

金矿区苔藓结皮表土原生动物群落与环境因子的关系^{*}

杨再超 王智慧 张朝晖^{**}

(贵州师范大学生命科学学院 贵州省山地环境重点实验室, 贵阳 550001)

摘 要 应用群落多样性特征指数和冗余分析法(RDA),对黔西南老万场金矿区苔藓结皮表土原生动物群落与环境因子的关系进行了研究。结果表明:黔西南老万场金矿区矿渣、矿土和矿区周围裸露石灰岩等样地的苔藓结皮表土原生动物群落中种类数为49种,隶属35属28科,大多数种类丰度较低,群落多样性指数和RDA分析表明,金矿区苔藓结皮表土原生动物群落变化受多种环境因子的影响,重金属综合污染、pH是影响原生动物群落特征的主导因子($P < 0.01$),原生动物群落种类丰富度和丰度随重金属综合污染指数的增大而明显降低。通过排序分析表明,在重金属污染的金矿区,化学因子比物理因子对原生动物群落的影响更明显。

关键词 原生动物群落;冗余分析;环境因子;苔藓结皮;金矿

中图分类号 Q142.8 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2009)08-1525-06

Protozoa communities in moss crust in gold mine area of southwest Guizhou and their relations with environmental factors. YANG Zai-chao, WANG Zhi-hui, ZHANG Zhao-hui (Guizhou Provincial Laboratory for Mountainous Environment, School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China). *Chinese Journal of Ecology* 2009 28(8):1525-1530.

Abstract: By using community diversity index and redundancy analysis (RDA), the protozoa communities in the moss crust in Laowangchang gold mine area of southwest Guizhou and their relations with environmental factors were studied. A total of 49 species belonging to 35 genera and 28 families were identified, most of which had low abundance. The variations of the protozoa communities were affected by various kinds of environmental factors, among which, heavy metals pollution and pH were the dominant factors ($P < 0.01$). The species richness and abundance of the protozoa communities declined with the aggravation of heavy metals pollution, and the effects of chemical factors were more obvious than those of physical factors.

Key words: protozoa community; redundancy analysis; environmental factor; moss crust; gold mine.

苔藓结皮表土原生动物群落是生活在干旱环境中以苔藓结皮为主的微生境中的原生动物。矿区生物结皮的优势类群主要为苔藓植物,而苔藓结皮的出现对矿区生态环境荒漠化的逆转扮演了重要的角色(苏延桂等 2007)。原生动物群落对环境的变化就其他动物而言敏感性更高,并且在土壤微生态系

统中担当了重要的生态功能角色,包括土壤营养物质循环、动植物健康维持、土壤肥力和环境污染的指示作用等(Todorov 2002;宋雪英等 2004;Marianne, 2005)。在以苔藓植物为主的微生境中,苔藓植物不仅为原生动物提供了栖息地,而且在营养来源上也给予了保证(冯伟松和余育和,2000;Foissner, 2000;Mieczan 2007)。传统上原生动物作为淡水生态系统污染程度的指标,而在土壤中原生动物同样可作为土壤特性与污染的指标(高云超等 2000)。Foissner(1987)研究表明,原生动物和水分含量相关。土壤重金属污染与危害是当前人类所面临的重

^{*} 国家自然科学基金项目(30860025)、贵州省优秀青年科技人才计划项目[(2005)0514]、国家人力资源和社会保障部留学人员优秀项目[人社厅发(2008)86]和贵州省科技厅科学技术基金[黔科合J字(2009)2033号]。

