

甘肃徽县铅锌污染农业区冬季土壤纤毛虫群落特征

马正学, 贺鹏辉, 秦 洁, 宁应之

(西北师范大学生命科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要 2006年10月至2008年5月,用活体观察和固定染色方法对甘肃省徽县铅锌污染农业区土壤中纤毛虫冬季的群落特征进行了研究。在5个样点中共鉴定到土壤纤毛虫75种(包括9个未定名种和3个国内新记录种),隶属于3纲、11目、30科、41属,对照1、对照2、厂区、县城和牟坝各样点的土壤中分别有纤毛虫42、39、17、16和28种,对照样点与受污染较重的厂区、县城和牟坝土壤中纤毛虫群落相似性系数为极不相似($q=0.14、0.22、0.27$ 之间),各样点的物种多样性指数分别为4.76、4.28、2.15、2.05和3.28;各样点的铅含量分别为211、182、490、427和434 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,锌含量分别为48.4、46.8、1194、166和392 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。结果表明,铅锌污染对农业土壤纤毛虫群落有很大影响,主要体现在群落结构趋于简单化,物种多样性明显下降。

关键词 甘肃省徽县;铅锌污染;农业区;土壤纤毛虫;群落特征

中图分类号:X503.223 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)06-1127-09

Community Characteristics of Soil Ciliates in Lead-Zinc-Contaminated Agricultural Areas of Huixian County, Gansu Province in Winter

MA Zheng-xue, HE Peng-hui, QIN Jie, NING Ying-zhi

(College of Life Sciences, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract The community characteristics of soil ciliates in Lead-zinc-contaminated agricultural areas of Huixian County, Gansu Province in winter were studied from October 2006 to May 2008. The farmlands of Xinsicun and Mubacun villages around a Lead-zinc smelter in Shuiyangxiang township were selected as the sampling sites while the farmland and hillslopes which are distant from pollution sources but have a similar soil environment were selected as the control sampling sites. The methods and results based on the study were summarized as follows: Sampling sites introduction ①Control site 1 lies in a hillslope (major crops there: wheat, maize and soybean) which is about 4 kilometers away from the smelter. ②Control Site 2 is a scenic spot located on a hill about 3 kilometers far from the county town. ③Xiancheng site is a farmland-based hill-slope located on the banks of the Shuiyangjiang River to the southwest of the county town. ④Changqu site, a core Lead-zinc-contaminated area lies in a farmland (major crops there: wheat, maize, soybean and vegetables) next to the Lead-zinc smelter about 2 kilometers far from the county town. ⑤Muba site is located in a farmland (major crops: wheat, maize and soybean) about 3 kilometers away from the core Lead-zinc-contaminated area. The quincunx-sampling method was adopted in an area about 400 m^2 . 30 mL stainless steel cylinders were used to collect 20 soil samples which were about 3 000 g after blending and then were divided into 2 shares used respectively for the cultivation of ciliates and determination of the content of heavy metals (Pb, Zn) in the soil. The soil temperature, humidity and pH were also measured while sampling. Research method: The "non-flooded petri dish method" was used for the continuous cultivation of soil ciliates, after which the species identification was conducted with an optical microscope and the respective abundances were recorded as well on the 2nd, 4th, 7th, 11th, 20th and 28th day. The identification techniques include in vivo observation and fixation-staining as well as species identification and taxonomy references [21]–[32]. The determination of the concentrations of lead and zinc in the various samples was measured using an atomic absorption spectrophotometer (AAnaLyHt 400) (made by a Shanghai branch of American TE Company) by the Upstream Yellow River Water Environment Monitoring Center. Research results: The study results were summarized as follows: 75 species were totally identified in 5 sampling sites, including 9 unnamed species and 3 new records of soil ciliates in China, belonging to 3 classes, 11 orders, 30 families and 41 genera. There were 42, 39 species respectively distributed in soil sites of Controls 1 and 2, and 17, 16, 28 species respectively distributed in pollution soil sites of Changqu, Xiancheng and Muba.

收稿日期: 2008-08-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30470208); 中国海洋大学海水养殖教育部重点实验室开放基金

作者简介: 马正学(1953—), 男, 教授, 主要从事污染生态学的研究与教学工作。E-mail: mzhx53@163.com

The soil ciliate communities in the control sites and pollution sites were quite dissimilar($q=0.14, 0.22, 0.27$). The species diversity index was respectively 4.76, 4.28, 2.15, 2.05 and 3.28 in sampling sites of Controls 1 and 2, Changqu, Xiancheng and Muba. Their lead concentrations were respectively 211, 182, 490, 427 and 434 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ in the 5 sampling sites and the zinc concentrations were respectively 48.4, 46.8, 1 194, 166 and 392 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. The results show that community structure of soil ciliates have been influenced greatly by lead and zinc pollution, which indicates in the simplification of community structure and significant decline in species diversity.

Keywords Huixian County in Gansu Province; lead-zinc pollution; agricultural areas; soil ciliates; community characteristics

纤毛虫是土壤生态系统微型生物群落(microbiota community)的重要组成部分,在调控细菌群落、转化土壤养分方面有重要作用。纤毛虫对土壤环境变化的敏感性比微生物更高。土壤环境变化会导致纤毛虫群落组成和结构迅速变化,因此,研究土壤纤毛虫群落特征的变化,可为自然环境和受人类干扰导致的环境变化提供指示^[1]。

