

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

李 涛, 李灿阳, 俞丹娜, 张加勇, 郑荣泉*

(浙江师范大学生态研究所, 浙江金华 321004)

摘要: 为了解交通要道重金属对路边农田土壤动物群落结构及空间分布的影响, 分季节分层次对 104 国道浙江上虞段周围农田 5 条样带及 1 条对照样带进行取样调查, 共获得土壤动物 4046 个, 计 50 个类群, 隶属于 4 门 7 纲, 弹尾目、前气门亚目、甲螨亚目为优势类群, 其余为常见类群和稀有类群。同时测定了采样带土壤理化性质和重金属含量, 结合类群特征指数, 研究农田土壤动物群落结构特征以及土壤动物对土壤重金属污染的响应。结果表明, 6 条样带土壤理化指标全磷和 pH、重金属各因子差异显著 ($P < 0.05$), 公路周围重金属含量明显高于对照和土壤背景值, 随着采样距 104 国道的距离的减小, 土壤动物的类群数和个体数呈现减少的趋势, 在土层垂直分布上, 并呈现表聚性减弱的现象。灰色关联分析表明, 在调查样带中全磷对土壤动物的影响最大, 土壤 pH 次之, 其次是铅、铬的影响, 锌的影响最小。土壤理化指标全磷和 pH 对农田土壤动物的影响大于土壤重金属, 但重金属对污染样带土壤动物群落结构的影响已不能忽视。

关键词: 重金属; 土壤动物; 垂直分布; 浙江上虞

Effects of heavy metals from road traffic on the community structure and spatial distribution of cropland soil animals

LI Tao, LI Canaryang, YU Danna, ZHANG Jiayong, ZHENG Rongquan*

Institute of Ecology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

Abstract: Cropland soils located along the No. 104 national highways of Shangyu City, Zhejiang Province were significantly contaminated with heavy metals from road traffic. This paper was to estimate whether soil animals and heavy metal concentrations in coincide in polluted by emissions from automobile exhaust. So the concentration of heavy metals, and their effects on soil animal communities, were investigated in five contaminated sites and one uncontaminated control site. Soil samples were collected from a sampling area of 30 cm × 30 cm at three depths (0—5 cm, 5—10 cm, 10—15 cm) five times each site over four seasons. Soil animals were extracted using Tullgren and Baermann funnels. Soil pH was measured with TFW-VI acidity meter; organic carbon was determined by $K_2Cr_2O_7$ oxidation method and bulk density of soils by a simple method; total N was determined with Kjeldahl method and total K by flame photometer; total P was analyzed using the colorimetric method with molybdenum in sodium hydroxide. An X-ray fluorescent analysis was used to determine the concentrations of heavy metal in the study area (Pb, Cu, Zn, Cr, and Ni). Statistical analysis was performed with the SPSS 13.0 program package. The results indicated that Pb, Cu, Zn, Cr and Ni were higher than the control group, the datas showed that total P, pH, Pb, Cu, Zn, Cr and Ni were significantly different between the five sampling sites and the control group ($P < 0.05$). A total of 4 046 individual soil animals were collected belonging to 50 groups, 7 classes and 4 phyla. The dominant groups were Collembola and Acariformes, the frequent groups were Diptera larvae, Nematoda, Araneae, Hirudinea and Diplura; other groups were rare. The difference in individual of soil animal was significant between sampling sites and the control group by one way analysis of variance ($P < 0.05$). Correlation analysis of data was

基金项目: 浙江省自然科学基金资助项目(Y506255)

收稿日期: 2009-12-09; 修订日期: 2010-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhengrq@zjnu.cn.

performed, both the individuals and the number of soil animal groups decreased with increasing proximity to the No. 104 national highway. The diversity index, evenness index of soil animal communities decreased with pollution levels increased, while a positive association was found between dominance index and the pollution levels. The spatial distribution of soil animals in the sampling sites showed that the individual and group of soil animals in sampling sites were decreased with the increasing soil depth. Heavy metal impacted the composition of soil animal communities, the more intense the disturbance, the greater influence on soil animals. Jaccard and Motyka coefficients had a high or moderate similarity among soil animal communities in sampling sites, which reached the range of 0.680—0.837, 67.9—82.7, respectively. Grey Relevant Analysis revealed that the environment factors had different effect on the key soil animal communities, total P produced the most effect on soil animals, the second effect factor was the soil pH, Pb was the third, and Zn had less significant effects on the soil animals. The influence of the physiochemical properties of soil (total P and pH) were greater than of heavy metal factors, while heavy metals contained showed a strongly correlation with soil animal communities. The impact of heavy metals on soil animal communities can not be ignored.

Key Words: heavy metals; soil animal; spatial distribution; Shangyu City

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。随着工业化和城乡一体化的高速发展,污染日益加剧,重金属已成为农田土壤的重要污染物^[1]。公路两侧农田土壤重金属以 Pb、Zn、Cd、Cr、Cu 等污染为主,来自含铅汽油的燃烧和汽车轮胎、刹车里衬机械磨损产生的粉末,部分随飘散的在空气或通过干湿扬尘沉积在公路两侧土壤,成条带状分布^[2-3]。多数重金属元素在土壤中的积累,超过了环境背景值,重金属有毒物质的过量积累,即影响了土壤的结构和理化性质,又严重的影响了土壤生态系统的稳定^[4]。作为土壤生态系统中重要组成部分的土壤动物,它们在有机物的降解、对微生物活动的调节以及营养物质循环过程中起着重要作用,同时具有数量大、种类多、移动范围小和对重金属污染敏感等特点。土壤动物群落结构和空间的变化能够间接的反映出土壤的污染状态。国内外已有许多关于土壤动物作为环境污染的生物指示物的研究报道^[5-9]。近年来,交通重金属污染物对公路周围土壤污染的研究多集中于重金属的来源、含量的测定、分布情况、修复措施等^[1-3,10-12],重金属污染对土壤动物的影响已有相关的研究^[8-9,13-16],但交通要道重金属污染对土壤动物类群结构及空间分布的影响在国内的研究报道甚少。

浙江省经济发达,人口密度大,交通运输繁忙,由于历史的原因,交通运输长期以来主要靠公路,因此交通重金属污染物对公路周边农田土壤动物群落的污染可能性很大。本研究通过对 104 国道浙江省上虞段周边农田重金属污染情况的考察,结合农田污染区的土壤动物群落结构的调查,探讨农田土壤动物群落结构特征以及土壤动物对土壤重金属污染的响应,为发展土壤质量的生物监测方法以及阐明土壤动物对重金属污染的生态反应机理提供科学依据。