^{**} 通讯作者 E-mail: academiclife@126.com

收稿日期:2008-11-17 接受日期:2009-04-01

要环境问题之一。由于重金属污染可产生积累的、不可逆的、长期性的严重后果,在自然生态系统中可在生物体内积累和转化,因而给人类和动物带来了潜在的长期威胁(王宏镔等 2005)。在矿产资源的开采和冶炼过程中,产生大量的重金属污染,其毒害作用对生物参与土壤的生物过程及其生物群落结构有明显的影响(Ferisk *et al.* 2003;冯伟松等 2004;Becker *et al.* 2006)。以前报道重金属污染与生物群落结构的关系仅基于一些较大型的生物上,而对污染物更为敏感的微型生物研究较少(Morgan *et al.* 1986;孙贤斌等 2005;李勤奋等 2006)。本文应用冗余分析(RDA)和群落学的多样性特征指数,研究了黔西南老万场金矿区优势类群苔藓植物结皮表土中的原生动物群落结构特征以及与结皮厚度、土壤湿度、pH、毒性金属污染因子的关系,旨在通过苔藓结皮表土原生动物群落对环境变化的重要指示作用,反映土壤生物学效应,为土壤环境质量的原生动物群落评价体系和矿区生态系统的修复提供科学资料。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

黔西南晴隆县老万场金矿区(25°38'N,105°11'E),海拔 1350~1450 m,属温凉湿润的高原亚热带季风气候。年均日照数 1462 h,年均气温 14.6℃,极端最高气温 33.4℃,极端最低气温为-6.3℃。年均降水量在 1050~1650 mm,降水的时空分布不均,多集中在 5—10 月,约占年降水量的 82%(江洪和张朝晖 2007)。老万场金矿床是喀斯特地区大型的红色黏土型金矿床,自从 1992 年该矿床发现开采以来,造成了植被极度下降,开采区内除了苔藓植物和一些稀疏的草丛外,几乎无其他高等植物在其上生长。研究样地内苔藓植物总盖度约达 60%,以矮丛集型为主,主要的优势苔藓植物类群为土生对齿藓(*Didymodon vinealis*)、小反纽藓(*Timmiella diminuta*)和芽孢银藓(*Anomobryum gemmigerum*)。并且在开采时刨走矿土后,出露了该地区典型的喀斯特石山,石漠化扩展加速,由于还是重金属污染区,使得该区成为我国金三角地区生态环境问题较为突出的矿区之一。

1.2 样品采集与处理

1.2.1 野外工作 2007 年 7 月下旬对研究样地上的不同苔藓植物结皮表土进行原生动物群落取样

表 1 老万场金矿区样地特征
Tab. 1 Characteristics of sampling sites from Laowangchang Gold Deposit

样地类型	编号	苔藓植物种类	结皮厚度 (mm)	pH	土壤湿度 (%)
矿渣	S1	土生对齿藓、芽孢银藓(伴生)	2.0	5.6	17
	S2		2.1	5.6	22
	S3		2.0	5.5	19
矿土	M1	芽孢银藓、土生对齿藓	2.5	6.1	27
	M2		2.4	6.0	32
	M3		2.5	6.1	24
	M4		2.5	6.1	24
裸露石	L1	小反纽藓	1.0	5.5	9
灰岩	L2		1.0	5.5	5
	L3		1.0	5.5	11

(表 1),采用 5 m×5 m 的样地,每个样地设 3~4 个重复的调查样方,在每个调查样方按 5 点取样法设 10 cm×10 cm 小样方取样,共采集用于提取原生动物和元素分析的苔藓结皮表土标本和样品 49 份并分别装入 19 cm×13 cm 封闭式聚丙烯塑料袋,带回实验室备用,同时测量苔藓结皮厚度、土壤湿度和 pH。

1.2.2 室内工作 1)原生动物群落的鉴定和计数。样品袋于实验室内放在白瓷盘上敞开并覆盖上纱布,自然风干。然后取每个样地调查样方的混合苔藓结皮表土约 10 g 分别放入灭菌的有盖培养皿中,注入蒸馏水使结皮土壤充分湿润但不淹没,在室温下进行培养。培养后第 4、7、11、20 和 28 天利用相差显微镜、倒置显微镜等进行镜检(宁应之和沈韞芬,1996;冯伟松和余育和,2000;王智慧等,2007)鉴定原生动物群落种类;定量方法采用 3 级 10 倍稀释法(Stout,1962)。

2)结皮表土的处理及元素测定。取每个样地的结皮表土适量,磨碎。然后置于滤纸中,在 101A 型干燥箱内烘干 48 h,温度保持在 60℃以下(防止 Hg 挥发)。烘干后分别研磨,过 80 目筛,后存于 11 cm×8 cm 封闭式聚丙烯塑料袋中备用。

