污染的生物学指标。线虫、真菌、放线菌、固氮菌、反硝化菌数量、Biolog Shannon 均匀度、Biolog McIntosh 均匀度越低表明重金属复合污染越严重,Gini 指数越高表明重金属复合污染越严重^[17]。

表 4 济南不同生理类群可培养土壤微生物数量与地球化学元素的相关性
 Table 4 Correlation coefficients (*r*) between number of soil microorganisms of different physiological groups and soil chemical properties in Jinan City

化学元素	细菌	真菌	放线菌	固氮菌	氨化菌	硝化菌	反硝化菌	纤维素分解菌
As	0.14	0.23	0.12	0.18	-0.06	0.24	0.19	0.61*
B	-0.11	-0.16	0.21	0.13	-0.03	-0.20	0.08	-0.15
Cd	0.66*	0.43	0.56*	0.58*	-0.02	0.22	0.25	0.78*
Co	-0.10	0.18	0.16	-0.11	-0.03	0.47	0.04	-0.04
Cr	0.25	0.18	0.29	0.24	-0.09	0.09	0.08	0.60*
Cu	0.07	-0.09	0.05	-0.08	-0.08	0.25	0.34	0.37
F	0.38	0.36	0.12	0.31	-0.10	-0.26	-0.31	-0.05
Hg	-0.21	-0.36	-0.17	-0.27	-0.08	-0.14	-0.14	-0.10
Mn	0.14	0.49	0.03	0.13	-0.08	0.36	-0.35	-0.01
Mo	0.21	-0.05	0.02	-0.11	0.09	0.03	0.24	0.35
Ni	-0.10	0.00	0.39	-0.02	-0.06	0.31	0.19	0.13
P	0.24	-0.10	0.26	0.09	0.01	0.12	0.28	0.50
Pb	0.12	-0.05	0.03	-0.07	-0.01	0.13	0.23	0.36
V	-0.04	0.07	0.20	-0.01	-0.08	0.61*	-0.12	0.16
Zn	0.19	-0.10	0.09	-0.18	0.53*	0.08	0.02	0.19
Se	0.07	-0.07	-0.02	-0.03	-0.02	-0.04	0.25	0.26
N	0.57*	0.14	0.65*	0.51*	0.07	0.06	0.19	0.60*
S	-0.03	0.07	-0.21	-0.13	-0.05	-0.07	-0.07	0.16
SiO ₂	0.05	0.13	-0.20	-0.08	-0.18	0.34	-0.11	0.06
Al ₂ O ₃	-0.10	-0.04	-0.28	-0.27	-0.07	0.39	-0.24	-0.20
TFe ₂ O ₃	0.06	0.25	0.01	0.01	-0.09	0.55*	-0.26	0.02
MgO	-0.08	-0.09	0.32	0.14	0.13	-0.25	0.06	0.02
CaO	-0.11	-0.17	0.14	0.05	0.13	-0.41	0.15	-0.11
Na ₂ O	0.21	0.16	0.06	0.14	-0.14	0.14	0.25	0.48
K ₂ O	0.14	0.08	0.04	-0.06	0.05	0.32	-0.36	0.06

注: * 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 5 济南、鱼台、寿光的土壤生物指标的均值比较
 Table 5 Mean values of bio-parameters of soil in Jinan, Yutai, and Shougang

	济南	鱼台	寿光
线虫数量	67.69	96.38	136.19
原生动物数量	12853	10187	8906
细菌数量	3069791	452869985	180940479
真菌数量	3376	55790	124448
革兰氏阳性菌	41.54	21.62	8.44
革兰氏阴性菌	43.64	23.88	12.87
真菌	16.66	22.71	15.29
革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌	1.33	0.91	0.65
细菌/真菌	7.03	2.08	1.57

注: 济南样品数 N=48, 鱼台样品数 N=155, 寿光样品数 N=144。

由表 6 可以找到重金属污染的生物学指标。土壤线虫、Biolog Shannon 均匀度、Biolog McIntosh 指数可作为 Ni 污染的生物学指标,土壤线虫越多、Biolog Shannon 均匀度越高表明 Ni 含量越高, Biolog McIntosh 指数越低表明 Ni 污染越严重。土壤线虫还可以作为 Pb 污染的生物学指标,土壤线虫越少表明 Pb 污染越严重。土壤原生动物、革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比例可作为 Cr 污染的生物学指标,土壤原生动物、革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比例越高表明 Cr 污染越严重。真菌 PLFA 含量还可作为 As 污染的生物学指标,真菌 PLFA 含量越高暗示