1 材料与研究方法

1.1 研究区域概况

上虞市位于浙江省东北部(经纬度跨东经 120°36'23"—121°6'9"、北纬 29°43'38"—30°16'17"),属亚热带海洋性气候,四季分明,雨水充沛,阳光充足,温度适中,年平均温度 16.40℃,年平均无霜期 251 d,日照全年 3000 h,相对湿度 75%,夏季盛行东南风及偏南风,冬季盛行偏北及西南风,年平均风速 3 m/s,年平均降雨量 1400 mm,大气平均气压 101 kPa。交通便捷,杭甬铁路,杭甬运河,杭甬高速公路、上三高速公路、104 和 329 国道纵横贯穿全境。

1.2 样点设置

取样点设在上虞市章镇镇下属的 104 国道旁的水稻田,土壤样品的采集是在调查试验区域自然概况和预实验(土壤样品分析)的基础上,选择以上虞市章镇镇境内 104 国道线为中心,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,将距国道线垂直距离 5、50、100、150、200 m 的农田依次划分为 5 条取样

带^[17],对应地分别用符号 a、b、c、d、e 表示。每个季节选择水稻田的非蓄水期进行采样,为了减少农田土壤空间分布不均一性的影响,在每一个取样带内,再设置 5 个取样点,每个取样点水平距离为 200 m。同时在距国道线垂直距离约 4 km 的地方定点取样作为对照样带,此条带土壤接近土壤背景值^[18],用符号 CG 表示。

1.3 采样及土壤动物分离鉴定

实验工作从 2005 年秋季开始至 2006 年秋季结束,每个季节采样 1 次,共计在采样区采集原始样品 360 个。样点的面积为 30 cm × 30 cm,以 100 cm³ 土壤容重器的土体为一个样点,每一个样点分别按 0—5 cm,5—10 cm,10—15 cm,3 层进行取样,不同深度平均取样 3 次,后用干漏斗法(Tullgran apparatus)和湿漏斗法(Baermann apparatus)分离提取土壤动物。后参照《中国土壤动物检索图鉴》与《中国亚热带土壤动物》利用双目体视显微镜进行分离鉴定,并做数据统计。土壤螨类鉴定到科,弹尾类鉴定到属,其它类群采用土壤动物大类群分类法鉴定^[19-20]。

1.4 土壤理化性质及重金属含量的测定

土壤 pH 值用 TFW-VI 型土壤养分测定仪测定;土壤有机质测定采用重铬酸钾氧化容量法测定;土壤容重采用简易测定法^[21];土壤的全 N 用半微量凯氏定氮法(K₂SO₄-CuSO₄-Se 蒸馏法),全 P 用 NaOH 碱熔-钼锑抗比色法测定,全 K 用 NaOH 熔融,火焰光度法测定;土壤重金属含量由波长色散型 X 射线荧光光谱仪 Axios(英国帕纳科公司)测定。按季节测定土壤的理化性质及重金属含量。

1.5 数据处理

土壤动物群落结构分析利用群落多样性 Shannon-Wiener 指数 H 、均匀性 Pielou 指数 E 、优势度 Simpson 指数 C 、Jaccard 群落相似指数 q 和 Motyka 群落相似系数 Sm ^[22],重金属污染综合评价用尼梅罗综合污染指数(Nemerow index) I_{ij} ^[23]。

土壤理化性质和土壤重金属对土壤动物群落结构的影响,采用灰色关联的方法分析^[24]。

$$\text{关联系数: } r_{ij}(k) = \frac{\Delta_{\min} + P\Delta_{\max}}{\Delta_{ij}(k) + P\Delta_{\max}}$$

式中, Δ_{\min} 、 Δ_{\max} 分别为所比较的数列各个时刻的绝对差中的最小值和最大值;其中 P 为分辨系数,用来削弱 Δ_{\max} 数值过大而失真产生的影响, $P \in [0, 1]$,一般取值在 0.1—0.5,本文取值 0.5。

$$\text{广义灰色关联度: } \varepsilon_{ij} = \frac{1 + |x_{sj}| + |y_{si}|}{1 + |x_{sj}| + |y_{si}| + |y_{si} - x_{sj}|}$$

$$\text{其中, } |x_{sj}| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} x_1^0(k) + \frac{1}{2}x_1^0(n) \right|, |y_{si}| = \left| \sum_{k=2}^{n-1} y_1^0(k) + \frac{1}{2}y_1^0(n) \right|$$

$$\text{灰色综合关联度: } \rho_{0i} = \theta\varepsilon_{0i} + (1 - \theta)\gamma_{0i}$$

其中, ε_{0i} 、 γ_{0i} 分别表示灰色绝对关联度和相对关联度, $\theta \in [0, 1]$,一般为 0.5。

用 SPSS 13.0 进行数据处理,不同样带的土壤的理化性质、重金属含量及土壤动物的个体数量进行单因素方差分析(One-way ANOVA),数据分析前,对土壤动物的个体数量进行 $\log(x + 1)$ 转换;污染指数与土壤动物个体数、类群数及土壤多样性指数相关分析采用 Correlate 相关分析中的 Pearson 分析,统计分析概率为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质及重金属污染程度

2.1.1 土壤理化性质分析

土壤理化性质(表 1)显示,各样带土壤容重均值介于 1.1—1.4 g/cm³,土壤的熟化程度较好;pH 值均 < 7,土壤呈现酸性;土壤有机质含量均值在 27.84—33.15 g/kg⁻¹之间;土壤全氮、全钾的含量均值分别介于 3.08—3.77,2.03—2.91 之间变化;全磷的均值含量介于 601.66—755.15 g/kg⁻¹。对土壤的理化性质做单因素方差分析,表明土壤的容重、有机质、全氮及全钾差异不明显($P > 0.05$);而土壤的 pH 值及全磷差异显著($P < 0.05$)。