利用 AL204 型电子天平称取每份结皮表土粉末约 0.5~1.0 g,同时设一平行样和一空白对照样。分别置于 50 ml 已编号的三角瓶中,先后加入 15 ml HNO₃-HClO₄ 混酸,于 KR 可调电热板上硝化至白烟逸尽为止。取下冷却,用 0.5% HNO₃ 少许微热熔解,然后转移至 50 ml 容量瓶中用 0.5% HNO₃ 定容待上机用。

Cr 的样品处理时,称取结皮表土 1.0 g 置于 50

ml 编好号的三角瓶中 ,加入少许去离子水润湿 ,加入 10 ml HNO₃-H₂SO₄ ,于 KR 可调电热板上加热硝化冒白烟 ,土壤颗粒变白 ,取下冷却 ,用 1% HCl 温热溶解 ,加入 5 ml 10% NH₄Cl 转移至 50 ml 容量瓶中并用 1% HCl 定容 ,备用。Hg 的样品处理时 ,称取结皮表土 0.2 ~0.5 g 置于 50 ml 比色管中 ,加入 10 ml 王水-水混合溶液(1:1) ,于沸水水浴 2 h ,冷却 ,加入 5 ml 10% 硫脲 ,用蒸馏水定容至 50 ml ,备用。利用 Analyst 800 原子吸收光谱仪(美国 Perkin Elmer) ,分别将制定好的样品上机进行元素测定。其中 Zn、Cr 元素使用火焰法测定 ,Cu、Pb、Cd 元素使用石墨炉法测定 ,Hg、As 元素使用冷原子吸收法测定。

1.3 数据处理

1)采样点综合污染指数采用尼梅罗(Nemerow)指数计算(刘凤枝 2001) ,计算式为 :

$$P = \sqrt{\frac{(C_i/S_i)_{avr} + (C_i/S_i)_{max}^2}{2}}$$

式中 :P 为土壤综合污染指数 ;C_i 为第 i 种污染物的实测浓度 ;S_i 为第 i 种污染物的背景值。S_i 背景值参考土壤环境质量标准(GB 15618-1995) 二级旱地标准中各元素含量上限确定(夏家淇 ,1996) , (C_i/S_i)_{avr} 为土壤各单因子污染指数的平均值 , (C_i/S_i)_{max} 为各单因子环境质量指数中的最大值。

2)原生动物群落物种多样性指数、丰富度指数、均匀度指数计算公式如下(董炜华和殷秀琴 , 2005) :

Shannon-Weiner 多样性指数为 :

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

Simpson 多样性指数为 :

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

Margalef 丰富度指数为 :

$$d = (S - 1) / \ln N$$

Pielou 均匀度指数为 :

$$J = H' / \ln S$$

式中 :P_i 是物种 i 的相对重要值 ,即 P_i = n_i/N n_i 是物种 i 的个体数 ,N 是所有物种个体数之和 ;S 为物种数。

采用 CANOCO 4.5 软件对 10 个样地的原生动物群落和环境因子数据进行冗余分析(RDA) ,它是一种直接梯度分析方法 ,是基于统计学的角度评价

表 2 老万场金矿区苔藓结皮表土原生动物群落种类名录
Tab.2 Species catalogue of protozoa communities in moss crust topsoil from Laowangchang Gold Deposit