目前国内外对森林生态系统土壤纤毛虫的研究较多,对农业生态系统中土壤纤毛虫的研究报道较少。国外已有杀虫剂、杀真菌剂以及化肥等对土壤纤毛虫群落结构的影响^[2-4],以及重金属对纤毛虫的毒性研究^[5-9],受重金属污染的土壤纤毛虫群落特征研究未见报道。国内有对农业蔬菜基地土壤纤毛虫群落特征^[10]、铅锌矿采矿废物污染土壤环境^[11]、铅锌矿湿地处理系统和重金属复合污染土壤原生动物^[12-13]的研究报道。对甘肃徽县铅锌污染农业区土壤环境中纤毛虫群落特征的研究尚属空白。2006年9月,徽县公开报道了一起重大的铅污染事件,该事件造成徽县水阳乡新寺和牟坝两村近400名群众(其中儿童300余名)血铅严重超标,当地的农业生态系统受到了严重危害(导致该事件发生的污染源企业是位于新寺村的徽县有色金属冶炼有限责任公司。该公司自1996年投产以来一直沿用1999年国家就明令淘汰的落后的烧结锅冶炼生产工艺,主要污染物铅长期超标排放长达12年)。为了进一步了解铅锌等重金属对农业生态系统的危害程度,作者于2006年10月至2008年5月,对徽县受铅锌污染农业区土壤中的纤毛虫群落特征进行了研究,旨在通过分析铅锌污染对土壤纤毛虫群落特征产生的影响,为当地农业土壤环境的监测、评价和治理提供科学依据,也为逐步建立农田生态系统环境质量的预测预报系统和农业生态系统安全的指标体系积累基础资料。

1 研究区概况

徽县位于甘肃省东南部($33^{\circ}20'\sim 34^{\circ}31' \text{ N}$, $105^{\circ}20'\sim 106^{\circ}25' \text{ E}$),地处西秦岭南麓嘉陵江上游的

徽成盆地,素有“陇上江南”之美誉。全县辖7镇8乡,总人口22.14万,总面积2 723 km^2 ,其中耕地面积289.87 km^2 。主要农作物有玉米、小麦、豆类和瓜菜等。境内海拔700~2 000 m之间,南北为山地,中部为浅山丘陵。年平均气温12 $^{\circ}\text{C}$,无霜期210 d。年平均降雨量610.8 mm,气候类型主要为暖温带气候。森林覆盖率为46%。徽县矿产资源丰富。已探明的矿藏有铅、锌、铁和金等4大类22种,其中铅锌矿大型矿床有3处,金属储量1 050 000 t,属徽成铅锌矿带的中心区域。该区土壤类型主要为棕壤和红壤^[14]。

2 样品采集及研究方法

2.1 样点设置及采样

选择以徽县铅锌冶炼有限责任公司周围的水阳乡新寺村和牟坝村的农田作为采样点(半径约为3.5 km),另选择距离污染源较远、土壤环境类型相似的农田和山坡作为对照样点(图1)。在大约400 m^2 的样方内,以梅花形布点法,用30 mL不锈钢圆筒采样器采20份土样,混匀后取约3 000 g,再分成两份,分别用于纤毛虫的培养和重金属Pb、Zn含量的测定。采样时测土壤温度、湿度和pH值^[15]。

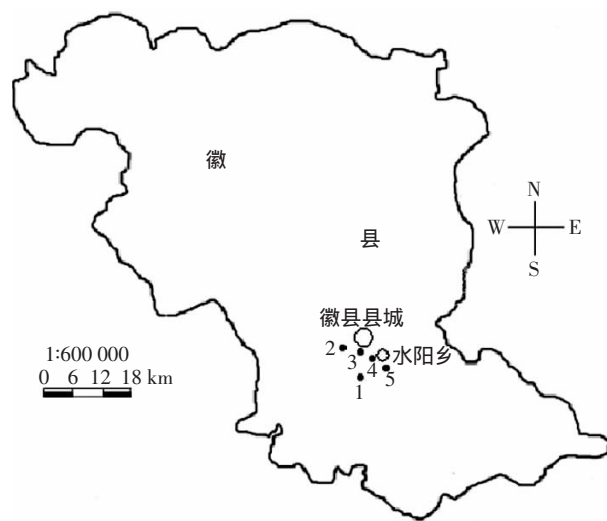


图1 采样点分布

Figure 1 Sampling sites of soil ciliates

1# :对照 1 ,为距离厂区约 4 km 的山坡地 ,主要农作物有小麦、玉米和黄豆 2# :对照 2 ,位于县城西面的西山 ,为自然环境较好的风景区 ,是半自然灌木林地 ,距离县城约 3 km 3# :县城 ,位于县城西南侧的水阳江畔 ,以农田为主的山坡地 4# :厂区 ,位于徽县铅锌冶炼厂围墙旁边的农田 ,主要农作物有小麦、玉米、黄豆和蔬菜 ,是污染源核心区 ,距离县城约 2 km ; 5# :牟坝村 ,为距离污染源核心区约 3 km 的农田 ,主要农作物有小麦、玉米和黄豆。

2.2 室内工作方法

2.2.1 土样风干

土样带回实验室后 ,倒入白瓷盘中自然风干。土壤风干过程中 ,紧闭门窗 ,用消毒纱布和透气性草纸覆盖在瓷盘上 ,以防止空气中的原生动物孢囊进入土样中^[16]。

2.2.2 重金属 Pb、Zn 含量的测定

先称取适量土样置于干燥箱中 ,设定在 120 ℃下烘干 ,测得含水量 ,经自然风干后的土样 ,按照测定金属含量的要求研磨过筛 ,在干燥箱中烘至恒重 ,每个样各取 20 g ,用于 Pb、Zn 含量的测定(测定工作由黄河上游水环境监测中心完成 ,分析仪器采用美国 TE 公司上海分公司生产的原子吸收分光光度计 ,型号为 AAnaLyHt 400)。