As 污染越重。革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比例还可作为 Hg、Zn 污染的生物学指标,革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比例越高,表明 Hg、Zn 污染越严重。

4 结 论

在济南市重金属严重污染区内,土壤重金属污染对土壤动物多样性确实具有不利影响,土壤线虫是耐污种类,早生动物多为不耐污种类,土壤线虫与早生动物密度之比有可能作为土壤重金属污染程度的生物学指标。

通过对土壤地球化学元素含量与土壤生物学参

表 6 土壤生物多样性指标与土壤地球化学元素相关分析

Table 6 Correlation analysis of biological parameters and geochemical element content of soil

相关系数 Correlation	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Mn	Ni	Pb	Zn
线虫	-0.14	0.17	-0.14	-0.21	-0.22	0	0.31*	-0.34	-0.24
原生动物	-0.03	-0.05	0.34*	-0.11	0.02	-0.14	-0.28	-0.01	-0.1
细菌	0.25	0.07	-0.02	0.12	-0.03	0.19	0.16	-0.01	0.06
真菌	0.04	0.15	-0.22	0.01	-0.14	0.18	0.04	-0.06	-0.05
放线菌	0.03	0.21	-0.14	0.06	-0.08	0.17	0.02	-0.04	0.01
固氮菌	-0.06	0.19	-0.09	0	-0.04	0.06	-0.07	-0.06	-0.03
氨化菌	0.18	0	-0.09	0.06	-0.07	0.14	0.09	-0.06	0.1
硝化菌	0.25	0.12	0.03	0.22	-0.08	0.16	0.14	-0.03	0.17
反硝化菌	0.18	0.13	-0.12	0.06	-0.1	0.19	0.03	-0.1	-0.06
纤维素分解菌	-0.14	0.28	0.23	-0.02	-0.06	-0.15	-0.14	-0.02	0.01
Shannon 丰富度	0.15	0.09	0.11	0.11	0.14	0.1	-0.29	0.19	0.07
Shannon 指数	0.24	0.1	0.03	0.1	0.03	0.28	-0.09	0.14	-0.04
Shannon 均匀度	-0.15	-0.15	-0.03	-0.13	-0.07	-0.07	0.31*	-0.1	-0.23
Simpson 指数	0.02	0.01	-0.05	0.12	-0.04	0.07	0.09	0.28	0.05
McIntosh 指数	-0.28	-0.1	0.1	-0.21	0.15	-0.46*	-0.61*	-0.03	0.04
McIntosh 均匀度	-0.11	-0.14	-0.02	-0.13	-0.06	-0.02	0.31	-0.08	-0.25
AWCD 值	0.07	0.16	0.16	-0.07	-0.32*	0.09	-0.2	-0.02	-0.22
Gini 指数	-0.26	-0.06	0.01	-0.18	-0.03	-0.3	0.07	-0.21	0.04
革兰氏阳性菌	0.05	-0.07	0.12	-0.08	0.01	-0.06	-0.12	-0.01	-0.12
革兰氏阴性菌	-0.01	-0.19	-0.06	-0.15	-0.09	-0.1	-0.14	-0.03	-0.2
真菌	0.34*	0.05	0.01	0.13	-0.09	0.31*	0.13	-0.02	-0.09
阳性菌/阴性菌	0.13	0.26	0.56*	0.24	0.57*	-0.01	-0.15	0.17	0.33*
细菌/真菌	-0.15	-0.21	0	-0.12	0	-0.3	-0.26	0	-0.03
种子库密度	0.14	0.03	0.02	0.03	-0.1	0.07	-0.03	-0.09	-0.09
Margalef	0.1	0.16	0.13	0.17	0.15	0.13	-0.07	0.21	0.16
Simpson 指数	-0.12	0.11	0.12	-0.01	0.25	-0.09	-0.25	0.11	0.17
Shannon-wiener 指数	0.12	0.1	-0.05	0.09	-0.05	0.18	0.06	0.1	0
均匀性指数	-0.22	-0.01	0.01	-0.11	0.17	-0.19	-0.23	0.06	0.1

注: * 表示在 0.05 水平上显著相关($p < 0.05$), 有效样品数 $N=42$ 。

数的相关性分析,找到了重金属的敏感生物指标:Pb 污染的生物学指标为土壤线虫;As 污染的生物学指标是真菌 PLFA 含量,土壤线虫作为敏感生物可作为 Ni、Pb 的生物学指标。其他生物学指标如革兰氏阳性菌/革兰氏阴性菌比例、真菌 PLFA 含量、Biolog 多样性指数等也可作为重金属污染的生物学指标。用土壤生物作为敏感、快速的重金属污染生物毒性的指示物,具有广阔的应用前景。