种 名	学名缩略词	出现样点名称
气球屋滴 Oikomonas termo	Oik. ter	S1 ,M1
小眼屋滴虫 O. ocellata	Oik. oce	S1 ,S2 ,S3 ,M1
变形滴虫 Monas amoebina	Mon. amo	S1 ,S2 ,S3 ,M1 ,M2 ,M3 ,M4
内卷瓣胞藻 Petalomonas involuta	Pet. inv	S1 ,S2 ,S3 ,M1
微小瓣胞藻 P. pusilla	Pet. pus	M1 ,M2 ,M3
右旋异鞭藻 Anisonema desiotaxum	Ani. des	S1
长尾尾滴虫 Cercomonas longicauda	Cer. lon	M3 ,L1
慢行波豆虫 Bodo repens	Bod. rep	S3
球形波豆虫 B. globosus	Bod. glo	S3
腐波豆虫 B. putrinus	Bod. put	S1 ,M4 ,L1 ,L2
梨波豆虫 B. edax	Bod. eda	L1 ,L3
狭隘波豆虫 B. angustus	Bod. ang	L1
蠕形哈氏虫 Hartmanella vermiformis	Har. ver	M3
近蛭螭卡变虫 Cashia limacoides	Cas. lim	S3
四线甲变形虫 Thecamoeba quadrilineata	The. qua	L3
平足蒲变虫 Vannella platypodia	Van. pla	S1 ,S2 ,S3 ,L2 ,L3
奇怪蒲变虫 V. miroides	Van. mir	M3
象鼻颤变虫 Oscillosignum proboscidium	Osc. pro	S2
盘状表壳虫 Arcella discoides	Arc. dis	M4 ,L3
表壳圆壳虫 Cyclopyxis arcelloides	Cyc. arc	S1
球形砂壳虫 Diffugia globulosa	Dif. glo	M2
结节鳞壳虫 Euglypha tuberculata	Eug. tub	S1 ,S2 ,S3 ,M1
矛状鳞壳虫 E. laevis	Eug. lae	S2 ,S3 ,M1
线条三足虫 Trinema lineare	Tri. lin	S2 ,S3 ,L1
放射太阳虫 Actinophrys sol	Act. sol	S2
智利管叶虫 Trachelophyllum chilense	Tra. chi	S2 ,M1 ,M2 ,M3 ,M4
刀刀口虫 Spathidium spathula	Spa. spa	S1
膨胀肾形虫 Colpoda inflata	Col. inf	S1 ,S2 ,S3
肾状肾形虫 C. reniformis	Col. ren	S1 ,M1 ,M3
僧帽肾形虫 C. cucullus	Col. cuc	S2
似肾形虫 C. simulans	Col. sim	M1 ,M2 ,L3
沫顶匙口虫 Platyophrya spumacola	Pla. spu	S1 ,M2 ,M3 ,L1 ,L2 ,L3
丛林拟蓝环虫 Pseudocryptolophosis alpestris	Pse. alp	S1 ,S2 ,S3
薄咽虫 Leptopharynx sp.	Lep. sp	S1 ,S2 ,S3 ,M2 ,M3 ,M4
钩刺斜管虫 Chilodonella uncinata	Chi. unc	S3
弯豆形虫 Colpidium campylum	Colp. cam	S1 ,M1 ,M2 ,M3 ,M4
苔藓嗜腐虫 Sathrophilus muscorum	Sat. mus	S1 ,S2
瓜形膜袋虫 Cyclidium citrullus	Cyc. cit	S1 ,M3 ,L2 ,L3
颗粒膜袋虫 C. granulosum	Cyc. gra	S3 ,M1 ,M4 ,L1
银灰膜袋虫 C. glaucoma	Cyc. gla	M1 ,M2
小口钟虫 Vorticella microstoma	Vor. mic	M4
大弹跳虫 Halteria grandinella	Hal. gra	S1 ,S2 ,S3 ,M1 ,M3 ,M4
尾枝虫 Paraurostyla sp.	Par. sp	M1 ,M3 ,M4
角毛虫 Keronopsis sp.	Ker. sp	S1 ,S2 ,S3
伪尖毛虫 Oxytricha fallax	Oxy. fal	S3
贪食后毛虫 Opisthotricha euglenivora	Opi. eug	S1 ,M4 ,L1 ,L2 ,L3
似后毛虫 O. similis	Opi. sim	M1
膜状急纤虫 Tachysoma pellionella	Tac. pel	S1 ,S2 ,S3 ,M1
粘游仆虫 Euplotes muscicola	Eup. mus	S1 ,S2 ,S3 ,M2