2.2.3 定性方法

采用“非淹没培养皿法”培养土壤纤毛虫 ,在培养后的第 2、4、7、11、20、28 d 置于光学显微镜下鉴定物种^[15-17] ,同时记录每个物种的个体数量。每份土样重复培养若干次 ,直到未检出新见物种为止。鉴定技术包括活体观察和染色制片^[18-20] ,物种鉴定和分类依据文献^{[21]~[32]}。

2.2.4 定量方法

采用“3 级 10 倍稀释法”^[15]。

2.2.5 优势类群和罕见类群的划分

对鉴定到的各级分类单元及物种进行统计 ,将纤毛虫物种最多的 2 个目(order)定义为优势类群 ,将物种次多的 2 个目定义为次优势类群 ,将单种的目定义为罕见类群^[33]。

2.2.6 物种多样性

采用 Gleason-Margalef 多样性指数公式 $d=(S-1)/\ln N$,计算各样点物种多样性指数。式中 d 为多样性指数 S 为种类数 N 为个体总数。计算结果 d 值大于 3.0 时为清洁 d 值在 2.9 以下时表示环境受到不同程度的污染^[34]。

2.2.7 群落相似性

根据 Jaccard 共同系数公式 $q=c/(a+b-c)$,计算纤毛虫群落相似性系数 ,式中 q 为相似性系数 a 为污染土壤中纤毛虫物种数 b 为对照土壤中纤毛虫物种数 c 为二者共同物种数。 q 值在 0.75~1.0 范围为极为相似 ,在 0.50~0.75 范围为中等相似 ,在 0.25~0.50 范围为中等不相似 ,在 0~0.25 范围为极不相似^[35]。

2.2.8 统计与分析

文中数据均运用 Excel 表格和 SPSS11.5 进行统计分析。

3 结果及分析

3.1 土壤理化因子

按照国家标准方法和质量控制要求(GB 15618—1995)以及行业标准 HJ/T 166—2004 的规定^[36] ,测定各样点土壤中重金属 Pb 和 Zn 的含量。结果见表 1。

表 1 各样点土壤中的主要理化因子

Table 1 The main physical and chemical factors in the soil of different sampling sites

样点	海拔/m	植被	土温/℃	湿度/%	pH 值	含 Pb 量/ mg·kg ⁻¹	含 Zn 量/ mg·kg ⁻¹
对照 1	1 050	农田	6.7	30	7.0	211.0	48.4
对照 2	1 000	半自然 混交林	6.5	28	7.0	182.0	46.8
县城	950	草坡	6.3	54	7.1	427.0	166.0
牟坝	950	农田	5.5	60	7.2	434.0	392.0
厂区	950	农田	7.0	40	7.2	490.0	1 194.0

注 表中土温、湿度、pH 值均为测量 3~5 次的平均值。

从表中的数据可以看出厂区样点土壤中 Pb、Zn 含量最高 ,牟坝、县城样点次之 ,这 3 个样点土壤中 Pb、Zn 含量都高于对照 1 和对照 2。

用 SPSS11.5 软件对各样点的土温、土壤湿度和 pH 值分别进行差异性分析 ,结果表明 ,在 $P<0.01$ 水平上 ,各样点的土温无显著性差异 ,对照样点(1#、2#)与县城和牟坝样点的土壤湿度有显著性差异 ;对照(1#、2#)与厂区样点的 pH 值有显著性差异。县城和牟坝样点距离河流较近 ,地势平坦 ,土壤持水能力较强 ,因而湿度大 ,厂区样点为铅锌污染的核心区 ,受铅锌污染最严重 ,因而 pH 值有所升高。

3.2 土壤纤毛虫物种及分布

通过定性研究 ,共鉴定到土壤纤毛虫 75 种(包括 9 个未定名种和 3 个国内新记录种) ,隶属于 3 纲 11

目 30 科 41 属,其中对照 1、对照 2、县城、牟坝和厂种。由此可以看出,从对照到厂区,随着污染程度的加重,土壤纤毛虫物种数有明显减少的趋势(表 2)。

表 2 各样点土壤中纤毛虫群落的物种及其相对数量

Table 2 Species list and relative abundance of soil ciliates in the different sampling sites

种类	相对数量				
	对照 1	对照 2	县城	牟坝	厂区
齿脊肾形虫 <i>Colpoda steini</i>	++	++	+	+++	++
膨胀肾形虫 <i>Colpoda inflata</i>	+	+		++	
背沟肾形虫 <i>Colpoda henneguyi</i>	++	+++		+	
土壤肾形虫 <i>Colpoda edaphoni</i>	+				
粗糙肾形虫 <i>Colpoda aspera</i>	+			+	
盘状肾形虫 <i>Colpoda patella</i>				+	
僧帽肾形虫 <i>Colpoda cucullus</i>		+		++	
大斯拉虫 <i>Tillina magna</i>	+				
贪食匙口虫 <i>Platyophrya vorax</i>	++	+++		+	
狭匙口虫 <i>Platyophrya angusta</i>	++	++			
项沫匙口虫 <i>Platyophrya spumacola</i>	+	+			
大篮环虫 <i>Cyrtolophosis major</i>	+	+	+	+	+
胃形斜口虫 <i>Enchelys gasterosteus</i>	++				
亮刀口虫 <i>Spathidium lucidum</i>	+				
苔藓刀口虫 <i>Spathidium musicola</i>	+	+		+	
刀刀口虫 <i>Spathidium spathula</i>			+	+	
尾刀口虫 <i>Spathidium caudatum</i>		+			
刀口虫一种 <i>Spathidium</i> sp. ◆				+	
美洲长颈虫 <i>Dileptus americanus</i>		+			
陆生拟裸口虫 <i>Pseudoholophrya terricola</i>		+	+		
裸口虫一种 <i>Holophrya</i> sp. ◆		+			
薄漫游虫 <i>Litonotus lamella</i>		+			
扭曲管叶虫 <i>Trachelophyllum sigmoides</i>	+				
智利管叶虫 <i>Trachelophyllum chilense</i>			+	+	+
帽斜管虫 <i>Chilodonella capucina</i>	+	+			
巴维利亚斜管虫 <i>Chilodonella bavariensis</i>			+	+	+
恼斜板虫 <i>Plagiocampa difficilis</i>	++	+		+	+
珍珠映毛虫 <i>Cinetichilum margaritaceum</i>	+				
活泼拟小胸虫 <i>Pseudomicrothorax agilis</i> ▲	+				
纺锤康纤虫 <i>Cohnilembus fusiformis</i>	++	++			
蝶形康纤虫 <i>Cohnilembus vexillarius</i>	+				
水藓薄咽虫 <i>Leptopharynx sphagnetorum</i>	+++	+++		+	++
大口薄咽虫 <i>Leptopharynx eurystoma</i>	++	++		++	
喉篮口虫 <i>Nassula gutturata</i> ▲					++
绣花篮口虫 <i>Nassula picta</i>		++		+	
凹扁前口虫 <i>Frontonia depressa</i>	+				
吻四膜虫 <i>Tetrahymena rostrata</i>	+				
瞬目膜袋虫 <i>Cyclidium glaucoma</i>	+++				
善变膜袋虫 <i>Cyclidium versatile</i>	++	+++			+
土生膜袋虫 <i>Cyclidium terricola</i>	+				
苔藓膜袋虫 <i>Cyclidium musicola</i>		+			
水藓单镰虫 <i>Drepanomonas sphagni</i>					+

