

电子垃圾拆解地重金属污染对稻田土壤线虫群落结构的影响

王赢利^{1,2}, 王宏洪², 廖金铃², 解启来^{2*}

(1.嘉应学院化学与环境学院, 广东 梅州 514015; 2.华南农业大学资源环境学院, 广州 510642)

摘要:为了解电子垃圾污染区重金属对土壤线虫群落结构的影响,采集了广东贵屿镇 8 块稻田的土壤样品,用 ICP-MS 分析重金属含量,并用淘洗-过筛-蔗糖离心漂浮法分离线虫。结果表明:75%的稻田土壤样品不同程度地受到 Cu、Pb、Cd、Zn 的污染,其中 Cu、Pb、Zn 的浓度呈显著正相关($P<0.05$);分离出的线虫隶属于 6 目 19 科 26 属,植物寄生线虫占主要比例,潜根属、螺旋属为常见属;植物寄生线虫的丰度随着 Cu 含量的增加而显著降低($P<0.05$),其成熟指数亦受到 Pb 的显著抑制($P<0.05$)。与未受重金属污染的样本相比,线虫数量在轻微污染稻田中略有增加,而在其他样本中会随着污染程度的增加而显著下降。此外,受电子垃圾重金属污染的土壤中主要是 c-p2 类群(r-策略者)和 c-p3 类群线虫(k-策略者),其中 c-p2 类群的比例随着污染程度的增加而增加,而 c-p3 类群却与之相反,即不同类群线虫对重金属污染的反应特性不同。分析结果显示,在电子垃圾重金属污染情况下,土壤线虫的数量及种群结构产生了一定响应,可作为评价电子垃圾重金属污染的生物指标。

关键词:重金属;线虫;电子垃圾;生物多样性;稻田

中图分类号:X503.22 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)05-0874-08 doi:10.11654/jaes.2015.05.009

Effects of Heavy Metal Contamination on Nematode Communities in Paddy Soils of an E-waste Recycling Area

WANG Ying-li^{1,2}, WANG Hong-hong², LIAO Jin-ling², XIE Qi-lai^{2*}

(1.School of Chemistry and Environment, Jiaying University, Meizhou 514015, China; 2.College of Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: In order to investigate the influence of heavy metal contamination on nematode community structure in paddy-field polluted by electronic waste (e-waste), soil samples were collected from eight typical rice fields in e-waste recycling area of Guiyu Guangdong Province. The contents of heavy metals (Cd, Cu, Pb, Zn) were determined by ICP-MS, and nematodes were separated by elutriation-sifting-sugar solution centrifugation method and then identified. The results showed that 75% paddy-field samples were contaminated by Cd, Cu, Pb, Zn, and significant positive correlations ($P<0.05$) were observed among Cu, Pb, Zn. Nematodes belonged to six orders, 19 families and 26 genera. The plant parasitic nematodes were dominant, and *Hirschmanniella*, *Helicotylenchus* were common dominant genera. With increasing Cu in soil, ratio of plant parasitic nematodes to total nematodes dropped significantly. There was negative correlation between Pb concentrations and the plant-parasites maturation index ($P<0.05$). Compared with the unpolluted fields, amount of nematodes in paddy fields with low-grade pollution increased slightly, whereas that in the other fields dropped significantly with the increase of pollution grades. The nematode types of c-p2 (r-strategists) and c-p3 (k-strategists) were dominant in soils contaminated by heavy metals from e-wastes. With the increase of pollution levels, the proportion of c-p2 increased, but c-p3 groups showed an opposite trend. These results indicate that the number of nematodes and its function structure respond to heavy metal contaminations, and could be served as an important indicator to evaluate the heavy metal contaminations in e-waste recycling areas.

Keywords: heavy metals; nematode; e-waste; diversity index; paddy field

收稿日期:2015-01-14

基金项目:广东省自然科学基金项目(S2013010013809);梅州市科技计划项目(2011KJ207)

作者简介:王赢利(1974—),女,河南平舆人,高级实验师,研究方向为环境污染修复与治理。E-mail:liwy@jyu.edu.cn

*通信作者:解启来 E-mail:xieql@scau.edu.cn

广东汕头贵屿镇电子垃圾拆解及堆放简单粗放,对当地的河流、土壤、空气造成了严重污染^[1-2]。重金属含量超标不但威胁到土壤生物生存,而且可通过生态系统的食物链累积放大对人类健康产生危害。线虫是生活在土壤中的后生动物,它们能敏锐反映土壤中重金属污染、农药及杀虫剂施用等外来污染物的输入及人为干扰^[3-4],成为生态毒理学的模式生物被美国、荷兰列入土壤健康状况的监测及评价生物指标^[5]。贵屿镇是电子垃圾拆解集中地,长期受到重金属污染,已有文献报道重金属胁迫下土壤微生物与动物生态状况^[6-7],但以土壤线虫为指示生物来表征土壤健康状况的文献尚属少见。本文以土壤线虫为指示生物,通过研究电子垃圾拆解地重金属对稻田土壤线虫群落的影响,揭示电子垃圾拆解所带来的土壤环境问题,探讨线虫作为该类型污染的生物指示物的可行性,为该地区土壤的污染诊断和评价提供理论依据。