表 1 采样区的土壤理化性质

Table 1 The physiochemical properties of soils in sampling areas

采样区 Sampling area	a 样带 Transect a	b 样带 Transect b	c 样带 Transect c	d 样带 Transect d	e 样带 Transect e	CG 样带 Transect CG
距离道路的距离 Distance to the road/m	5	50	100	150	200	4000
土壤容重 Bulk density of soils/(g/cm ³)	1.28 ± 0.04	1.21 ± 0.06	1.30 ± 0.01	1.22 ± 0.05	1.20 ± 0.08	1.27 ± 0.05
pH	6.46 ± 0.16a	6.27 ± 0.18abc	6.29 ± 0.15ab	6.12 ± 0.11bc	6.07 ± 0.14c	6.35 ± 0.06a
有机质 Organic carbon/(g/kg)	31.88 ± 1.36	33.15 ± 2.77	28.36 ± 2.67	27.84 ± 2.61	30.52 ± 2.83	30.41 ± 2.87
全氮 Total N/%	3.43 ± 0.36	3.77 ± 0.16	3.15 ± 0.42	3.08 ± 0.29	3.28 ± 0.31	3.19 ± 0.24
全磷 Total P/(g/kg)	662.95 ± 61.44bc	755.15 ± 14.67a	629.57 ± 34.27bc	601.66 ± 13.34c	660.42 ± 50.64bc	666.59 ± 36.72b
全钾 Total K/%	2.67 ± 0.28	2.91 ± 0.32	2.58 ± 0.33	2.03 ± 0.42	2.41 ± 0.36	2.54 ± 0.42

表中数据为平均值 ± 标准差,同行中不同的小写字母表示各采样点间 LSD 检测差异达显著水平($P < 0.05$)

2.1.2 土壤重金属污染现状及评估

土壤重金属的含量和污染评估参照(表 2),在 a、b、c、d、e、CG 等 6 个样带中,综合污染指数 I_p 的变化是 $a > b > c > d > e > CG$ 。a 样带距公路最近,与交通排放物接触最为频繁,是重金属沉降的集中区域,受污染最重,尼梅罗综合指数为 2.02,污染等级是 IV 级,属于中度污染区;b、c、d 样带属于轻度污染区,说明交通污染物通过空气散布,降尘范围广泛;e 样带的尼梅罗综合指数为 0.89,e 样带为尚清洁区,距离公路 200 m 处,交通污染物污染力度削弱。随着农田距公路垂直距离的增加,土壤受重金属污染的程度减小。而且,在公路系统的土壤污染中,不同的重金属对农田土壤的污染程度也不一样,但均高于对照和上虞市境内五种重金属元素的背景值^[25]。通过单因素方差分析表明,在离公路距离不同污染样带中,重金属全铅、全铜、全锌、全铬及全镍存在着极其显著的差异($P < 0.01$)。

表 2 采样区土壤重金属含量与尼梅罗土壤污染指数

Table 2 Contents heavy metal elements and Nemerow Synthetical Pollution Index in sampling areas

采样区 Sampling area	全铅 Total Pb /(mg/kg)	全铜 Total Cu /(mg/kg)	全锌 Total Zn /(mg/kg)	全铬 Total Cr /(mg/kg)	全镍 Total Ni /(mg/kg)	综合污染指数 Pollutant index	污染等级 Pollutant grade
a 样带 Transect a	64.67 ± 0.81B	89.74 ± 1.15A	153.75 ± 1.04A	63.69 ± 0.65A	84.87 ± 0.68A	2.02	IV(中度污染)
b 样带 Transect b	57.99 ± 1.26D	79.17 ± 1.16B	133.86 ± 1.13B	57.47 ± 0.49B	73.16 ± 0.26B	1.67	III(轻度污染)
c 样带 Transect c	62.17 ± 0.31C	63.46 ± 0.65C	110.15 ± 0.81C	53.76 ± 0.82C	53.66 ± 0.68C	1.27	III(轻度污染)
d 样带 Transect d	76.33 ± 0.95A	51.48 ± 0.94D	102.40 ± 0.63D	45.78 ± 1.13D	44.81 ± 0.35D	1.14	III(轻度污染)
e 样带 Transect e	50.74 ± 0.44E	37.70 ± 0.37E	89.99 ± 1.05E	39.79 ± 0.81E	37.17 ± 0.31E	0.89	II(尚清洁)
CG 样带 Transect CG	28.38 ± 0.21F	25.42 ± 0.62F	70.51 ± 0.45F	22.37 ± 0.56F	35.12 ± 0.40F	0.61	I(清洁)

表中数据为平均值 ± 标准差,同列重金属指标不同的大写字母表示各采样点间 LSD 检测差异达显著水平($P < 0.01$)

2.2 土壤动物的组成及污染对土壤动物类群的影响

2.2.1 土壤动物的数量特征

野外调查选取的 360 个土壤样品,共获取土壤动物 4046 个,隶属 4 门 7 纲(表 3)。其中 a 样带获取土壤动物 516 个,占总捕获量的 12.75%;b 样带获取土壤动物 502 个,占总捕获量的 12.41%,数量较 a 样带稍微下降;c 样带获取土壤动物 555 个,占总捕获量的 13.72%;d 样带获取土壤动物 710 个,占总捕获量的 17.55%;e 样带获取土壤动物 836 个,占总捕获量的 20.66%;CG 样带获取土壤动物 927 个,占总捕获量的 22.91%。从整体情况来看,采样区捕获的土壤动物有 50 个类群,其中弹尾目、前气门亚目、甲螨亚目等类群的分布较多,属于优势类群,分别占总捕获量的 32.01%、11.47%、17.28%。双翅目幼虫、线虫动物、蜘蛛目、

蛭纲、双尾目为常见类群,分别占总捕获量的 6.20%、1.95%、1.38%、1.04%、6.38%。其余的如鳞翅目、同翅目、倍足纲、直翅目、等翅目、鞘翅目等均为稀有类群。

对 5 条污染样带和对照样带的土壤动物的个体数量进行单因素分析表明,污染样带间存在显著的差异 ($P=0.041 < 0.05$);多重比较显示,a 样带、b 样带、c 样带与对照样地 CG 差异显著 ($P < 0.05$),a 样带和 b 样带与 e 样地的差异显著 ($P < 0.05$);其余样地之间差异不显著 ($P > 0.05$)。

表 3 采样区土壤动物的类群数量统计结果

Table 3 Classification and quantity of soil animal community at each sampling sites