续表 2

种类	相对数量				
	对照 1	对照 2	县城	牟坝	厂区
旋转单镰虫 <i>Drepanomonas revoluta</i>		+			
椭圆斜头虫 <i>Loxocephalus ellipticus</i> ▲	+	+		+	
卵形嗜腐虫 <i>Sathrophilus oviformis</i>	+				
苔藓嗜腐虫 <i>Sathrophilus muscorum</i>		+			+
刚毛胃纤虫 <i>Homalogastra setosa</i>	+++	+++	++	++	++
大弹跳虫 <i>Halteria grandinella</i>	+	++	+++	+++	+++
梅氏扁豆虫 <i>Phacodinium metchnikoffi</i>	+				
单核赭虫 <i>Blepharisma steini</i>	+				
赭虫一种 1 <i>Blepharisma</i> sp1. ◆		+			
赭虫一种 2 <i>Blepharisma</i> sp2. ◆		+			
杯钟虫 <i>Vorticella cupifera</i>	+				
小口钟虫 <i>Vorticella microstoma</i>		+			
恩氏虫一种 <i>Engelmanniella</i> sp. ◆					+
绿尾枝虫 <i>Urostyla viridis</i>		+		+	
衣鱼瘦尾虫 <i>Uroleptus lepisma</i>	++				
尾瘦尾虫 <i>Uroleptus caudatus</i>		+	+		
乙状全列虫 <i>Holosticha sigmoidea</i>		+	+	++	++
海氏拟卡氏虫 <i>Parakahliella haideri</i>			+		
苔藓尖毛虫 <i>Oxytich muscorum</i>	+		++		++
伪尖毛虫 <i>Oxytich fallax</i>					+
刚毛尖毛虫 <i>Oxytich setigera</i>			+	+	
小尖毛虫 <i>Oxytich minor</i>				+	
尖毛虫一种 1 <i>Oxytich</i> sp1. ◆	+				
尖毛虫一种 2 <i>Oxytich</i> sp2. ◆		++			
似织毛虫 <i>Histiculus similes</i>	+			+++	
苔藓织毛虫 <i>Histiculus muscorum</i>		+++			+
阔柱片尾虫 <i>Urosoma macrostyla</i>	++				
尖锐片尾虫 <i>Urosoma acuminata</i>				+	
片尾虫一种 <i>Urosoma</i> sp. ◆	+	+			
似片尾虫一种 <i>Urosomoida</i> sp. ◆		+	+		
赫奕宽口虫 <i>Steinia candens</i>				+	
近亲殖口虫 <i>Gonostomum affine</i>	+++	++	++	++	
粘游仆虫 <i>Euplotes muscicola</i>	++	++	++		
总计(Total)	42 种	39 种	16 种	28 种	17 种

注 :+、++、+++ 表示相对数量,数量级差分别为 10、100、1 000,即偶见种、常见种和优势种。

◆表示未定名种,▲表示国内土壤纤毛虫新记录种(◆Unamed species,▲New record species of soil ciliates in China)。

3.3 土壤纤毛虫物种多样性

计算的结果是:对照 1、对照 2、县城、牟坝和厂区各样点土壤中纤毛虫物种多样性指数分别为 4.76、4.28、2.05、3.28 和 2.15,即距离污染源核心区越近,土壤中纤毛虫群落中物种多样性显著下降(见图 2)。分别以土壤中的 Pb 含量、Zn 含量、湿度和 pH 值为自变量,以各样点土壤纤毛虫的物种多样性指数为因变量,做单因素线性回归分析(各样点的土温无显著性

差异)结果表明,土壤纤毛虫的物种多样性指数与土壤中主要污染物 Pb 的浓度具有显著的负相关关系($R^2=0.820$ $P=0.034$),与 Zn 的浓度无显著相关性($R^2=0.394$ $P=0.257$),与土壤湿度($R^2=0.405$ $P=0.248$)和 pH 值($R^2=0.545$ $P=0.154$)也无明显相关性。