1 材料与方法

取样时间为 2011 年水稻分蘖期,土样采自贵屿镇华美村、北林村、龙港等从事电子垃圾拆解区域附近的水稻田,采样地点见图 1。每个样地采用对角线采样法取 5 个点,采样网格 3.0 m×3.0 m,距离水稻根部 15 cm 处取土 20 cm×20 cm,采样深度为 0~15 cm,土样充分混合后用四分法留取 500 g,装于塑料袋中,重复 3 次,贴好标签放置于 4℃冰箱中保存。

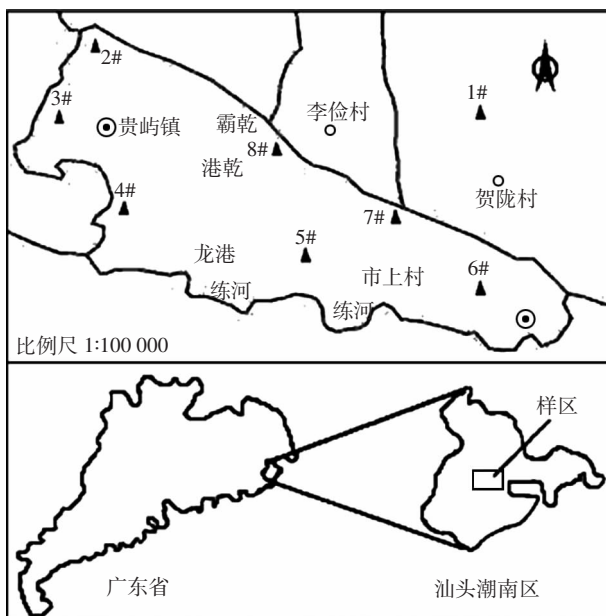


图 1 广东汕头采样分布图

Figure 1 Distribution of sampling sites in Shantou of Guangdong Province

1.1 土壤理化指标的测定

土壤含水量采用烘干法测定;土壤 pH 值采用玻璃电极法(上海雷磁公司,pHS-3C 酸度计)测定;有机质含量、全 N 含量的测定方法参考鲍士旦的《土壤农化分析》^[8];土壤重金属含量按照土壤元素的近代分析方法^[9]进行消解,并用电感耦合等离子体发射光谱(ICP-AES,美国 LEEMAN 公司)进行测定。测试过程中采用标准土样的平行测定确定方法的准确性,所有样品采用 3 个平行样来控制测定精密度^[10]。

1.2 线虫的分离和鉴定

每个土样混匀称取 100 g,采用淘洗-过筛-蔗糖离心漂浮法分离线虫。60℃热水浴杀死线虫后,用 10%甲醛(FA)固定液固定,倒入标本瓶中。在体式显微镜(Motic, SMZ140)下计数,并折算成 100 g 干土中线虫的数量;在生物显微镜(Nikon80i、OLYMPUS CX21F51)下参照《中国土壤动物检索图鉴》鉴定线虫的类别到属^[11],并根据线虫的取食习性和食道特征划分为 4 个营养类群:食细菌线虫(Bacterivores, BF)、食真菌线虫(Fungivores, FF)、植物寄生线虫(Plant-parasites, PP)和捕食-杂食线虫(Omnivore-predators, OP)^[12]。

1.3 土壤污染指数及线虫生态学指数的计算方法

采用内梅罗综合污染指数表示土壤污染程度^[13]:

$$P_i = C_i / m_i$$

$$P_{\text{内}} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\frac{1}{n} \sum P_i \right)^2 + \frac{1}{2} P_{\text{max}}^2}$$

式中: $P_{\text{内}}$ 为内梅罗综合污染指数; P_i 为污染物 i 的单项污染指数; C_i 为污染物实测浓度; m_i 为污染物评价参考值; P_{max} 为某污染物 P_i 的最大值; C_i 为污染物实测浓度; n 为污染因子个数。

污染级别: $P_{\text{内}} \leq 1.0$,未污染; $1.0 < P_{\text{内}} \leq 2.0$,轻度污染; $2.0 < P_{\text{内}} \leq 3.0$,中度污染; $3.0 < P_{\text{内}} \leq 5.0$ 重度污染。

本文取《全国土壤污染状况技术评定》环发[2008]39 号文件中土壤质量评价标准值(m_i),见表 1。

线虫指数采用多样性指数及群落结构指数:

(1)香农威那多样性指数(Shannon-Wiener)^[14]:

$$H' = -\sum_{i=1}^S f_i (\ln f_i)$$

式中: S 为线虫种属个数; f_i 为第 i 种不同营养类群线

表 1 土壤质量评价标准值(pH<6.5)

Table 1 Soil quality evaluation standard

重金属元素 Metal element	Cu	Pb	Zn	Cr	Cd	Ni
土壤污染评价值 $m_i/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	50	80	200	200	0.3	40

虫占样地线虫总数的比例。

(2)Margalef 丰富度指数^[15]:

$$SR=(S-1)/\ln Nu$$

式中: Nu 为线虫数量。

(3)辛普森多样性指数(Simpson's diversity index)^[16]:

$$D=1-\sum f_i^2$$

(4)线虫成熟度指数(Maturity index)^[17]:

$$MI=\sum V_i \cdot f_i$$

式中: V_i 为第 i 种线虫的 $c-p$ 值($c-p$ 值是 Bongers 根据线虫不同的生活史策略以及对周围环境干扰的敏感程度划分的五个营养类群^[17-18]: $c-p1$ 代表世代繁殖时间短,在食物充足时能迅速增长,是典型机会主义者; $c-p2$ 代表世代繁殖时间短,产卵多,较耐环境压力; $c-p3$ 代表线虫生活史周期较长,对环境干扰较敏感; $c-p4$ 代表世代繁殖时间长,对环境污染敏感; $c-p5$ 代表生命周期很长,产卵数量少,对污染物和其他扰动敏感)。