一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系 (Borcard *et al.* ,1992 ;Ter Braak & Smilauer 2002)。本研究中只在 1 个样地出现的群落 ,数据分析时将被剔除 ,并在分析时对群落数据进行对数转化 ,以减少优势群落的权重。RDA 分析时将原生动物种群中的物种丰度作为响应变量组 ,解释变量为结皮厚度、pH、土壤湿度和重金属综合污染指数(*P*)等 4 个变量。先对所有变量的显著性用 999 次的蒙特卡罗检验来考察 ,之后用剩余变量来分析影响原生动物种群变化的权重。

2 结果与分析

2.1 原生动物种群物种组成多样性特征

经初步鉴定分析 , β 类样地原生动物种群中种类数共为 49 种(表 2) ,隶属 35 属 28 科。其中矿渣样地 14 种 ,矿石样地 22 种 ,裸露石灰岩样地 37 种。

以群落中原生动物物种丰度和丰富度计算物种多样性各指标得到表 3。比较表 3 各指数可以看出 ,老万场金矿区矿土和裸露石灰岩苔藓结皮表土生境的 Shannon-Weiner 指数、Margalef 指数的值较大 ,表明该生境中原生动物物种较丰富 ,而矿渣生境中的这 2 个指数值相对较低 ,表明该生境中原生动物物种贫乏。各生境中的 Pielou 指数值差异不大 ,说明优势种较少。

表 3 苔藓结皮表土原生动物种群结构特征
Tab.3 Structure of protozoa communities in moss crust topsoil

样地编号	多样性指数	丰富度指数	均匀性指数
S1	1.93	2.52	0.93
S2	1.49	1.55	0.83
S3	1.59	1.97	0.76
M1	2.41	4.20	0.83
M2	2.08	2.87	0.90
M3	2.16	3.17	0.89
M4	2.22	3.28	0.93
L1	2.39	4.16	0.80
L2	2.63	4.10	0.91
L3	2.32	3.44	0.84

表 4 老万场金矿区苔藓结皮表土重金属平均含量及污染指标 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
Tab.4 Mean contents and indices of heavy metal pollution in the moss crust topsoil of Laowanchang Gold Deposit

类型	Cr	Pb	Cd	Zn	Hg	As	Cu	<i>P</i>
矿渣	155.10	18.85	1.18	181.50	7.67	698.67	110.30	18.80
矿土	119.80	5.49	ND	134.00	7.15	645.96	91.27	17.41
裸露石灰岩	229.50	2.25	ND	291.40	6.44	661.05	109.90	15.79
背景值	150.00	250.00	0.30	200.00	0.30	40.00	50.00	—

ND 表示未检出。

2.2 结皮表土中重金属元素含量及其对原生动物种类丰富度和丰度的影响

老万场金矿重金属污染物主要为 As、Hg、Cr、Pb、Cu、Zn 和 Cd(表 4)。其中 Hg 含量超过土壤元素背景值 20 多倍 ,As 含量超过元素背景值 15 倍左右 ,Pb 含量虽远低于背景值 ,但从 3 组样地比较来看 ,矿渣样地 Pb 含量是矿土样地的 3.4 倍 ,是裸露石灰岩样地的 8.4 倍 ,在矿渣样地中 Cd 含量约为元素背景值的 4 倍 ,而在矿土和裸露石灰岩结皮表土中未检出。一方面 ,说明了 Cd 是在开采冶炼后残留于矿渣中 ,另一方面 ,从各元素的比较来看 ,矿渣中残留的大部分元素浓度比矿土和裸露石灰岩的元素浓度都高。

对种类丰度数据进行自然对数的转换 ,以转换后的丰度数据和物种丰富度数据作为因变量 ,以重金属综合污染指数为自变量统计分析得到图 1。从图 1 各样地比较看出 ,原生动物种群的种类丰富度和丰度总体上随重金属综合污染指数的增大而明显减少。

2.3 苔藓结皮表土原生动物种群与环境因子的排序

以所选群落种类丰度数据矩阵和环境因子矩阵进行冗余分析(RDA)。冗余分析的分析结果能最大程度上代表所有指标解释能力的最小变量组合。RDA 选入所有的 4 个环境因子参与分析 ,以找到显著影响群落的环境因子($P < 0.01$)(表 5)。然后进行手动选择 ,得到 RDA 二维排序图(图 2)。