3.4 群落结构

徽县水阳乡铅锌污染农业区土壤纤毛虫群落结构见表 3 和表 4。

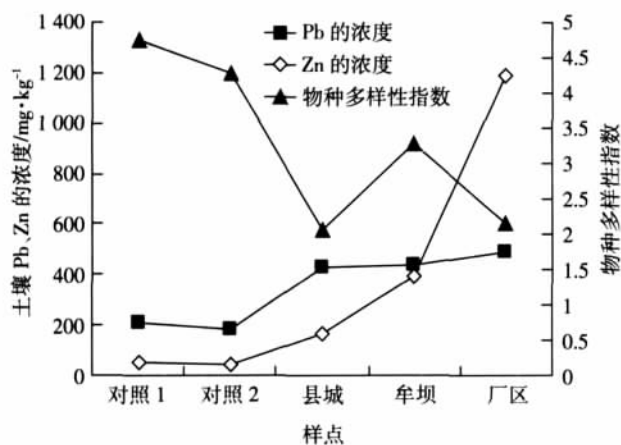


图2 土壤 Pb、Zn 浓度和纤毛虫物种多样性指数

Figure 2 The concentration of lead and zinc in soil samples and ciliates species diversity index

由表 3 中可以看出,在徽县水阳乡铅锌污染农业区土壤纤毛虫群落中,优势类群为下毛目,优势度为 28%;次优势类群为肾形目、前口目和盾纤目,优势度为 16%、16%和 14.67%;罕见类群为侧口目和寡毛目。

由表 4 中可以看出,在对照 1 中,优势类群为肾形目和盾纤目,优势度分别为 23.81%和 21.43%;次优势类群为下毛目和前口目,优势度分别为 19.05%和 11.91%。对照 2 的优势类群为下毛目和肾形目,优势度分别为 23.08%和 20.51%;次优势类群为盾纤目和前口目,优势度均为 15.39%,二者的土壤环境差别是,对照 1 为农田,对照 2 为自然环境,即受人类干扰程度差异不同所产生的结果。县城样点的优势类群为下毛目,优势度为 50%;次优势类群为前口目和肾形目,优势度分别为 18.75%和 12.50%。牟坝样点的优

势类群为下毛目和肾形目,优势度均为 28.57%;次优势类群为前口目和篮口目,优势度分别为 17.86%和 10.72%。厂区样点的优势类群为下毛目,优势度为 29.40%;次优势类群为盾纤目和篮口目,优势度均为 17.65%。结果显示,受污染较重的土壤与对照土壤中纤毛虫群落结构相比较,前者土壤中肾形目和盾纤目的优势度下降,下毛目和篮口目的优势度显著增加;侧口目、膜口目、缘毛目和异毛目的种类消失。结果表明下毛目的种类对铅、锌污染的耐受性较强。

受污严重的厂区、县城和牟坝样区土壤中的优势种为大弹跳虫、齿脊肾形虫、似织毛虫,对照 2 的优势种为贪食匙口虫、刚毛胃纤虫、水藓薄咽虫、善变膜袋虫。对照 1 的优势种为刚毛胃纤虫、水藓薄咽虫、近亲殖口虫、瞬目膜袋虫。结果表明,大弹跳虫、齿脊肾形虫和似织毛虫是铅、锌等重金属污染的土壤环境中的耐污种。

3.5 群落相似性

对照 2 和对照 1 与县城和厂区相比较,纤毛虫群落相似性系数在 0.14~0.22 之间(见表 5),为极不相似。这显然是与土壤环境受铅、锌等重金属的污染有关。

4 讨论

(1)物种多样性方面。受铅、锌污染的土壤环境与对照相比较,其纤毛虫群落中物种多样性明显下降。主要表现在:①物种数减少。共有土壤纤毛虫 75 种,其中对照 1、对照 2、牟坝、厂区和县城样点中分别有纤毛虫 42、39、28、17、16 种。由此可以看出,从对照到厂区,随着污染程度的加重,土壤纤毛虫的物种数

表 3 土壤纤毛虫群落结构

Table 3 Community structure of soil ciliates

门	纲	目	科	属	种	优势度/%
纤毛门 Ciliophora	动基片纲 Kinetofragminophorea	前口目 Prostomatida	6	7	12	16.00
		侧口目 Pleurostomatida	1	1	1	1.33
		肾形目 Colpodida	3	4	12	16.00
		篮口目 Nassulida	2	4	7	9.33
		管口目 Cyrtophorida	1	1	2	2.67
	寡膜纲 Oligohymenophorea	膜口目 Hymenostomatida	2	2	2	2.67
		盾纤目 Scuticociliatida	5	6	11	14.67
		缘毛目 Peritrichida	1	1	2	2.67
	多膜纲 Polyhymenophorea	异毛目 Heterotrichida	2	2	4	5.33
		寡毛目 Oligotrichida	1	1	1	1.33
		下毛目 Hypotrichida	6	12	21	28.00
1 门	3 纲	11 目	30 科	41 属	75 种	100.00

表 4 各样点土壤纤毛虫群落结构比较

Table 4 Community structure of soil ciliates in the different sampling sites

土壤纤毛虫	对照 1		对照 2		县城		牟坝		厂区	
	种数	优势度/%	种数	优势度/%	种数	优势度/%	种数	优势度/%	种数	优势度/%
动基片纲	19	45.24	20	51.28	6	37.50	17	60.72	8	47.07
前口目	5	11.91	6	15.39	3	18.75	5	17.86	2	11.77
侧口目	—	—	1	2.56	—	—	—	—	—	—
肾形目	10	23.81	8	20.51	2	12.50	8	28.57	2	11.77
篮口目	3	7.14	4	10.26	—	—	3	10.72	3	17.65
管口目	1	2.38	1	2.56	1	6.25	1	3.57	1	5.88
寡膜纲	12	28.57	7	17.95	1	6.25	2	7.14	3	17.65
膜口目	2	4.76	—	—	—	—	—	—	—	—
盾纤目	9	21.43	6	15.39	1	6.25	2	7.14	3	17.65
缘毛目	1	2.38	1	2.56	—	—	—	—	—	—
多膜纲	11	26.19	12	30.77	9	56.25	9	32.14	6	35.28
异毛目	2	4.76	2	5.13	—	—	—	—	—	—
寡毛目	1	2.38	1	2.56	1	6.25	1	3.57	1	5.88
下毛目	8	19.05	9	23.08	8	50	8	28.57	5	29.40
总计	42	100	39	100	16	100	28	100	17	100