根据不同营养类群分为自由生活线虫成熟指数(MI)、植物寄生线虫成熟指数(PPI)和总成熟指数(MMI)。

(5)通道指数:

$$NCR=BF/(BF+FF)^{[19]}$$

式中: BF 为食细菌线虫丰度; FF 为食真菌线虫丰度。

(6)瓦斯乐斯卡指数(Wasilewska index)^[20]:

$$WI=(BF+FF)/PP$$

式中: PP 为植物寄生线虫丰度。

试验数据采用 Microsoft Excel 2003 和 SASS8.0 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属污染状况

研究样地的土壤基础化学性质和重金属含量见

表 2。8 块样地均呈酸性, 有机质含量 $6.80\sim24.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全氮含量 $0.83\%\sim1.33\%$ 。监测的 6 种重金属与国家环境保护部发布的环发 [2008]39 号文件土壤污染评价价值相比, Cr 、 Ni 单因子污染指数均小于 1, 在土壤安全监测范围内, 而 Cd 、 Cu 、 Pb 、 Zn 均呈现不同程度的超标, 超标样地百分率分别为 12.5% 、 62.5% 、 50% 和 37.5% 。8# 样地 Cu 的含量高达 $382\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (污染评价价值的 7.65 倍), Zn 的含量为 $276\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (污染评价价值的 1.38 倍), Pb 含量达到 $205\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (污染评价价值的 2.57 倍), 是所有样地中的最高值; Cd 含量最高的是 2# 样地, 为 $2.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (污染评价价值的 1.37 倍)。六种金属的相关性分析表明, Cu 、 Pb 和 Zn 显著相关 ($P<0.05$), 表明它们可能来自同一污染源。因研究样地主要是 Cu 、 Pb 、 Cd 、 Zn 污染, 故以下重点讨论这四种重金属对土壤线虫的影响。四种重金属的内梅罗综合污染指数($P_{\text{内}}$)见表 2, 按 $P_{\text{内}}$ 等级划分, 8 块研究地中 25% 为清洁, 37.5% 为轻微污染, 中度、重度及严重污染均为 12.5% 。

2.2 重金属对土壤中线虫数量及群落组成的影响

从 8 个样地中分离并鉴别出 854 条线虫, 分属于 6 目 19 科 26 属, 各样点线虫群落的数量、营养类群分布都表现出较大差异。从线虫的数量来看, 清洁样地线虫数量均值为 $168\text{ 条}\cdot100\text{ g}^{-1}$ 干土, 而轻度污染的线虫总数略有增加, 达到 $202\text{ 条}\cdot100\text{ g}^{-1}$ 干土, 是对照清洁样地线虫的 120% , 中度污染样本中线虫数量则较清洁样本下降了 39.0% ($P<0.05$), 重度及严重污染样本分别极显著下降了 64.4% 和 79.0% ($P<0.01$)。不同重金属污染程度的样地线虫数量排列顺序为轻微污染样地>清洁样地>中度污染样地>重度污染样地>严重污染样地。按不同污染等级将各样地的线虫

表 2 不同样点土壤基础化学性质及重金属污染指数
Table 2 The soil property and concentration of heavy metals in different sites

样地编号 (Sites)	1#	2#	3#	4#	5#	6#	7#	8#
pH	5.78±0.01	5.16±0.01	5.93±0.02	5.78±0.02	5.61±0.02	5.18±0.02	4.54±0.02	6.38±0.03
有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	24.8±0.12	14.2±0.02	23.4±0.09	15.4±0.03	22.3±0.02	15.9±0.02	6.8±0.02	12.2±0.05
总氮 Total nitrogen/%	1.05±0.08	0.94±0.06	1.33±0.10	1.02±0.08	0.96±0.04	0.89±0.06	0.83±0.03	1.01±0.08
P_{Cr}	0.13±0.02	0.35±0.08	0.29±0.06	0.33±0.05	0.27±0.06	0.26±0.07	0.45±0.07	0.29±0.01
P_{Ni}	0.17±0.02	0.09±0.00	0.35±0.03	0.56±0.07	0.91±0.02	0.56±0.08	1.44±0.09	0.52±0.08
P_{Cd}	0.03±0.00	0.86±0.05	0.10±0.00	1.37±0.18	0.50±0.00	0.27±0.00	0.20±0.00	0.20±0.00
P_{Cu}	1.10±0.04	0.40±0.03	0.90±0.07	0.89±0.01	2.52±0.07	2.77±0.12	4.88±0.17	7.65±0.25
P_{Pb}	0.82±0.02	0.68±0.05	1.25±0.04	1.06±0.00	1.29±0.02	0.93±0.02	0.95±0.06	2.57±0.18
P_{Zn}	0.53±0.03	0.44±0.08	1.08±0.04	0.58±0.08	0.83±0.06	0.57±0.03	1.13±0.05	1.38±0.03
$P_{\text{内}}$	0.89	0.74	1.06	1.19	1.93	2.12	3.68	5.80
污染等级	清洁	清洁	轻微	轻微	轻微	中度	重度	严重

注: $P_{\text{内}}$ 为 Cu 、 Cd 、 Pb 、 Zn 内梅罗综合污染指数。
Note: $P_{\text{内}}$: Nemerow pollution index of Cu , Cd , Pb , and Zn .