类群 Groups	不同污染样带 Different polluted transects						合计 /只 Total/ind.	百分比/% Percent	多度 Collembola
	a	b	c	d	e	CG			
弹尾目 Collembola								32.01	+++
符跳属 <i>Folsomia</i>	49	42	65	55	71	79			
棘跳属 <i>Onychiurus</i>	0	2	1	4	0	6	13	0.32	+
球角跳属 <i>Hypogastrura</i>	5	17	18	23	20	34	117	2.89	++
等节跳属 <i>Isotoma</i>	9	12	8	19	16	27	91	2.25	++
棘跳属 <i>Onychiuridae</i>	0	5	1	4	4	10	24	0.59	+
小等跳属 <i>Isotomiella</i>	14	12	7	18	38	33	122	3.02	++
原等跳属 <i>Proisotoma</i>	17	35	24	52	47	48	223	5.51	++
土跳属 <i>Tullbergia</i>	7	0	2	10	18	7	44	1.09	++
针圆跳属 <i>Sphyrotheca</i>	3	1	2	0	4	7	15	0.37	+
长跳属 <i>Entomobrya</i>	0	0	0	1	1	1	3	0.07	+
陷等跳属 <i>Isotomurus</i>	1	9	0	4	17	14	45	1.11	++
奇跳属 <i>Xenylla</i>	8	4	15	9	18	21	75	1.85	++
短角跳属 <i>Neelus</i>	0	8	17	13	30	24	92	2.27	++
球圆跳属 <i>Sphaeridia</i>	2	1	0	0	3	1	7	0.17	+
裔符跳属 <i>Folsomides</i>	6	12	3	7	18	15	61	1.51	++
小圆跳属 <i>Sminthurinus</i>	0	0	0	1	0	1	2	0.05	+
真螨目 Acariformes									
前气门亚目 Prostigmata								11.47	+++
赤螨科 Erythraeidae	2	1	6	15	7	11	42	1.04	++
吸螨科 Bdellidae	16	7	12	33	29	38	135	3.34	++
跗线螨科 Tarsonmidae	0	0	4	1	1	2	8	0.19	+
缝颚螨科 Raphignathidae	12	12	7	16	22	19	88	2.17	++
长须螨科 Stigmaeidae	7	2	9	10	7	14	49	1.21	++
腾岛螨科 Teneriffidae	0	1	0	0	2	0	3	0.07	+
隐颚螨科 Cryptognathidae	17	16	14	25	21	46	139	3.44	++
甲螨亚目 Oribatida								17.28	+++
菌甲螨科 Scheloribatidae	30	24	18	37	29	33	171	4.23	++
若甲螨科 Oribatulidae	0	2	0	0	0	1	3	0.07	+
奥甲螨科 Oppiidae	17	9	20	14	23	23	106	2.62	++
盖头甲螨科 Tectocephidae	12	17	17	28	23	21	118	2.92	++
短甲螨科 Brachychthoniidae	10	21	18	15	24	29	118	2.92	++
鲜甲螨科 Cepheidae	26	14	21	6	27	17	113	2.79	++
小隅甲螨科 Microtegeidae	4	0	2	0	7	1	14	0.35	+
赫甲螨科 Hermanniidae	14	0	7	12	14	9	56	1.38	++
沙甲螨科 Eremulidae	50	39	58	86	84	81	368	9.09	++
丽甲螨科 Liacaridae	0	0	4	0	5	1	10	0.25	+
扇珠甲螨科 Lienodamaeidae	0	5	0	2	12	8	27	0.67	+

续表

类群 Groups	不同污染样带 Different polluted transects						合计 /只 Total/ind.	百分比/% Percent	多度 Collembola
	a	b	c	d	e	CG			
单翼甲螨科 Haplozetidae	9	14	20	19	31	22	115	2.84	++
上罗甲螨科 Epilohmanniidae	27	30	21	35	28	34	175	4.33	++
木单翼甲螨科 Xylobatidae	7	12	5	11	23	19	77	1.90	++
双翅目幼虫 Diptera larvae	38	30	44	32	50	57	251	6.20	++
线虫动物门 Nematoda	11	11	18	7	12	20	79	1.95	++
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	12	0	5	5	7	3	32	0.79	+
同翅目幼虫 Homoptera larvae	5	1	1	6	0	0	13	0.32	+
蜘蛛目 Araneae	9	10	4	11	8	14	56	1.38	++
蛭纲 Hirudinea	8	2	6	14	4	8	42	1.04	++
倍足纲 Diplopoda	0	0	2	4	2	0	8	0.19	+
直翅目 Orthoptera	3	7	1	0	5	3	19	0.47	+
涡虫纲 Turbellaria	7	5	2	6	5	9	34	0.84	+
双尾目 Diplura	68	45	41	37	45	52	258	6.38	++
等翅目 Isoptera	0	4	1	1	5	4	15	0.37	+
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	0	0	2	2	0	0	4	0.09	+
鞘翅目成虫 Coleoptera adult	3	1	2	0	1	0	7	0.17	+
合计 Σ summation	516	502	555	710	836	927	4046		

注:优势类群(+++);常见类群(++);稀有类群(+);a, b, c, d, e, CG 分别代表距 104 国道线垂直距离 5 m、50 m、100 m、150 m、200 m、4000 m 的 6 条取样带

2.2.2 污染物对土壤动物类群数和个体数量的影响

在试验中,a、b、c、d、e、CG 6 条样带的土壤动物的类群数分别为 36、40、43、44、47、46,相对应的个体数分别是 516、502、555、710、836、927(表 3 和表 4),样地污染程度与类群数呈极显著的负相关($r = -0.962, P = 0.002 < 0.01$),与个体数呈现显著的负相关($r = -0.915, P = 0.011 < 0.05$),即污染指数越大,土壤动物的类群和个体数量就越小。其中,a 样带(属中度污染区)的土壤动物类群数量最少,短角跳属、棘跳属、跗线螨科、倍足纲、等翅目从该样带中消失,这些土壤动物类群的消失可能与土壤的污染有关,但消失的原因有待进一步研究证实;b 样带是轻度污染地带,类群数比 a 样带有所增加,但是个体数目却比 a 样带少,减少的原因是优势类群和常见类群个体数量的下降;e 样带(污染等级为尚清洁)的土壤动物类群数量最多,甚至超过了对照组 CG(污染等级为清洁安全区)的类群数量。随着农田土壤污染程度的增加土壤动物类群数是减少的,一些生态幅狭窄的稀有类群,对污染的影响反应特别敏感,可以作为环境污染的指示类群。