表 5 各样点土壤中纤毛虫群落的相似性系数

Table 5 Similarity index among the ciliates communities in the different sampling sites

样点	对照 1	对照 2	县城	牟坝	厂区
对照 1	1.00	0.33	0.14	0.27	0.16
对照 2		1.00	0.22	0.31	0.22
县城			1.00	0.29	0.32
牟坝				1.00	0.25
厂区					1.00

有明显减少的趋势,这一结果与文献报道的结论相一致^[4,11,13]。受铅、锌污染严重的土壤中,优势种为大弹跳虫、齿脊肾形虫、似织毛虫,这些物种是否可以作为对铅、锌污染土壤环境的指示种类和监测性物种还有待进一步研究工作验证。②物种多样性指数降低。对照 1、对照 2、县城、牟坝和厂区各样点土壤中纤毛虫物种多样性指数分别为 4.76、4.28、2.05、3.28 和 2.15。结果表明,距离污染源核心区越近,土壤中纤毛虫群落的物种多样性越小,主要污染物铅的浓度与多样性指数变化趋势呈显著负相关,锌的浓度及土壤其他理化因子与多样性指数的相关性不明显。这一结果与邓继福等对重金属污染土壤动物群落的研究结果趋势相似^[37]。结果显示受人类干扰的环境与自然环境相比较,土壤中的纤毛虫物种多样性有显著的降低^[3]。对照 2(为半自然风景区,距离厂区约 5 km,游客较多)虽距离铅锌污染核心区较远,但由于是风景区,受到

游客的干扰较多,因而多样性指数小于对照 1(为农田,距离厂区约 4 km);县城样点虽然不是铅锌污染的核心区,但是距离厂区约 2 km(牟坝距离厂区约 3 km),由于铅锌冶炼厂烟囱散发出来的粉尘微粒随风飘逸,粉尘微粒越小,迁移的距离越远,粉尘微粒越细,对环境和生物的影响亦越大;又因为县城样点靠近人口密度高的城市居民生活区(约 1 km),受人类生活干扰大,加之距离公路很近,机动车辆的干扰在所难免。综合上述种种因素,该样区属于无机-有机综合污染区,故纤毛虫物种多样性低于厂区和牟坝样点;在牟坝样点,土壤铅、锌含量比厂区样点有所下降,牟坝与县城样点相比,铅含量接近,锌含量更高,但由于远离城区和公路,受其他的干扰少,因此多样性指数比县城样点有所上升。

物种多样性指数的高低直接反映了生物群落结构的复杂程度和稳定性大小,也间接反映了生态环境质量的优劣^[38]。厂区和县城样点土壤中纤毛虫物种多样性指数的降低,表明纤毛虫群落结构稳定性下降,同时也间接反映出这两个样点区域土壤生态环境质量有所下降。铅锌污染破坏了土壤纤毛虫原有的自然生活环境,使一些不适应新环境的敏感物种消失,这一结果与马正学等对兰州市八里镇蔬菜基地春季土壤纤毛虫群落特征的研究结果有相似的趋势^[10]。

(2)群落结构方面。受污染严重样点的土壤与对照相比较,纤毛虫群落特征主要表现在:①受污染较

重的土壤纤毛虫群落中肾形目和盾纤目的优势度下降,下毛目和篮口目的优势度显著增加,侧口目、膜口目、缘毛目和异毛目的种类消失。结果表明,下毛目的种类对铅、锌等重金属污染的耐受性较强。②纤毛虫群落相似性分析结果显示,在受铅、锌污染严重样点的土壤中,纤毛虫群落结构趋于简单化,纤毛虫群落相似性系数均介于0~0.25之间,为极不相似(厂区和县城与对照1和对照2相比较)。结果显示,由于土壤环境铅、锌等重金属污染导致纤毛虫物种多样性和群落结构发生了很大变化,这一结果与马正学等和牛世全等报道的研究结果趋势一致^{[11][13]}。

5 结论

通过对甘肃徽县铅、锌等污染农业区土壤纤毛虫群落特征研究,可以得出以下结论:

(1)徽县铅、锌污染核心区土壤中纤毛虫物种多样性显著下降,群落结构趋于简单化。该地区土壤环境中铅的含量接近国家3级标准($\leq 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),锌的含量则超出3级标准($\leq 500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)约2.4倍。

(2)铅、锌污染导致土壤纤毛虫群落中优势种类发生了显著变化,使得原有的一些敏感物种消失,另一些耐污种类大量繁殖,形成了污染环境下的优势种群。这是污染环境胁迫生物长期适应的必然结果。

(3)在受铅、锌污染的土壤环境中,纤毛虫群落的优势类群为下毛目,次优势类群为肾形目、前口目和盾纤目,侧口目、膜口目、缘毛目和异毛目的种类消失(敏感种),优势种为大弹跳虫、齿脊肾形虫和似织毛虫,敏感种类有贪食匙口虫、水藓薄咽虫、瞬目膜袋虫、背沟肾形虫、苔藓织毛虫。这些物种是否可以作为对铅、锌污染环境的指示种类和监测性物种还有待进一步研究验证。