丰度值归类后取平均值,结果见表 3。

由表 3 可知,在各样本中,植物寄生线虫(*PPI*)占优势,8 个样地共检出 13 属 584 条线虫,占检出线虫总量的 68.4%。轻微污染样本中 *PPI* 丰度最高,为 78.3%,其次是中度样地(73.9%)、重度样地(64.2%)、严重污染样地(27.6%)。多数样地检出潜根属(*Hirschmanniella*),丰度最高的是中度污染样地(47.8%),最低的是重度污染样地(1.9%),严重污染样地未检出。除了中度和严重污染样地外,其余样地均检出螺旋属(*Helicotylenchus*),其中重度污染样地比例最高达到 56.6%;捕食-杂食线虫为亚优势类群,其中未受污染的样地最高,占到线虫总数的 39.5%,重度污染样本最低,仅为 1.9%,在捕食-杂食线虫中,75% 的样本均检测到矛线属(*Dorylaimus*);食细菌线虫较少,头叶属(*Cephalobus*)、小杆属(*Rhabditis*)、中杆属(*Mesorhabditis*) 仅在单个样地中出现。不同污染等级样本的 4 种营养类群线虫丰度见图 2。

由图 2 可知,清洁样地的植物寄生线虫和捕食-杂食线虫比例差异不显著,但显著高于食细菌和真菌线虫($P<0.05$)。与清洁样地相比,轻微污染样地中,植

表 3 不同污染等级样地的土壤线虫丰度
Table 3 Soil nematodes abundance in the plots of different pollution levels

样点 Site	c-p	CK	L	M	H	HS
线虫总数/条·100 g ⁻¹ 干土		168±10AB	203±14A	103±8BC	59.7±5C	35.2±4C
食细菌线虫 Bacterivores/%						
真头叶属 <i>Eucephalobus</i>	2	0.0	2.1	0.0	0.0	6.9
头叶属 <i>Cephalobus</i>	2	1.2	0.0	15.9	0.0	0.0
小杆属 <i>Rhabditis</i>	1	0.0	0.4	2.9	0.0	0.0
中杆属 <i>Mesorhabditis</i>	1	0.0	0.0	0.0	20.8	0.0
连胃属 <i>Chronogaster</i>	2	1.5	0.0	0.0	1.9	6.9
杆咽属 <i>Rhabdolaimus</i>	3	0.0	0.0	0.0	0.0	17.3
食真菌线虫 Fungivores/%						
真滑刃属 <i>Aphelenchus</i>	2	0.5	2.1	4.4	0.0	6.9
滑刃属 <i>Aphelenchoides</i>	2	0.0	2.1	0.0	11.3	10.4
植物寄生线虫 Plant-parasites/%						
丝尾垫刃属 <i>Filenchus</i>	2		0.4	0.0	0.0	13.8
巴兹属 <i>Basiria</i>	2	0.0	2.1	0.0	5.7	0.0
茎属 <i>Ditylenchus</i>	2	0.0	0.0	26.1	0.0	0.0
盘旋属 <i>Rotylenchulus</i>	3	0.0	0.0	0.0	0.0	13.8
肾状属 <i>Rotylenchulus</i>	3	9.3	10.4	0.0	0.0	0.0
螺旋属 <i>Helicotylenchus</i>	3	3.2	21.6	0.0	56.6	0.0
短体属 <i>Pratylenchus</i>	3	0	0.7	0.0	0.0	0.0
潜根属 <i>Hirschmanniella</i>	3	11.5	25.8	47.8	1.9	0.0
矮化属 <i>Tylenchorhynchus</i>	2	4.3	14.5	0.0	0.0	0.0
小环属 <i>Criconemoides</i>	3	2.2	2.8	0.0	0.0	0.0
拟鞘属 <i>Hemicrionemoides</i>	3	24.8	0.0	0.0	0.0	0.0
剑属 <i>Xiphinema</i>	5	3.4	0.0	0.0	0.0	0.0
丝尾属 <i>Oxydirus</i>	5	0	4.2	0.0	0.0	0.0
捕食-杂食类线虫 Predators-omnivores/%						
矛线属 <i>Dorylaimus</i>	4	6.8	9.5	2.9	0.0	24.2
真矛线属 <i>Eudorylaimus</i>	5	7.6	0.0	0.0	1.9	0.0
中矛属 <i>Mesodorylaimus</i>	5	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
孔咽属 <i>Aporcelaimus</i>	5	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0
托布利属 <i>Tobrilus</i>	4	22.6	1.1	0.0	0.0	0.0

注:CK 为未污染样地;L 为轻度污染;M 为中度污染;H 为重度污染;HS 为严重污染。不同字母表示差异极显著($P<0.01$)。
Note: CK:Uncontaminated plot;L:Light pollution plot;M:Moderate pollution plot;H:Heavy pollution plot;HS:Serious pollution plot. Means with the same letter are not significantly different($P<0.01$).