2.2.3 污染对多样性指数、均匀性指数和优势度指数的影响

在土壤动物学中,多样性指数、均匀性指数和优势度指数是能够反映动物群落功能组织特征的重要生物指标。从表 4 统计数据上可以看出,随着实验区农田土壤距 104 国道线距离远近的变化,污染程度的不同,土壤动物的多样性指数、均匀性指数和优势度指数都呈现出明显的变化趋势。随着实验区农田土壤距 104 国道线垂直距离的减小,污染程度的增加,其对应的样带多样性指数逐渐减小($r = -0.821, P = 0.045 < 0.05$),从对照组(CG)的 3.576 下降到 a 采样带的 3.324,但 c、d 采样带的多样性指数为 3.425、3.502,稍小于 b 采样带 3.516。均匀度指数在 a 至 c 范围内呈现下降趋势,由 0.928 下降到 0.911,但在 d 至 CG 范围内又有上升,最高达到了对照组的 0.934,但均匀性指数与污染指数相关不明显($r = -0.267, P = 0.609 > 0.05$)。优势度指数随着农田土壤距 104 国道线垂直距离的增加而下降,与多样性指数变化相反($r = 0.982, P = 0.001 < 0.01$),表明一些稀有类群随着农田土壤重金属污染程度上升而可能消失,使得优势种类的优势度更加明显,这与孙贤斌等的研究一致^[13]。

表 4 土壤动物类群的主要特征指数

Table 4 Characteristic index of soil animal communities in various sampling areas

项目 Item	采样区 Sampling area					CG
	a	b	c	d	e	
类群数 Number of groups	36	40	43	44	47	46
个体数 Individual number	516	502	555	710	836	927
多样性指数 Diversity index	3.324	3.516	3.425	3.502	3.571	3.576
均匀性指数 Evenness index	0.928	0.923	0.911	0.925	0.927	0.934
优势度指数 Dominance index	0.071	0.065	0.055	0.047	0.044	0.041

2.3 土壤动物的垂直分布

以往的研究表明,在自然生态系统中土壤动物在土壤中的分布在垂直水平上具有表聚性的特点,即绝大多数土壤动物主要分布在土壤 0—5 cm 表层,而在土壤 5—10 cm、10—15 cm 处的土壤动物数量明显减少^[4,8-9]。通过单因素方差检验,不同土壤层次的土壤动物个体数目差异极显著($P = 0.0002 < 0.01$),0—5 cm 层的土壤动物与 5—10 cm 及 10—15 cm 有极显著的差异($P < 0.01$),5—10 cm 和 10—15 cm 土层的土壤动物差异显著($P < 0.05$)。图 1 所示,在垂直分布上各采样带都表现出在 0—5 cm 这一层的土壤动物最多,越往深层土壤动物数量越少,这同未受污染生态系统中土壤动物的垂直分布规律是一致的。同时,在实验过程中也观察到土壤动物在垂直分布上的表聚性明显减弱的现象。在对照样带(CG)土壤动物数量上的表聚性表现得最为明显,0—5 cm 层土壤动物达 668 个,占该样带总捕获量的 73.41%,5—10 cm、10—15 cm 层的土壤动物分别为 133、109 个,占该样带总捕获量的 14.62%、11.98%,呈现出明显的减少趋势。而中度污染的 a 采样带土壤动物在垂直分布上的表聚性明显减弱,0—5 cm 层土壤动物下降为 343 个,占该样带总捕获量的 66.47%,5—10 cm、10—15 cm 层的土壤动物分别为 97、76 个,占该样带总捕获量的 18.79%、14.73%,即深层土壤动物数量在该样带的总捕获量中的比例上升。轻度污染区 b、c、d 采样带和尚清洁区 e 样带也呈现出同 a 采样带相似的趋势。研究表明在受损生态系统(如被污染严重的土壤)中,土壤动物在垂直分布上的表聚性明显减弱,有时甚至会出现逆分布现象^[4,13],本研究发现公路周围的土壤受到的污染还没有达到土壤动物逆态分布现象的剂量,结合土壤污染情况看,土壤动物个体数垂直分布变化与土壤污染程度可能存在关系,

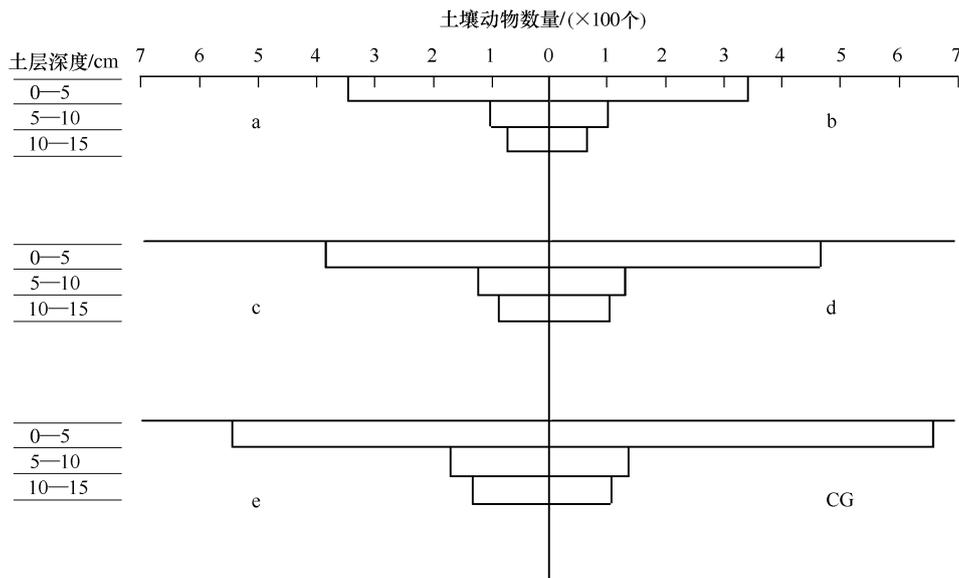


图 1 各采样带土壤动物数量的垂直分布

Fig. 1 The vertical distribution of individuals of soil animals in various sampling areas

但表聚性影响因素众多,如农耕,人为地活动等,是否可以利用污染区域土壤动物的垂直分布的变化对土壤环境质量做出判断有待进一步的研究。

2.4 土壤动物类群的相似性分析

在污染样带土壤动物类群相似性分析中,本研究采用了 Jaccard 群落相似指数 q 和 Motyka 群落相似指数 Sm 两个相似性系数。表 5 为各采样区土壤动物类群的相似性指数值。