在 RDA 排序图中 ,环境因子用带有箭头的线段表示 ,连线的长短表示样地、原生动物种群种类分布与该环境因子的大小 ,箭头连线与排序轴的夹角表示该环境因子的变化趋势。第 1 排序轴、第 2 排序轴的特征值分别为 0.394、0.145。综合污染指数 *P* 与第 1 排序轴呈正相关(0.8909) ,pH 与第 2 排序轴呈正相关(0.9213)。第 1 排序轴解释了 39.4% 的群落物种变化和 73.1% 的物种与环境的关系 ,第 2 排序轴进一步解释了 14.6% 的群落物种变化和

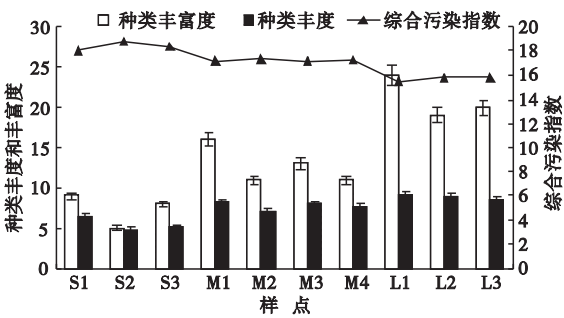


图1 原生动物群落种类丰富度、丰度与重金属综合污染指数的关系

Fig.1 Relationship between comprehensive pollution index of heavy metal and richness and abundance of protozoa communities

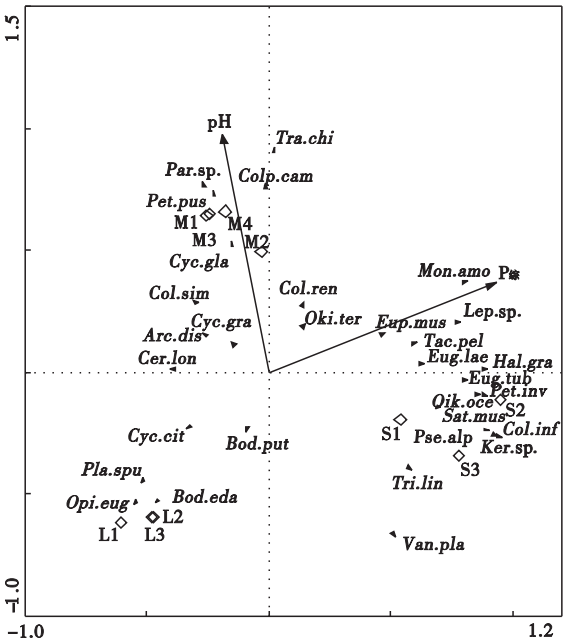


图2 苔藓结皮表土原生动物群落的 RDA 二维排序图
Fig.2 A two-dimensional graph of RDA ordination for protozoa communities in moss crust topsoil
种类名称为学名缩略词,见表2;原生动物种类用黑色三角形表示,样地用空心菱形符号表示。

26.9%的物种与环境的关系,说明这2个排序轴反映了群落与环境因子之间相互关系的大部分信息。RDA结果表明,重金属综合污染指数和pH是影响

表5 RDA 前向选择环境变量解释表
Tab.5 Explained scale of RDA forward selection of environment variables

环境因子	RDA 简化模型下的排列值	
	P 值	F 比率
综合污染指数(P)	0.003	4.52
pH	0.004	2.72
结皮厚度(Tk)	0.799	0.64
土壤湿度(SM)	0.615	0.81

金矿区原生动物群落分布的关键因子。高重金属综合污染指数区的物种位于第1排序轴的正半轴,低重金属综合污染指数区的物种分布在第1排序轴的负半轴。同时分布于第2排序轴正半轴的物种说明它们对 pH 有较高的忍耐力,而分布于负半轴的物种对 pH 敏感。