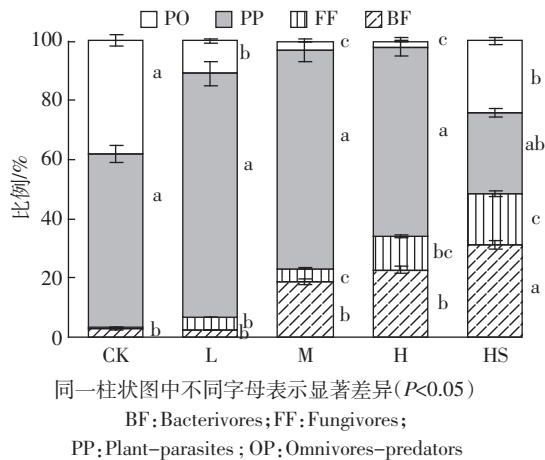


图 2 不同污染程度样地中土壤线虫营养类群分布
Figure 2 Nematodes trophic groups in the plots of different pollution levels

物寄生类线虫和食真菌线虫比例增加,捕食-杂食线虫比例下降,植物寄生类线虫显著高于捕食-杂食线虫和食真菌线虫($P<0.05$);而中度和重度污染样本中,植物寄生类线虫比例虽有所下降,但仍显著高于其他类线虫($P<0.05$),捕食-杂食线虫比例按污染等级下降明显,且显著低于其他类线虫($P<0.05$),样本中食真菌和食细菌线虫比例逐渐上升,表现出污染越重的土壤,食细菌线虫及食真菌线虫占线虫总数的比例越高,而植物寄生类线虫丰度则下降的趋势。结果表明,在受到电子垃圾重金属污染的情况下,不同营养类群的线虫反应各异,导致线虫的群落结构发生了变化。

将线虫按照生活史策略划分,各污染等级的 c-p 类群分布见图 3。图 3 显示:受电子垃圾重金属污染的土壤中主要是 c-p2 和 c-p3 类群线虫,二者之和在各样地均在 75% 以上,而 c-p1、c-p4、c-p5 类群所占比例较小。在 c-p2 类群中,受到污染的样地比例均极显著高于对照组($P<0.01$),其中中度及严重污染的样地比例分别为 46.4%、44.9%,是对照组的 8.2 倍和

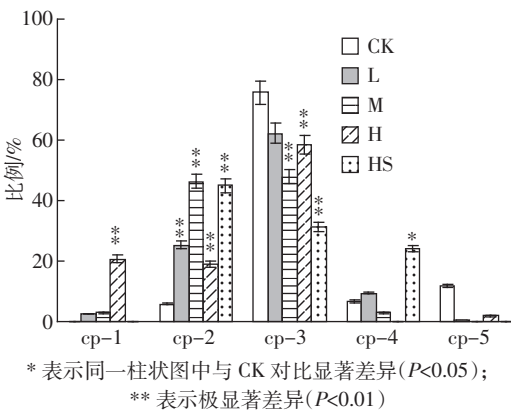


图 3 重金属污染对 c-p 类群线虫的影响
Figure 3 Relative abundances of nematode c-p group in different pollution levels

7.9 倍;在 c-p3 类群中,未受污染的样地中 c-p3 类群最大,为 75.7%,极显著高于中度、重度和严重污染样地($P<0.01$),随着污染等级的增加,对污染敏感的 c-p3 类群呈现波动性下降;在 c-p4 类群中,除严重污染样地较高外,其余受污染样地比例均小于 10%;在 c-p5 类群中,未受污染样地丰度最高,为 11.9%,其余样本均小于 1.9%,中度及重度污染样本丰度值甚至低至 0。

2.3 重金属对土壤线虫生态指数的影响

土壤线虫的各项生态指数见表 4。土壤样本中重金属对线虫生态指数的相关性见表 5。

从表 4 可知,各样地的植物寄生线虫成熟指数在 0.7~2.2 之间,严重污染样地显著低于其他样地($P<0.05$);总成熟指数在 2.4~3.2 之间,清洁样地显著高于其他样地($P<0.05$),轻微污染、中度、重度和严重污染样地成熟指数差异不大($P>0.05$)。各样地植物寄生线虫成熟指数(PPI)较高,对线虫总成熟指数贡献(MMI)较大,按成熟指数大小排序为未受污染样地的线虫>轻微污染样地=严重污染样地>中度污染样地>重度污染样地。随着污染程度的加深,瓦斯乐斯卡指

表 4 土壤样本的线虫生态指数

样点 Site	植物寄生线虫 成熟指数(PPI)	线虫成熟指数 (MMI)	香农威那指数 (H')	辛普森多样性指数 (D)	瓦斯乐斯卡指数 (WI)	线虫种属数 (S)	通道指数 (NCR)
CK	1.7a	3.2a	1.51b	0.69b	0.02d	13b	1.0a
L	2.2a	2.8ab	1.53b	0.72b	0.15dc	17a	0.4b
M	2.0a	2.5b	1.34b	0.67bc	0.31c	8c	0.8ab
H	1.9a	2.4b	1.44b	0.62c	0.53b	8c	0.7ab
HS	0.7b	2.8ab	1.98a	0.85a	1.75a	9c	0.6ab

注:不同英文字母表示差异显著($P<0.05$)。
Note: Means with the different letters are significantly difference($P<0.05$).