Jaccard 相似指数多用来衡量群落的相似性,只考虑了动物类群的有无,忽略了生物群落数量之别。由表 5 可以看出,各采样带之间的相似指数都比较高,其中 a 与 c 之间的指数值最高,达到了 0.837,表示两群落极相似;a 与 b、e、CG 之间的指数值分别为 0.767、0.770、0.750,均为极相似。b 与 c、d、e 之间的指数值稍低,分别为 0.694、0.680、0.740,均为中等相似。对照组 CG 与其余 5 组之间的指数值均超过了 0.75,其中 CG 与 e 之间的指数值达到了 0.824。说明不同样带之间的土壤动物存在的共有类群较多。群落相似性不只是组成相似性,还要考虑到相同组成的个体数量的相似程度, Motyka 群落相似系数考虑了群落中各类群的数量,从表中我们可以看出,e 与 CG 之间的指数值最高,达到了 82.7,表示两样带的动物类群结构极相似;a 与 b、e 之间,d 与 e、CG 之间的指数值均大于 75,表示动物类群结构极相似;其余样带之间的动物类群结构中中等相似。

表 5 不同样点土壤动物类群 Jaccard 和 Motyka 相似系数

Table 5 The cluster coefficients of soil animal with Jaccard and Motyka in various sample areas

q	a	b	c	d	e	CG
a	—	0.767	0.837	0.702	0.770	0.750
b		—	0.694	0.680	0.740	0.755
c			—	0.776	0.800	0.780
d				—	0.717	0.765
e					—	0.824
CG						—
Sm	a	b	c	d	e	CG
a	—	76.8	78.9	74.4	73.2	67.9
b		—	68.5	73.4	73.2	69.1
c			—	74.1	77.4	72.3
d				—	77.5	80.8
e					—	82.7
CG						—

2.5 土壤动物群落和土壤因子的关联度分析

为了解土壤动物群落结构和土壤因子之间的关系,利用灰色关联分析方法,选择土壤动物优势类群弹尾目,前气门亚目,甲螨亚目,常见类群中的双翅目幼虫,线虫,双尾目,稀有类群个体数量,类群数目,个体总量,群落多样性指数作为母数列(y),并依次定义为弹尾目(y_1),前气门亚目(y_2),甲螨亚目(y_3),双翅目幼虫(y_4),线虫(y_5),双尾目(y_6),稀有类群个体数量(y_7),类群数目(y_8),个体总量(y_9),群落多样性指数(y_{10})为母数列。对土壤的理化性质做单因素方差分析,表明土壤的容重、有机质、全氮及全钾差异不明显($P > 0.05$),选择理化因子差异明显的 pH、全磷和重金属因子为子数列(x),依次定义为 pH(x_1),全磷(x_2),全铅(x_3),全铜(x_4),全锌(x_5),全铬(x_6),全镍(x_7)。原始数据无量纲化初始值,计算灰色关联系数(r_{ij}),灰色绝对关联度(ε)、灰色相对关联度(γ)以及综合关联度(ρ)。

2.5.1 土壤动物群落与土壤因子的关联系数

在所有的系数中(表 6), r_{102} 最大, $r_{102} = r(y_{10}, x_2) = 0.9275$,表明土壤全磷对土壤动物群落多样性指数影响最大。从土壤动物的 7 个类群来看,在 r_{ij} 中,即 $r_{ij} = (y_i, x_j)$, r_{12} 最大, r_{15} , r_{17} 偏小,表明弹尾目受全磷

(0.7229)的影响较大,受全锌(0.6157)和全镍(0.6201)的影响较小。在 r_{2j} 中,即 $r_{2j} = (y_2, x_j)$,其中 r_{21} 最大, r_{23} 次之, r_{24}, r_{25} 较小,表明前气门亚目受到 pH(0.7447)的影响较大,同时铅(0.7440)也对前气门亚目的昆虫作用较大,受全铜(0.6682)和全锌(0.6622)影响较小。以此类推,pH(0.7886)和全铅(0.7861)对甲螨亚目的土壤动物影响较大,全铜(0.6733)和全镍(0.6747)影响较小。双翅目幼虫受 pH(0.7905)的影响较大,全铜(0.6733)和全锌(0.6747)的影响较小。对于土壤中的线虫,pH(0.7784)和全磷(0.7755)的影响大,全锌(0.6895)和全镍(0.7020)影响较小。全磷(0.9002)和 pH(0.8280)对于双尾目土壤动物影响大,全铜(0.6298)和全锌(0.6233)影响较小。稀有类群的土壤动物受到重金属全铬(0.7082)和全镍(0.7020)的影响较大,全磷(0.5657)和 pH(0.6214)的影响较小。pH(0.7335)和全磷(0.7919)对土壤动物类群数量影响较大,全铜(0.5834)和全锌(0.5732)对类群数影响较小。土壤动物个体数量受到 pH(0.7777)和全磷(0.7629)的影响较大,受到全锌(0.6448)和全镍(0.6499)的影响较小。土壤多样性指数受到全磷(0.9275)和 pH(0.8755)的影响较大,全铅(0.7622)也对其有一定影响,全锌(0.6059)和全镍(0.6200)影响较小。

土壤因子关联度均值大小顺序为全磷(0.7744),pH(0.7629),全铅(0.7274),全铬(0.6908),全镍(0.6512),全铜(0.6448),全锌(0.6392);土壤动物群落关联度均值大小顺序为群落多样性指数(0.7272),线虫(0.7271),双翅目幼虫(0.7220),双尾目(0.7188),甲螨亚目(0.7155),个体总量(0.7053),前气门亚目(0.7027),类群数目(0.6581),弹尾目(0.6567),稀有类群个体数量(0.6534)。

灰色关联度越大,说明子序列对母序列的影响越大^[24],从上述数据中,可以看出,理化指标和重金属因子与污染地带土壤动物的关系密切,其中最大值为全磷(0.7744),最小值为全锌(0.6392),其中理化指标全磷和 pH 对土壤动物的个体数量影响较大;重金属的污染不能忽视,铅和铬对土壤动物影响大于其他重金属。群落多样性指数与选取的环境因子最为密切,常见类群线虫、双翅目幼虫、双尾目较为密切,弹尾目和稀有类群个体数量密切程度较低。