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.
Yi Wenying. A brief review and prospect on soil zoology[J]. Bulletin of Biology, 2001, 36 (8):1-3 (in Chinese with English abstract).
- [2] 高云超, 朱文珊, 陈文新. 土壤原生动物群落及其生态功能[J]. 生态学杂志, 2000, 19(1):59-65.
Gao Yunchao, Zhu Wenshan, Chen Wenxin. Structure of the protozoan community in soil and its ecological functions [J]. Chinese Journal of Ecology, 2000, 19 (1):59-65 (in Chinese with English abstract).
- [3] 梁文举, 闻大中. 土壤生物及其对土壤生态学发展的影响 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1):137-140.
Liang Wenju, Wen Dazhong. Soil blots and its role in soil ecology [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12 (1):137-140(in Chinese with English abstract).
- [4] 杨冬青, 高峻. 城市生态系统中土壤动物研究及应用进展 [J]. 生态学杂志, 2002, 21(5):54-57.
Yang Dongqin, Gao Jun. Research and application of soil animals in urban ecosystem [J]. Chinese Journal of Ecology, 2002, 21(5):54-57(in Chinese with English abstract).
- [5] 李忠武, 王振中, 刑协加, 等. 农药污染对土壤动物群落影响的实验研究[J]. 环境科学研究, 1999, 12(1):49-53.
Li Zhongwu, Wang Zhenzhong, Xing Xiejia, et al. Experiments on monitoring pesticide pollution by soil animal community [J]. Research of Environmental Sciences, 1999, 12(1):49-53(in Chinese with English abstract).
- [6] 周可新, 许木启, 曹宏, 等. 土壤原生动物在环境监测中的应用[J]. 动物学杂志, 2003, 38(1):80-84.
Zhou Kexin, Xu Muqi, Cao Hong, et al. Soil protozoa as monitors of the environment [J]. Chinese Journal of Zoology, 2003, 38(1): 80-84(in Chinese with English abstract).
- [7] 冯伟松, 杨军, 叶志鸿, 等. 凡口铅锌矿湿地处理系统的土壤原生动物[J]. 动物学杂志, 2004, 39(1):2-11.
Feng Weisong, Yang Jun, Ye Zhihong, et al. Soil protozoa in wetland treatment system of Pb-Zn mine in Fankou [J]. Chinese Journal of Zoology, 2004, 39(1):2-11(in Chinese with English abstract).
- [8] 廖崇惠, 李健雄, 杨悦屏, 等. 海南尖峰岭热带林土壤动物群落—群落的组成及其特征[J]. 生态学报, 2002, 22(11):1866-1872.
Liao Chonghui, Li Jianxiong, Yang Yueping, et al. The community of soil animal in tropical rain forest in Jianfengling Mountain, Hainan Island, China—Composition and characteristics of community [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22 (11):1866-1872(in Chinese with English abstract).
- [9] 战金成, 王存龙, 季顺乐, 等. 山东省黄河下游流域区域生态地球化学评价[R]. 2010, 6, 17.
Zhan Jincheng, Wang Cunlong, Ji Shunle et al. Regional ecological geochemistry evaluation of the lower Yellow River basin in Shandong Province [R]. 2010, 6, 17(in Chinese).
- [10] 郭卫华, 王仁卿, 周娟, 等. 山东省黄河下游流域生态地球化学调查—土壤生物多样性及其作用研究[R]. 2009, 6, 17.
Guo Weihua, Wang Renqing, Zhou Juan, et al. Regional ecological geochemical survey of the lower Yellow River basin in Shandong province —research on the soil biodiversity and its fuction [R]. 2009,6,17(in Chinese).
- [11] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京:科学出版社, 1998.
Yin Wenying. Pictorial Keys to Soil Animals of China [M]. Beijing:Science Press, 1998(in Chinese).
- [12] 尹文英. 中国亚热带的土壤动物[M]. 北京:科学出版社, 1992.
Yin Wenying. Subtropical Soil Animal in China [M]. Beijing: Science Press, 1992(in Chinese).
- [13] 息朝庄, 戴塔根, 董丹燕. 湖南株洲市土壤重金属分布特征及污染评价 [J]. 中国地质, 2008, 35 (3):524 - 530.
Xi Chaozhuang, Dai Tagen, Huang Danyan. Distribution and pollution assessments of heavy metals in soils in Zhuzhou, Hunan [J]. Geology in China, 2008, 35 (3):524 - 530 (in Chinese with English abstract).
- [14] 尹文英. 中国土壤动物[M]. 北京:科学出版社, 2000.
Yin Wenying. Soil Animal of China [M]. Beijing:Science Press, 2000(in Chinese).
- [15] 张薇, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 土壤线虫对环境污染的指示作用[J]. 应用生态学报, 2004, 15(10):1973-1978.
Zhang Wei, Song Yufang, Sun Tieheng, et al. Soil nematode as a bioindicator of environment pollution [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15 (10):1973-1978 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李安萍, 高晋华. 太原森林公园的土壤动物多样性[J]. 动物学报, 2005, 51(增刊):64-68.
Li Anping, Gao Jinhua. Diversity of soil animals in Taiyuan Forest Park [J]. Acta Zoologica Sinica, 51(supp.):64-68(in Chinese).
- [17] 张永志, 徐建民, 柯欣, 等. 重金属铜污染对土壤动物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(增刊):127-130.
Zhang Yongzhi, Xu Jianmin, Ke Xin, et al. Effect of copper contamination on soil fauna community structure [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(supp.):127-130(in Chinese).
- [18] 李忠武, 王振中, 张友梅, 等. Cd 对土壤动物群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(6):931-934.
Li Zhongwu, Wang Zhenzhong, Zhang Youmei, et al. Effect of