数(*WI*)呈上升趋势,但除严重污染样本外,其余样地的 *WI* 远低于土壤健康一般指数 1.0, 反映研究样地土壤健康较差。除了轻微污染样地外,线虫通道指数(*NCR*)随着污染程度的增加而下降,表明以真菌主导的能流通道随着污染的增加有所增强。从多样性指数来看,香农威那指数(*H'*)和辛普森多样性指数(*D*)均是严重污染样地值最高,其次是轻微污染样地和清洁样地,但严重污染样地种属(9 种)却显著低于轻微污染样地的线虫种属(17 种)和未受污染样地(13 种)。这可能是由于严重污染样地线虫丰度分布较均匀导致的多样性指数数值偏大。不同污染样地的种属数量变化显示轻度污染会刺激线虫多样性的增加,但污染加重时可能通过抑制一些敏感线虫的生存而导致土壤线虫多样性下降。

重金属单因子污染指数、综合污染指数、土壤总氮、有机质含量以及线虫的各项生物指标的相关性显示(表 5):Cu 含量、内梅罗综合污染指数与土壤中线虫数量显著负相关($P<0.05$);内梅罗综合污染指数与植物寄生线虫成熟指数显著正相关($P<0.05$),与瓦斯乐斯卡指数(*WI*)正相关($P<0.05$);Pb 含量与植物寄生线虫成熟指数、辛普森多样性指数显著负相关($P<0.05$),与瓦斯乐斯卡指数(*WI*)显著正相关($P<0.05$);Cd 含量与线虫种属数量极显著正相关($P<0.01$),与丰富度指数 *SR* 负相关($P>0.05$),但不显著;内梅罗综合污染指数与 *WI* 显著正相关($P<0.05$);Pb、Zn 含量与丰富度指数 *SR* 显著正相关($P<0.05$)。这表明在该研究样地中,以 Cu、Pb、Cd、Zn 为典型重金属代表的电子垃圾污染会影响土壤线虫群落结构:在一定范围内,污染物的增加会刺激食细菌线虫、食真菌线虫数量及种属的增加,植物寄生线虫数量及种属的减少。线虫的生态指数也随之发生变化:植物寄生线虫成熟指数、总成熟指数和通道指数(*NCR*)下降,瓦斯乐斯

卡指数(*WI*)上升。几种重金属中,Pb 对植物寄生线虫有显著抑制作用($P<0.05$),而 Cd 与 Zn 对线虫的作用不显著($P>0.05$)。土壤总氮和有机质与土壤线虫各生物指数的相关性显示,土壤有机质与线虫种属数量呈显著正相关($P<0.05$),与线虫数量正相关但不显著($P>0.05$)。土壤总氮和线虫数量及种群结构生态指数的相关性均不显著($P>0.05$)。

3 讨论

电子垃圾拆解地附近采集的水稻田土壤不同程度地受到 Cd、Cu、Pb、Zn 的污染,依据四种金属的内梅罗综合指数,污染等级分别为清洁、轻微、中度、重度和严重污染。严重污染样地 Cu、Pb、Zn 分别是环发[2008]39 号标准值的 7.65、2.57、1.38 倍,且三种金属显著相关($P<0.05$),结合当地灌溉情况,可能是来自同一污染源即电子垃圾污染的河水灌溉所致。Okada 等^[21]的研究表明,潜根属(*Hirschmanniella*)是水稻田土壤中的特征属。本研究中共检出土壤线虫 6 目 18 科 26 属,除严重污染样地外,其余样地均检出潜根属线虫,在轻微和中度污染样地中的数量较高,重度污染样地极少,表明潜根属对不同程度的重金属污染存在一定的响应。很多研究表明^[22],土壤有机质和氮含量的增加,会使土壤线虫的数量及多样性增加,尤其是自由生活线虫,但本研究却未体现这点,可能因土壤受到重金属污染所致。

从土壤线虫的数量和群落分布来看,轻微污染样地线虫数量最多,其余样地随着重金属污染等级的增加,土壤线虫数量逐渐减少,内梅罗综合污染指数与线虫数量的显著负相关($P<0.05$),表明低污染可能会促进线虫数量增加,而随着污染的加重,土壤线虫因受到危害数量又出现下降趋势。除严重污染样地外,植物寄生线虫数量下降趋势更加显著,其丰度值与污

表 5 重金属污染指数与线虫生态指数的相关性($n=8$)

Table 5 The relationships between metals pollution and ecologic index of soil nematode communities($n=8$)

项目	<i>PPI</i>	<i>MMI</i>	<i>H'</i>	<i>WI</i>	<i>SR</i>	<i>S</i>	<i>NCR</i>	<i>Nu</i>	<i>D</i>
Cd	0.564	0.506	-0.202	-0.605	-0.127	0.974**	-0.321	0.955	0.047
Cu	-0.803	-0.408	0.698	0.949*	0.746	-0.590	-0.276	-0.913*	-0.537
Pb	-0.875*	0.027	0.945*	0.948*	0.899*	-0.138	-0.452	-0.552	-0.918*
Zn	-0.661	-0.350	0.724	0.853	0.900*	-0.260	-0.548	-0.703	0.519
<i>P_{pl}</i>	-0.815*	-0.381	0.727	0.957*	0.777	-0.551	-0.306	-0.891*	0.565
TN	0.424	0.376	-0.114	-0.209	-0.184	0.851	-0.447	0.618	0.597
OM	0.307	0.666	0.030	-0.435	0.051	0.971*	-0.298	0.863	0.113

注:TN 总氮;OM 土壤有机质;** $P<0.01$; $*P<0.05$ 。

Note: TN: Total nitrogen; OM: organic matter.