表 6 因子间的灰色关联系数(r_{ij})Table 6 The grey relational degree among factors(r_{ij})

因子 Factor	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7
y_1	0.6911	0.7229	0.6807	0.6204	0.6157	0.6456	0.6201
y_2	0.7447	0.7311	0.7440	0.6682	0.6622	0.6989	0.6699
y_3	0.7886	0.7808	0.7861	0.6525	0.6453	0.7035	0.6517
y_4	0.7905	0.7859	0.7260	0.6733	0.6747	0.7247	0.6790
y_5	0.7784	0.7755	0.7071	0.7040	0.6895	0.7330	0.7020
y_6	0.8280	0.9002	0.7301	0.6298	0.6233	0.6889	0.6310
y_7	0.6214	0.5657	0.6744	0.6496	0.6543	0.7082	0.7002
y_8	0.7335	0.7919	0.7054	0.5834	0.5762	0.6281	0.5884
y_9	0.7777	0.7629	0.7577	0.6512	0.6448	0.6929	0.6499
y_{10}	0.8755	0.9275	0.7622	0.6153	0.6059	0.6843	0.6200

2.5.2 关联排序

灰色绝对关联度(ε)、灰色相对关联度(γ)以及综合关联度(ρ),其关联序大小依次为:

$$\varepsilon_{2j}(0.6351) > \varepsilon_{6j}(0.5339) > \varepsilon_{3j}(0.5327) > \varepsilon_{1j}(0.5178) > \varepsilon_{7j}(0.5173) > \varepsilon_{4j}(0.5157) > \varepsilon_{5j}(0.5080)$$

$$\gamma_{2j}(0.7666) > \gamma_{1j}(0.6594) > \gamma_{3j}(0.6414) > \gamma_{6j}(0.6222) > \gamma_{7j}(0.6138) > \gamma_{4j}(0.6104) > \gamma_{5j}(0.6001)$$

$$\rho_{2j}(0.7008) > \rho_{1j}(0.5886) > \rho_{3j}(0.5871) > \rho_{6j}(0.5780) > \rho_{7j}(0.5655) > \rho_{4j}(0.5631) > \rho_{5j}(0.5540)$$

上述数据表明,绝对关联度(ε)中, x_2 为最优因素, x_6 次之, x_3 再次之, x_5 最劣,即理化性质中全磷对土壤动物的影响最大,全镍的影响次之,其次是铅的影响,其关联度已接近镍的影响,锌的影响最小;相对关联度(γ)中, x_2 为最优因素, x_1 次之, x_3 又次之, x_5 最劣,即全磷对土壤动物的影响最大,pH的影响次之,再次是土壤的铅

影响, 锌的影响最小; 在综合关联度(ρ)中, x_2 为最优因素, x_1 次之, x_3 又次之, x_5 最劣, 即全磷对土壤动物的影响最大, pH 的影响次之, 再次是铅的影响, 锌的影响最小。灰色绝对关联度、灰色相对关联度、及综合关联度分析结果不同, 由于 3 种关联序列出发的角度不同, 绝对关联序是从绝对量取的角度考虑, 没有整体性, 相对关联序是从各个时刻相对于始点的变化的角度考虑, 综合关联即能反映绝对关联序折线 x_0 与 x_i 的相似程度, 又能反映 x_0 与 x_i 相对于始点变化速率的接近程度, 能较全面的表征子序列与母序列是否紧密的一个数量指标^[24]。土壤全磷对土壤动物的影响最大, pH 次之, 再次是铅、铬, 锌的影响最小。土壤的理化指标全磷和 pH 对土壤动物的作用大于重金属各因子的作用, 尤其是全磷的影响, 这与林英华等的研究不同^[26]。土壤的 pH 值是影响土壤动物的一个重要限制因子^[20], 本研究的结果也说明了这一点; 但重金属的污染也不能忽视, 在重金属因子中, 铅对土壤动物的影响最大, 这与宋博等的研究一致^[8], 已接近土壤 pH 的影响程度, 铬对土壤动物的影响程度仅次于铅。交通重金属的积累是一个漫长的过程, 对土壤动物影响也是一个长期的过程, 对重金属污染的监测及相关研究也需要持久的进行。

3 结语

通过野外采样, 共获取土壤动物 4046 个, 50 个类群。优势类群弹尾目、前气门亚目、甲螨亚目分布广泛, 常见类群为双翅目幼虫、蜘蛛目、双尾目、线虫类和蛭纲, 其余为稀有类群。交通重金属污染物对农田土壤的优势类群的影响表现在优势类群个体数目的变化, 对常见类群和稀有类群的影响表现在类群数目的减少。这对重金属污染和土壤生态系统恢复程度有一定的指示作用^[4,9]。土壤动物的个体数和类群数与土壤的污染指数呈负相关, 污染加重, 土壤动物个体数和类群数减少。土壤动物群落多样性指数、均匀性指数与土壤污染指数呈负相关, 与优势度指数呈正相关, 即土壤的污染程度越大, 土壤动物群落多样性就越低, 越不均匀, 优势度就越大。

就土壤动物垂直空间分布而言, 土壤动物具有表聚性。随着污染程度的增加, 出现表聚性减弱的现象, 还没有出现逆分布现象^[7,17-18], 但也要引起足够的重视, 在距离 104 国道的 5 m 的 a 样带土壤污染程度已达到中度污染等级。多种重金属的过量积累, 影响了土壤的结构和理化性质, 进而影响到土壤系统的稳定。土壤动物个体数垂直分布变化与土壤污染程度可能存在关系, 但表聚性影响因素众多, 如土壤的含水量, 农耕, 人为地活动等, 是否可以利用污染区域土壤动物的垂直分布的变化对土壤环境质量做出判断有待进一步的研究。

灰色关联分析表明, 土壤全磷对土壤动物的影响最大, 土壤 pH 值的影响次之, 重金属的污染也不能忽视, 其中, 铅对前气门亚目和甲螨亚目的土壤动物作用明显; 稀有类群土壤动物, 全铬和全镍的影响要大于其他重金属因子、全磷和 pH。近年来, 机动车辆的数量的增加, 含铅汽油和润滑油大量的使用, 汽车维护保养差, 致使交通要道两侧土壤污染问题突出。因此, 有效的控制交通流量, 减少含铅汽油的使用, 提高轮胎、刹车片的质量, 培植相应的绿化带等, 能减少公路两侧重金属的含量, 有效的减少重金属对两侧的土壤动物群落的危害。