参考文献:

- [1] 宋雪英,宋玉芳,孙铁珩,等.土壤原生动物对环境污染的生物指示作用[J].应用生态学报,2004,15(10):1979-1982.
SONG Xue-ying, SONG Yu-fang, SUN Tie-heng, et al. Bioindicating function of soil protozoa to environmental pollution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10):1979-1982.
- [2] Foissner W. Soil protozoa: Fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators, and guide to the literature[J]. *Progress in Protistology*, 1987, 2: 169-212.
- [3] Foissner W. Soil protozoa as bioindicators in ecosystems under human influence[C]//Darbyshire J F ed. Soil Protozoa. Wallingford, Oxon: CAB International, 1994:146-187.
- [4] Foissner W. Protozoa as bioindicators in agroecosystem, with emphasis on farming practice, biocides and biodiversity[J]. *Agri Ecos Environ*, 1997, 62: 93-103.
- [5] Campbell C D, Warren A, Cameron C M. Direct toxicity assessment of two soils amended with sewage sludge contaminated with heavy metals using a protozoan(*Colpoda steinii*) bioassay[J]. *Chemosphere*, 1997, 34(3): 501-514.
- [6] Forge T A, Berrow M L, Darbyshire J F, et al. Protozoan bioassays of soil amended with sewage sludge and heavy metals, using the common soil ciliate *Colpoda steinii*[J]. *Biol Fertil Soils*, 1993, 16(4): 282-286.
- [7] Pratt J, Rmochan D, Xu Z. Rapid toxicity estimation using soil ciliates: sensitivity and bioavailability[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 1997, 58: 387-393.
- [8] Silvia Díaz, et al. Evaluation of heavy metal acute toxicity and bioaccumulation in soil ciliated protozoa[J]. *Environment International*, 2006, 32: 711-717.
- [9] Bowers N J, Pratt J R, Beeson D, et al. Comparative evaluation of soil toxicity using lettuce seeds and soil ciliates[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1995, 16: 207-213.
- [10] 马正学,申海香,邹涛,等.兰州八里镇蔬菜基地春季土壤纤毛虫群落特征[J].动物学杂志,2008,43(3):87-93.
MA Zheng-xue, SHEN Hai-xiang, ZOU Tao, et al. Community characteristics of soil ciliates in vegetables base of Bali Town in Lanzhou in spring[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2008, 43(3): 87-93.
- [11] 马正学,龚大洁,宁应之,等.铅锌矿采废物污染对土壤原生动物的影响[J].甘肃科学学报,2002,14(3):53-57.
MA Zheng-xue, GONG Da-jie, NING Ying-zhi, et al. Studies on the effect of soil pollution by waste material of lead and zinc oremining on protozoa[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2002, 14(3): 53-57.
- [12] 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 Wei-song, YANG Jun, YE Zhi-hong, et al. Soil protozoa in wet-land treatment system of Pb-Zn mine in Fankou [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2004, 39(1): 2-11.
- [13] 牛世全,宁应之,马正学,等.重金属复合污染土壤中原生动物的群落特征[J].甘肃科学学报,2002,14(3):44-48.
NIU Shi-quan, NING Ying-zhi, MA Zheng-xue, et al. Studies on the community characteristics of protozoa in the soil with compound pollution of heavy metals[J]. *Journal of Gansu Sciences*, 2002, 14(3): 44-48.
- [14] 中国科学院南京土壤研究所.中国土壤[M].北京:科学出版社,1978:521-535.
Nanjing Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Chinese soil[M]. Beijing: Science Press, 1978: 521-535.
- [15] 土壤动物研究方法手册编写组.土壤动物研究方法手册[M].北京:中国林业出版社,1998:56-57,63-72.
The Writing Group of A Handbook for the Research Methods of Soil Animals. A handbook for the research methods of soil animals[M]. Beijing: Chinese Forestry Publishing House, 1998: 56-57, 63-72.
- [16] 宁应之,沈韞芬.珙珈山森林土壤原生动物生态学研究及土壤原生动物定量方法探讨[J].动物学研究,1996,17(3):225-232.
NING Ying-zhi, SHEN Yun-fen. Ecological studies on the forest soil