染等级存在显著负相关,表明植物寄生类线虫对电子垃圾污染反映较敏感。一般认为^[23],植物寄生线虫以取食植物根部养分为生,其繁殖与植物根系生长状况相关,但因生活在土壤间隙中,也会对土壤污染产生感应而致使生长和繁殖发生改变。研究表明,线虫可以指示土壤受干扰程度^[24],当低剂量的污染物进入土壤时,会刺激细菌、真菌的数量增长,从而使得食细菌和食真菌线虫数量及丰度增加;而高剂量的污染物生物毒性增加,线虫因受到毒害以及细菌和真菌等食物来源的减少,数量又会显著下降^[25]。因此,观察土壤线虫类群的变化可了解土壤生态系统是否受到干扰以及受干扰的程度。研究样地中土壤 pH 值呈酸性且受到重金属污染而不利于食细菌的线虫生长^[26],各样本中均以植物寄生线虫以及杂食和捕食性线虫为主,这不利于腐食食物链对有机质的分解。尽管随着污染程度的加深,食细菌线虫和食真菌线虫丰度和种属有所增加,表征土壤健康生物指数 *WI* 显著增加($P<0.05$),但因重度及严重污染样地线虫数量较少,反映土壤受污染程度可信度不高,后期还需作进一步的深入研究。

研究样地中植物寄生线虫是主要类群,随着污染指数的增加,植物寄生线虫丰度和数量显著下降($P<0.05$)。这表明植物寄生线虫对重金属的污染较敏感,与 Navas 等^[27]的研究结果一致。几种重金属中,Pb 与 *PPI* 显著负相关($P<0.05$),Cu 和 Zn 尽管对植物线虫也有抑制作用,但不显著($P>0.05$)。Zullini 等^[28]的研究也表明,长期受 Pb 污染的土壤线虫的总数目、种的数量会随着 Pb 含量的增加而减少,表明 Pb 对土壤线虫有一定毒害作用。

从生物指数来看,Bongers 等^[17,29]的研究表明线虫种群结构的成熟指数可在一定程度上反映土壤受扰动和外界胁迫的压力程度,土壤环境受外界干扰程度越大,成熟指数越低。本研究中,内梅罗综合污染指数与植物寄生线虫成熟指数显著负相关($P<0.05$),与总成熟指数负相关($P>0.05$)。这与 Bongers 等的研究相似,Freckman 等^[30]的研究也表明了这点。不同浓度的 Cu 对土壤线虫的刺激反映结果不同,王存龙等^[31]的研究表明,随着 Cu 含量的增加,土壤线虫数量及多样性会下降,Navas 等^[32]的研究则表明低浓度的 Cu 会刺激食细菌和食真菌线虫数量的增加。在本研究中,随着 Cu 含量的增加,线虫数量显著降低($P<0.05$),多样性指数 *D* 下降,*H'* 增加,植物寄生线虫成熟指数下降,但都不显著($P>0.05$),可能是因土壤中除了 Cu 还

有其他污染物的干扰所致。

从线虫 c-p 类群来看,本研究样地中线虫生活史策略主要是 c-p2、c-p3 类群。c-p2 类群属 r-策略者的特征是生命周期短,繁殖能力强,比较耐受环境干扰,是土壤线虫典型的机会主义者,一旦条件有利,其数量可迅速增加。在本研究中也发现,c-p2 类群在污染样地显著高于未受污染样地($P<0.05$),在污染比较严重的样地,检出抗干扰能力强的 c-p2 线虫^[33]如食细菌线虫中杆属、食真菌线虫真滑刃属,且丰值均高于未受污染样地。c-p3 为 k-策略者,其特征是生命周期长,繁殖能力低,对外界干扰较敏感。本研究中,随着污染程度的加剧,一些 c-p3 类群植物寄生线虫减少甚至消失,丰度值呈波动性下降,显示出 c-p3 类群对环境敏感的特性。

4 结论

贵屿电子垃圾拆解区 75% 的稻田样地受到 Cd、Cu、Pb、Zn 轻微及以上污染。在受重金属污染的稻田中,土壤线虫的数量、c-p3 类群丰度随着污染的加重而呈现波动下降,线虫成熟指数、多样性指数与内梅罗综合污染指数以及 Cu、Pb 存在一定的相关性,占主要比例的植物寄生线虫对 Pb 较敏感,而 Cu 抑制土壤线虫的数量和多样性指数。重金属胁迫下,线虫群落的各项生物指标均产生了一定的响应,其可作为电子垃圾重金属污染区稻田土壤生态评价的一个重要指示生物。

参考文献:

- [1] Luo C, Liu C, Wang Y, et al. Heavy metal contamination in soils and vegetables near an e-waste processing site, south China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(1): 481-490.
- [2] Li J, Duan H, Shi P. Heavy metal contamination of surface soil in electronic waste dismantling area: Site investigation and source-apportionment analysis[J]. *Waste Management & Research*, 2011; 29(7): 727-738.
- [3] 孙贤斌, 李玉成. 淮南煤矿废弃地重金属污染对土壤动物群落的影响[J]. 生态学杂志, 2014(2): 408-414.
SUN Xian-bin, LI Yu-cheng. Impact of heavy metal pollution on soil animal communities in abandoned coal mine area in Huainan City, Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014(2): 408-414.
- [4] Šalamún P, Renčo M, Kucanová E, et al. Nematodes as bioindicators of soil degradation due to heavy metals[J]. *Ecotoxicology*, 2012, 21(8): 2319-2330.
- [5] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: functional and biodiversity aspects[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4): 199-210.
- [6] Shen C, Huang S, Wang Z, et al. Identification of Ah receptor agonists in