3 讨论

污染最严重的矿渣原生动物种类数最少,仅为14种,与污染相对较小的裸露石灰岩来说,原生动物群落多样性指数和丰富度指数都很低,群落结构受到了极大的破坏,表明受重金属污染严重的地区,污染物浓度发生微量的变化都有可能引起原生动物群落结构的极大差异。这种变化表现为某些种类对重金属浓度敏感度极高,导致死亡和消失。例如梨波豆虫和狭隘波豆虫等,它们仅在污染较轻的裸露石灰岩上出现(表2);而有些种类在重金属污染胁迫下,对污染浓度耐受性高长时期内产生了适应性,成为耐污种类,形成优势类群。例如,在污染严重的矿渣上,常见的优势类群为小眼屋滴虫、慢行波豆虫、球形波豆虫、鳞壳虫属以及肾形虫属等(表2)。总体来说,在群落水平上,原生动物群落的物种丰富度和丰度随着重金属综合污染指数的增大而明显降低(图1)。

冗余分析(RDA)能有效地对多个环境因子进行统计检验,并确定对矿区土壤环境中原生动物群落变化具最大解释能力的最小变量组。在中小尺度上,土壤原生动物群落的分布格局主导因素决定于微生境、土壤养分及其一些理化因子。本研究表明,金矿区苔藓结皮表土原生动物群落的分布及其变化与微生境中的重金属污染程度、pH等因子密切相关。RDA分析结果表明,对高浓度的重金属综合污染敏感性种类仅仅出现在裸露石灰岩样地上或3个样地都出现,例如梨波豆虫、狭隘波豆虫、沫项匙口虫、瓜形膜袋虫和贪食后毛虫等(图2);对重金属综合污染耐受性高的种类仅出现在矿渣和矿土地地上并在裸露石灰岩样地上缺失,例如变形滴虫、薄咽虫、粘游仆虫、膜状急纤虫、肾状肾形虫、鳞壳虫属和大弹跳虫,它们的分布与重金属综合污染存在着密切的相关性,忍耐阈值较宽(图2)。从图2看出,对重金属综合污染忍耐力高的大部分种类是大型的纤毛虫类,而小型的鞭毛虫类或裸肉足虫类对重金属污染更为敏感,因而利用原生动物群落来监测环境

重金属污染不仅在水生生态系统中可以被广泛地推广(姜建国等 2000; Madoni & Romeo 2006), 从微型生物水平上来说, 在监测土壤生态系统健康状况上同样可以作为最佳的指示生物。除了重金属综合污染指数对金矿区原生动物群落影响显著外, pH 影响也明显, 但结皮表土湿度和厚度的影响却显著降低, 说明了在重金属污染的金矿区, 化学因子对原生动物群落的影响比物理因子更强。

老万场金矿区不同苔藓植物对原生动物群落可能也会造成一定的差异, 虽然矿区的生境和植被相对较为单一, 但是矿区原生动物群落在污染监测中同样具有普适性, 并且与矿区植被生态恢复过程有密切的相关性, 因此对矿区苔藓结皮表土原生动物群落学特征指数和环境因子关系的研究, 是为监测矿区生态环境和植被恢复过程中生物多样性特征, 从而为建立矿区原生动物群落对环境因子的监测模型提供科学数据。

致谢 野外工作得到汪文云、李冰、周灵燕同志的大力帮助, 元素分析由汪文云同志在贵州师范大学分析测试中心协助分析, 在此一并表示诚挚的感谢!