- Cadmium on soil animal community structure [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(6):931-934(in Chinese with English abstract).
- [19] Shen D Z. Microbial diversity and application of microbial products for agricultural purpose in China [J]. J. Agr. Ecosyst. Environ., 1997, 62:237-245.
- [20] Lupwayi N Z, Rice W A, Clayton G W. Soil microbial diversity and community structure under wheat as influenced by tillage and crop rotation[J]. Soil Biol. Biochem., 1998, 30:1733-1741.
- [21] Broughton L C, Gross K L. Patterns of diversity in plant and soil microbial communities along a productivity gradient in a Michigan old-field[J]. Oecologia, 2000, 125:420-427.
- [22] Dai J, Becquer T, Rouiller J H, et al. Influence of heavy metals on C and N mineralisation and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 25:99-109.
- [23] 周启星, 宋玉芳. 污染土壤修复原理与方法[M]. 北京:科学出版社, 2004.
- Zhou Qixing, Song Yufang. The Principle and Method of Remediation in Contaminated Soils [M]. Beijing:Science Press, 2004(in Chinese).

Soil contamination by heavy metals in Jinan City and its biological characteristics

WANG Cun-long¹, DONG Zhi-cheng², XIA Xue-qi³,
GUO Wei-hua⁴, JIANG Wen-hui¹, JI Shun-le¹

(1. Shandong Institute of Geological Survey, Jinan 250013, Shandong, China; 2. Institute of Geography & Planning, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China; 3. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 4. College of Life Science, Shandong University, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: The contamination characteristics of heavy metals in urban and rural soil of Jinan City were investigated in this paper, and the results show that heavy metal contamination not only causes deterioration of ecological environment but also reduces soil biodiversity and activity. Meanwhile, the correlation between the number of animal population and the heavy metal content was analyzed statistically, and the results indicate that there is significantly negative correlation either between the number of soil protozoa and the concentration of Co and Ni or between soil nematode amount and Cu and Mo content. So does the correlation between drought-tolerant animal amount and Cu content. On the one hand, these data imply that heavy metals can cause damage to soil biodiversity; on the other hand, the conclusion can be reached that soil nematodes are of pollution-tolerant species while drought-tolerant animals are not. It is thus believed that the density ratio between them can indicate the contamination degree of soil heavy metals. Moreover, sensitive biological indicators of heavy metals were detected by analyzing the correlation between geological element concentrations and biological parameters of soil. For example, soil nematode is a biological indicator of Pb contamination, and PLFA (epiphyte) can indicate As pollution. The authors hold that using soil organisms as indicators of heavy metal contamination has wide application prospect.

Key words: soil heavy metal pollution; biodiversity; sensitive biological indicator; soil pollution remediation; Jinan City

About the first author: WANG Cun-long, male, born in 1962, senior engineer, mainly engages in geochemical exploration and ecogeochemical survey and assessment; E-mail: wcl598@163.com.