- soil of e-waste recycling sites from Taizhou area in China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 42(1):49–55.
- [7] Jun H Z, Hang M. Eco-toxicity and metal contamination of paddy soil in an e-wastes recycling area[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 165(1):744–750.
- [8] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2000.
- BAO Shi-dan. Analysis of soil agriculture chemistry[M]. Beijing:China Agriculture Press, 2000.
- [9] 中国环境监测总站. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京:中国环境科学出版社, 1992.
- China Environmental Monitoring Center. Analysis methods of heavy metals in soils[M]. Beijing:China Environmental Science Press, 1992.
- [10] 陈涛, 常庆瑞, 刘京, 等. 长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11):2152–2159.
- CHEN Tao, CHANG Qing-rui, LIU Jing, et al. Pollution and potential environment risk assessment of soil heavy metals in sewage irrigation area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11):2152–2159.
- [11] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京:科学出版社, 1998.
- YIN Wen-ying. Pictorial keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1–756.
- [12] Renco M. The communities of nematodes in agroecosystems of sugar beet, cereals and lucerne in Eastern Slovakia[J]. *Helminthologia*, 2003, 40(1):55–58.
- [13] 李祚泳, 丁晶, 彭荔红. 环境质量评价原理与方法[M]. 北京:化学工业出版社, 2004.
- LI Zuo-yong, DING Ding, PENG Li-hong. Environment quality evaluation principles and methods[M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2004.
- [14] Krebs C J. Ecological methodology[M]. California:Benjamin/Cummings Menlo Park, 1999.
- [15] Yeates G W, King K L. Soil nematodes as indicators of the effect of management on grass-lands in the New England tablelands(NSW): Comparison of native and improved grasslands[J]. *Pedobiologia*, 1997, 41(6):526–536.
- [16] Pielou E C. Ecological diversity[J]. *J Wiley & Sons NY*, 1975.
- [17] Bongers T. The maturity index: An ecological measure of environmental disturbance based on nematode species composition[J]. *Oecologia*, 1990, 83(1):14–19.
- [18] 李琪, 梁文举, 姜勇. 农田土壤线虫多样性研究现状及展望[J]. 生物多样性, 2007, 15(2):134–141.
- LI Qi, LIANG Wen-ju, JIANG Yong. Present situation and prospect of soil nematode diversity in farmland ecosystems[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2):134–141.
- [19] Yeates G W. Nematodes as soil indicators: Functional and biodiversity aspects[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(4):199–210.
- [20] Wasilewska L. The effect of age of meadows on succession and diversity in soil nematode communities[J]. *Pedobiologia*, 1994, 38(1):1–11.
- [21] Okada H, Niwa S, Takemoto S, et al. How different or similar are nematode communities between a paddy and an upland rice fields across a flooding–drainage cycle?[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(10):2142–2151.
- [22] 刘婷, 叶成龙, 陈小云, 等. 不同有机肥源及其与化肥配施对稻田土壤线虫群落结构的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(12):3508–3516.
- LIU Ting, YE Cheng-long, CHEN Xiao-yun, et al. Effects of different organic manure sources and their combinations with chemical fertilization on soil nematode community structure in a paddy field of East China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12):3508–3516.
- [23] 华建峰, 林先贵, 尹睿, 等. 矿区砷污染对土壤线虫群落结构特征的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2009(1):79–84.
- HUA Jian-feng, LIN Xian-gui, YIN Rui, et al. Effects of arsenic contamination on structure of soil nematode community in mining area[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2009(1):79–84.
- [24] Freckman D W, Ettema C H. Assessing nematode communities in a–groecosystems of varying human intervention[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1993, 45(3):239–261.
- [25] 韩桂琪, 王彬, 徐卫红, 等. 重金属 Cd, Zn, Cu 和 Pb 复合污染对土壤生物活性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(9):1236–1242.
- HAN Gui-qi, WANG Bin, XU Wei-hong, et al. Effect of heavy metal combined pollution on biological activity of soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(9):1236–1242.
- [26] Bakonyi G, Nagy P, Kádár I. Long-term effects of heavy metals and microelements on nematode assemblage[J]. *Toxicology Letters*, 2003, 140:391–401.
- [27] Navas A, Flores–Romero P, Sánchez–Moreno S, et al. Effects of heavy metal soil pollution on nematode communities after the Aznalcóllar mining spill[J]. *Nematopica*, 2010, 40(1):13–30.
- [28] Zullini A, Peretti E. Lead pollution and moss-inhabiting nematodes of an industrial area[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 1986, 27(3–4):403–410.
- [29] Yeates G W, Bongers T, De Goede R, et al. Feeding habits in soil nematode families and genera: An outline for soil ecologists[J]. *Journal of nematology*, 1993, 25(3):315.
- [30] Freckman D W, Ettema C H. Assessing nematode communities in a–groecosystems of varying human intervention[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 1993, 45(3):239–261.
- [31] 王存龙, 董志成, 夏学齐, 等. 济南市土壤重金属污染现状及其土壤生物学表征[J]. 中国地质, 2012, 39(3):818–826.
- WANG Cun-long, DONG Zhi-cheng, XIA Xue-qi, et al. Soil contamination by heavy metals in Jinan City and its biological characteristics[J]. *Geology in China*, 2012, 39(3):818–826.
- [32] Navas A, Flores–Romero P, Sanchez–Moreno S, et al. Effects of heavy metal soil pollution on nematode communities after the aznalcollar mining spill[J]. *Nematopica*, 2010, 40(1):13–29.
- [33] Bongers T, Bongers M. Functional diversity of nematodes[J]. *Applied Soil Ecology*, 1998, 10(3):239–251.