参考文献

- 董炜华, 殷秀琴. 2005. 小兴安岭白桦林土壤跳虫的动态特征. 生态学杂志, **24**(3): 278-282.
- 冯伟松, 杨军, 叶志鸿, 等. 2004. 凡口铅锌矿湿地处理系统的原生动物. 动物学杂志, **39**(1): 2-11.
- 冯伟松, 余育和. 2000. 南极菲尔德斯半岛地区土壤原生动物生态学研究. 水生生物学报, **24**(6): 610-615.
- 高云超, 朱文珊, 陈文新. 2000. 土壤原生动物群落及其生态功能. 生态学杂志, **19**(1): 59-65.
- 江洪, 张朝晖. 2007. 贵州晴隆老万场红土型金矿三种藓类植物及其土壤基质的重金属元素测定及相关性分析. 广西植物, **27**(4): 610-615.
- 姜建国, 张颖, 吴生桂. 2000. 东湖原生动物群落结构变化与水质差异的相关研究. 生态学杂志, **19**(5): 40-44.
- 李勤奋, 杜卫兵, 李志安, 等. 2006. 金属矿区芒草种群对重金属的积累及其与土壤特性的关系. 生态学杂志, **25**(3): 255-258.
- 刘凤枝. 2001. 农业环境监测实用手册. 北京: 中国标准出版社.
- 宁应之, 沈福芬. 1996. 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. 动物学研究, **17**(3): 225-232.
- 宋雪英, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 2004. 土壤原生动物对环境污染的生物指示作用. 应用生态学报, **15**(10): 1979-1982.
- 苏延桂, 李新荣, 贾荣亮, 等. 2007. 腾格里沙漠东南缘苔藓结皮对荒漠土壤种子库的影响. 应用生态学报, **18**

- (3): 504-508.
- 孙贤斌, 李玉成, 张小平, 等. 2005. 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, **24**(10): 1163-1166.
- 王宏镇, 束文圣, 蓝崇钰. 2005. 重金属污染生态学研究现状与展望. 生态学报, **25**(3): 596-605.
- 王智慧, 张朝晖, 李建华. 2007. 贵州香纸沟岩溶藓类附生水生原生动物群落生态特征. 中国岩溶, **26**(3): 249-254.
- 夏家淇. 1996. 土壤环境质量标准详解. 北京: 中国环境科学出版社.
- Becker JM, Parkin T, Nakatsu CH, et al. 2006. Bacterial activity, community structure, and centimeter-scale spatial heterogeneity in contaminated soil. *Microbial Ecology*, **51**: 220-231.
- Borcard D, Legendre P, Drapeau P. 1992. Partialling out the spatial component of ecological variation. *Ecology*, **73**: 1045-1055.
- Ferisk K, Ramsey P, Frazar C, et al. 2003. Differences in hyporheic-zone microbial community structure along a heavy-metal contamination gradient. *Applied and Environmental Microbiology*, **69**: 5563-5573.
- Foissner W. 1987. Soil protozoa: Fundamental problems, ecological significance, adaptations in ciliates and testaceans, bioindicators, and guide to the literature. *Progress in Protistology*, **2**: 69-212.
- Foissner W. 2000. A compilation of soil and moss ciliates (Protozoa, Ciliophora) from Germany, with new records and descriptions of new and insufficiently known species. *European Journal of Protistology*, **36**: 253-283.
- Madoni P, Romeo MG. 2006. Acute toxicity of heavy metals towards freshwater ciliated protists. *Environmental Pollution*, **141**: 1-7.
- Marianne C. 2005. Soil protozoa: An under-researched microbial group gaining momentum. *Soil Biology & Biochemistry*, **37**: 811-817.
- Mieczan T. 2007. Relationship among ciliated protozoa and water chemistry in small peat-bog reservoirs (Łęczna-Włodawa Lakeland, eastern Poland). *Oceanological and Hydrobiological Studies*, **36**: 77-86.
- Morgan AJ, Morris B, James N, et al. 1986. Heavy metals in terrestrial macroinvertebrates: Species differences within and between trophic levels. *Chemistry and Ecology*, **2**: 319-334.
- Stout JD. 1962. An estimation of microfaunal populations in soils and forest litter. *Journal of Soil Science*, **13**: 314-320.
- Ter Braak CJF, Smilauer P. 2002. CANOCO reference manual and user's guide to CANOCO for Windows: Software for canonical community ordination (version 4.5). New York: Microcomputer Power: 1-352.
- Todorov M. 2002. Morphology, biometry and ecology of *Nebela bigibbosa* Penard, 1890 (Protozoa: Rhizopoda). *Acta Protozoologica*, **41**: 239-244.

作者简介 杨再超, 男, 1983年生, 硕士研究生。主要从事动植物生态及环境污染研究。E-mail: yangzceco@yahoo.cn
责任编辑 刘丽娟