- protozoa of mount Luojiashan and exploration of quantitative methods for soil protozoa[J]. *Zool Res*, 1996, 17(3) :225-232.
- [17] Foissner W. Estimating the species richness of soil protozoa using the "non-flooded petridish method"[C]//Lee J J, Soldo A T, eds. *Protocols in Protozoology*. Lawrence :Allen Press, 1992. B-10. -B-10. 2.
- [18] Fernandez-Galiano D. Silver impregnation of ciliated protozoa procedure yielding good results with the pyridinated carbonate method[J]. *Trans Am Microsc Soc*, 1976, 95 :557-560.
- [19] 宋微波, 徐奎栋. 纤毛虫原生动物形态学研究的常用方法[J]. *海洋科学*, 1994, 6 :6-8.
- SONG Wei-bo, XU Kui-dong. Common methods for morphological studies of ciliated protozoa[J]. *Marine Sciences*, 1994, 6 :6-8.
- [20] Wilbert N. Eine verbesserte technik der protargolimpragnation für ciliaten[J]. *Mikrokosmos*, 1975, 6 :171-179.
- [21] 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩, 等. 微生物检测新技术[M]. 北京 :中国建筑工业出版社, 1990 :412-509.
- SHEN Yun-fen, ZHANG Zong-she, GONG Xun-ju, et al. New techniques for microorganisms detection[M]. Beijing :China Building Industry Press, 1990 :412-509.
- [22] 沈韞芬, 刘江, 宋碧玉, 等. 第五章 原生动物[M]//尹文英编著. 中国亚热带土壤动物. 北京 :科学出版社, 1992 :97-156.
- SHEN Yun-fen, LIU Jiang, SONG Bi-yu, et al. Chapter 5. Protozoa[M]//Yin Wen-ying. *Subtropical soil animals of China*. Beijing :Science Press, 1992 :97-156.
- [23] 宁应之, 沈韞芬. 中国土壤原生动物新记录种(纤毛门:寡膜纲)[J]. *动物学杂志*, 1999, 34(6) :2-4.
- NING Ying-zhi, SHEN Yun-fen. Species of protozoa first recorded in chinese soils(Ciliophora)[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 1999, 34(6) :2-4.
- [24] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带29种土壤纤毛虫记述(纤毛门:动基片纲)[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 1999, 35(3) :75-82.
- NING Ying-zhi, SHEN Yun-fen. Records and descriptions of 29 soil ciliates(Ciliophora :Kinetofragminophorea)in typical zones of China[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 1999, 35(3) :75-82.
- [25] 宁应之, 沈韞芬. 中国土壤原生动物新记录种(纤毛门:多膜纲, 下毛目)[C]//中国动物学会. 中国动物科学研究. 北京 :中国林业出版社, 1999 :156-160.
- NING Ying-zhi, SHEN Yun-fen. Species of protozoa first recorded in Chinese soils(Ciliophora :Polyhymenophorea, Hypotrichida)[C]//China Zoological Society. *Zoological studies in China*. Beijing :Chinese Forestry Publishing House, 1999 :156-160.
- [26] 宁应之, 沈韞芬. 土壤原生动物区系特点[M]//尹文英编著. 中国土壤动物. 北京 :科学出版社, 2000 :209-220.
- NING Ying-zhi, SHEN Yun-fen. Faunal characteristics of soil protozoa[M]//Yin Wen-ying. *Soil animals of China*. Beijing :Science Press, 2000 :209-220.
- [27] 宁应之, 沈韞芬. 中国土壤原生动物新记录种(纤毛门:多膜纲, 异毛目)[J]. *动物学杂志*, 2000, 35(1) :2-4.
- NING Ying-zhi, SHEN Yun-fen. New records of protozoa species first recorded in Chinese soils(Ciliophora :Polyhymenophorea, Heterotrichida)[J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2000, 35(1) :2-4.
- [28] 宋微波. 青岛地区土壤纤毛虫区系——动基片纲, 寡膜纲, 肾形纲[J]. *青岛海洋大学学报*, 1994, 24(1) :15-23.
- SONG Wei-bo. Faunistical studies on some soil ciliates from Qingdao——Kinetofragminophora, Oligohymenophora, Colpodea[J]. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1994, 24(1) :15-23.
- [29] Foissner W. Tropical protozoan diversity :30 ciliates species(Protozoa :Ciliophora)in a soil sample from a tropical dry forest of Costa Rica, with description of four new genera and seven new species[J]. *Arch Protistenk*, 1995, 145 :37-79.
- [30] Foissner W. Soil ciliates (Protozoa :Ciliophora)from evergreen rain forests of Australia, South America and Cost Rica :diversity and description of new species[J]. *Biol Fertil Soils*, 1997, 25 :317-339.
- [31] Foissner W. Global soil ciliate(Protozoa :Ciliophora)diversity :a probability-based approach using large sample collectives from Africa, Australia, and Antarctica[J]. *Biodiv Conserv*, 1997, 6 :1627-1638.
- [32] Levine N D, Corliss J O, Cox F E G, et al. A newly revised classification of the protozoa[J]. *Protozool*, 1980, 27 :37-58.
- [33] 宁应之, 王娟, 刘娜, 等. 甘肃天水麦积山风景名胜区土壤纤毛虫的物种多样性[J]. *动物学研究*, 2007, 28(4) :367-373.
- NING Ying-zhi, WANG Juan, LIU Na, et al. Species diversity of soil ciliates in scenic spots and historic sites of Maijishan, Tianshui, Gansu[J]. *Zool Res*, 2007, 28(4) :367-373.
- [34] 中国大百科全书总编辑委员会. 中国大百科全书 :环境科学[M]. 北京 :中国大百科全书出版社, 1983 :317-319.
- Editorial Board of Chinese Encyclopedia. *Chinese Encyclopedia(Environmental science)* [M]. Beijing :Encyclopedia of China Publishing House, 1983 :317-319.
- [35] 杨明宪. 群体生态研究[M]//土壤动物研究方法手册. 北京 :中国林业出版社, 1998 :109-110.
- YANG Ming-xian. *Ecological research on population* [M]//A handbook for the research methods of soil animals, Beijing :Chinese Forestry Publishing House, 1998 :109-110.
- [36] 国家环保总局. HJ/T 166—2004. 土壤环境监测技术规范 [M]. 北京 :中国环境科学出版社, 2004.
- China State Environmental Protection Administration. HJ/T 166—2004. *Technical specification for soil environmental monitoring* [M]. Beijing :China Environmental Science Press, 2004.
- [37] 邓继福, 王振中, 张友梅, 等. 重金属污染对土壤动物群落生态影响的研究[J]. *环境科学*, 2004.
- DENG Ji-fu, WANG Zhen-zhong, ZHANG You-mei, et al. A research on the ecological effect of the soil animals community by the heavy metal pollution[J]. *Environmental Science*, 1996, 17(2) :1-6.
- [38] 宁应之, 沈韞芬. 中国典型地带土壤原生动物群落结构及其特征[J]. *西北师范大学学报 :自然科学版*, 1999, 35(2) :50-54.
- NING Ying-zhi, SHEN Yun-fen. Community structure and its characteristics of soil protozoa in typical zones of China[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 1999, 35(2) :50-54.