致谢: 英国埃克斯特大学 Anderson 教授润色英文摘要; 中国石油大学(北京)理学院数学系穆兴在数据分析过程中给予帮助, 在此谨表谢忱。

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] Cui D J, Zhang Y L. Current situation of soil contamination by heavy metal and research advances on the remediation techniques. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3): 366-370.
- [3] Guo G H, Lei M, Chen T B, Song B, Li X Y. Effect of road traffic on heavy metals in road dusts and roadside soils. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, 28(10): 1937-1945.
- [4] Yin W Y, Zhang R Z, Song D X. *Soil Animal of China*. Beijing: Science Press, 2000.
- [5] Van Straalen N M. Evaluation of bioindicator systems derived from soil arthropod communities. *Applied Soil Ecology*, 1998, 9: 429-437.
- [6] Zheng R Q, Li C Y. The Effect of Lead on Survival, Locomotion and Sperm Morphology of Asian Earthworm, *Pheretima guillelmi*. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21: 691-695.

- [7] Parisi V, Menta C, Gardi C, Jacomini C, Mozzanica E. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: a new approach in Italy. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2005, 105: 323-332.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Lee P K, Touray J C, Baillif, Ildefonse J P. Heavy metal contamination of settling particles in a retention pond along the A-71 motorway in Sologne, France. *The Science of the Total Environment*, 1997, 201: 1-15.
- [11] Li X D, Poon C S, Liu P S. Heavy metal contamination of urban soils and street dust in Hong Kong. *Applied Geochemistry*, 2001, 16: 1361-1368.
- [12] Hu G R, Yu R L. Application of index of geo-accumulation and enrichment factor in assessment of heavy metal contamination in soil of tangtou section on No. 324 main roads. *China Mining Magazine*, 2008, 17(4): 47-51.
- [13] Sun X B, Li Y C, Zhang X P, Wang Z Y. Influence of heavy metal pollution on soil animal community and its diversity in Huainan City. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(10): 1163-1166.
- [14] Stamou G P, Argyropoulos M D. A preliminary study on the effect of Cu, Pb and Zn contamination of soils on community structure and certain life-history traits of oribatids from urban areas. *Experimental and Applied Acarology*, 1995, 19: 381-390.
- [15] Nahmani J, Lavelle P. Effect of heavy metal pollution on soil macrofauna in a grassland of Northern France. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38: 297-300.
- [16] Spurgeon D J, Rowland P, Ainsworth G, Rothery P, Long S, Black H I J. Geographical and pedological drivers of distribution and risks to soil fauna of seven metals (Cd, Cu, Cr, Ni, Pb, V and Zn) in British soils. *Environmental Pollution*, 2008, 153: 273-283.
- [17] Li B, Lin Y S, Zhang X F, Xu Y G, Yu F. Pollution of heavy metals in soil and agricultural products on sides of Ning-lian superhighway. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2): 266-269.
- [18] State Environmental Protection Administration of China. GB15618-95. Soil Environment Quality Standards of People's Republic of China. Beijing: Standards Press of China, 1995.
- [19] Yin W Y, Hu S H, Shen Y F. Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998.
- [20] Yin W Y, Yang F C, Wang Z Z. Subtropical Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1992.
- [21] Zhang J E. A Common Experimental Study of Methods and Techniques on Ecology. Beijing: Chemical Industry Publishing House, 2006.
- [22] Ma K P, Liu C R, Liu Y M. The methods of measuring community diversity. II. measurement of β diversity. *Chinese Biodiversity*, 1995, 3(1): 38-43.
- [23] Sun T H, Zhou Q X, Li P J. Pollution Ecology. Beijing: Science Press, 2000.
- [24] Liu S F, Dang Y G, Fang Z G. The Grey System and its Application (Second edition). Beijing: Science Press, 1999.
- [25] Lu X N. Quality control of the background value in the determination of Zhejiang in soil. *Environmental Monitoring in China*, 1990, 6(1): 34-37.
- [26] Lin Y H, Zhang F D, Yang X Y, Jia X M, Gu Q Z, Sun B H, Ma L J. Grey relationship between cropland soil fauna community and the environment factors in Shanxi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(5): 609-614.

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] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展. *土壤通报*, 2004, 35(3): 366-370.
- [3] 郭广慧, 雷梅, 陈同斌, 宋波, 李晓燕. 交通活动对土壤两侧和灰尘中重金属含量的影响. *环境科学学报*, 2008, 28(10): 1937-1945.
- [4] 尹文英, 张荣祖, 宋大祥. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000.
- [8] 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.
- [9] 王振中, 张友梅, 邢协加. 土壤环境变化对土壤动物群落结构影响的研究. *土壤学报*, 2002, 39(6): 892-897.
- [12] 胡恭任, 于瑞莲. 应用地累积指数法和富集因子法评价 324 国道塘头段两侧土壤的重金属污染. *中国矿业*, 2008, 17(4): 47-51.
- [13] 孙贤斌, 李玉成, 张小平, 王宗英. 淮南市重金属污染对土壤动物群落和多样性影响研究. *生态学杂志*, 2005, 24(10): 1163-1166.
- [17] 李波, 林玉锁, 张孝飞, 徐亦钢, 俞飞. 宁连高速公路两侧土壤和农产品中重金属污染的研究. *农业环境科学学报*, 2005, 24(2): 266-269.
- [18] 国家环境保护局. GB15618-95. 中华人民共和国土壤环境质量标准, 北京: 中国标准出版社, 1995.
- [19] 尹文英, 胡圣豪, 沈温芬. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [20] 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.
- [21] 章家恩. 生态学常用实验研究方法与技术. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [22] 马克平, 刘灿然, 刘玉明. 生物群落多样性测度方法 II β 多样性的测度方法. *生物多样性*, 1995, 3(1): 38-43.
- [23] 孙铁珩, 周启星, 李培军. 污染生态学. 北京: 科学出版社, 2000.
- [24] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用(第二版). 北京: 科学出版社, 2004.
- [25] 陆遐南. 浙江省土壤背景值研究中分析质量控制. *中国环境监测*, 1990, 6(1): 34-37.
- [26] 林英华, 张夫道, 杨学云, 贾小明, 古巧珍, 孙本华, 马路军. 陕西农田土壤动物群落与长期施肥环境的灰色关联度分析. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(5): 609-614.