

北京门头沟废弃采石矿区地表土壤动物群落多样性

林英华¹ 宋百敏^{2,4} 韩 茜² 王 静² 张 永³ 于长青^{2,*}

(1. 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林保护学重点实验室, 北京 100091
2. 清华大学生态保护研究中心, 北京 100084 3. 北京市门头沟区科学技术委员会, 北京门头沟区 102300
4. 山东大学生命科学院, 山东济南 250100)

摘要 :以北京门头沟废弃矿区为例, 研究弃矿生态恢复地表土壤动物群落多样性。2006 年 3 月~4 月, 在设置的样带内, 采用陷阱法对石灰矿天然恢复(下段)和人工恢复(上段)区的地表土壤动物群落进行调查。在 157 个陷阱中, 共采集到地表土壤动物 2604 只(未知类群 112 只), 隶属 1 门 4 纲 16 目 1 亚目 47 科。大型土壤动物优势类群有叶蝉科、蚁科, 分别占大型土壤动物的 22.45% 和 47.71%; 中小型土壤动物优势类群有等节跳科、长角跳科和甲螨亚目, 分别占中小型土壤动物的 23.27%、35.22% 和 41.01%。矿区地表动物营养功能群以植食性和捕食性为主。Spearman 等级相关分析表明, 上、下段之间地表土壤动物个体数差别极显著($r_s = 0.446$, $p < 0.01$)。上段土壤动物个体数、类群丰富度和类群多样性随时间差异均显著($p < 0.05$) ;上、下段, 部分土壤动物个体数、类群丰富度和类群多样性之间存在显著性差异($p < 0.05$)。非度量多维标度(Non-metric Multidimensional Scaling, No-metric MDS)分析表明, 地表土壤动物个体数量、类群以及营养功能群的分布与恢复方式、土壤养分状况、地表植被状况有关。

关键词 :土壤动物 ;群落结构 ;人工种植 ;天然恢复 ;非度量多维标度法

文章编号 :1000-0933 (2007)11-4832-08 中图分类号 :Q146 文献标识码 :A

The community diversity of ground-dwelling soil animals in abandoned quarry in Mentougou, Beijing

LIN Ying-Hua¹, SONG Bai-Min^{2,4}, HAN Qian², WANG Jing², ZHANG Yong³, YU Chang-Qing^{2,*}

1 Key Laboratory of Forest Protection, State Forestry Administration, Research Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China
2 The Research Center for Ecological Conservation, Tsinghua University Beijing 100084, China
3 Science & Technology Committee of Mentougou, Beijing 102300, China
4 College of Life Science, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (11) 4832 ~ 4839.

Abstract :Mentougou District which is located in the West Mountains of Beijing, is the main quarrying area to satisfy the big demands of urban construction in Beijing. Quarrying has altered the landscape of Beijing West Mountains and resulted in the habitat degradation dramatically. Soil animals as the important part of the Earth's biological diversity play vital roles in decomposition, soil-plant ecosystem restoration, and even as indicators for ecological restorations. In order to study on the community diversity of ground dwelling soil animals in abandoned quarry areas, one transect with pitfall traps was set up in an abandoned quarry in Mentougou during March to April of 2006. The transect was across the quarry (down side) which

基金项目 :北京市科学技术委员会资助项目
收稿日期 :2006-08-16 ;修订日期 :2007-08-06
作者简介 :林英华 (1966 ~) 女, 黑龙江绥化人, 博士, 主要从事动物生态学和土壤生态环境研究. E-mail :linyinhua@263.net
* * 通讯作者 Corresponding author. E-mail :cqyu@tsinghua.edu.cn
Foundation item :The project was financially supported by Science & Technology Committee, Beijing
Received date :2006-08-16 ;Accepted date :2007-08-06
Biography :LIN Ying-Hua, Ph. D., mainly engaged in zoological ecology & ecology and environment of soil. E-mail :linyinhua@263.net

was under natural restoration within 10 years and then up to the surrounding area (upper side) where was planted with *Platycladus orientalis* in the natural shrubwood. 2 604 individuals (112 unknown) of soil animals were collected from 157 pitfalls, which belonged to 4 classes, 16 orders and 1 suborders, and 47 families. Among the macro ground dwelling soil animals, the most common groups were cicadellidae (22.45%) and Formicidae (47.71%), then were common groups such as Tenebrionidae, Mycetophagidae, Scaphidiidae, Lathridiidae, Cicadidae, Thripidae, Armadillidiidae and Araneae. The most common meso and micro ground dwelling soil animals were Isotomidae (23.27%), Entomobryidae (35.22%), and Oribatida (41.01%). Phytophage was the most common guild (41.51%), then was predators (28.30%) and Omnivores (18.87%). Fungivorous forms (1.89%) and Cadavericoles (1.89%) were the rarest guilds.

The result by Spearman ranks correlation stated that the difference of individual numbers of ground dwelling soil animals between down side and upper side was very significant ($r_s = 0.446, p < 0.01$). In the down side, the individual number and group richness were increasing from March 31 to April 21, and the group diversity and evenness were increasing from March 26 to April 21 while the group diversity and evenness in upper side were decreasing. The difference of group richness and group diversity between the down side and the upper side were significant ($p < 0.05$). The analysis by Non-metric MDS (Non-metric Multidimensional Scaling) stated that the distribution of individual number, groups and guilds related to the situation of restoration, soil nutrient and vegetation.

Key Words : soil animal ; community structure ; reforestation ; natural restoration ; Non-metric Multidimensional Scaling (Non-metric MDS)

土壤动物是土壤生态系统不可缺少的重要组成部分,在改善土壤结构,促进生态系统养分循环和物质流动中发挥着重要作用。近年来,随着全球对生物多样性及其保护和全球环境变化的关注,土壤动物在退化生态系统的恢复与重建中的作用日益成为国内外学者关注的热点^[1-6]。

门头沟区地处北京西部山区,曾是北京的主要矿业基地。百余年的采煤史和砂、石的大量开采,严重破坏了门头沟的土壤生态系统。随着“京西矿区”向“生态涵养发展区”的转变,门头沟生态修复工程—目前国内进行的最大规模的生态修复工程已经启动,一些具有代表性的矿石类型和地区生态修复以重建稳定的生态系统已初具规模。受条件的制约,与植被恢复同等重要的土壤动物群落生态功能的恢复未有报道。

本文以门头沟区担礼村龙窝废弃采石矿为例,在废弃石矿区现场调查的基础上,对土壤动物群落特征与群落多样性进行初步研究,探讨土壤动物群落与废弃矿生态恢复之间的相互关系,为废弃地的生态环境和提高整个区域的生物多样性提供理论支持。

1 自然概况与研究方法

1.1 自然概况

研究地点选择北京博利达化石厂的弃矿区。该弃矿位于北京市门头沟区妙峰山镇担礼村狗窝,东经 116°0'19.9"、北纬 39°59'08.9",距妙峰山镇约 2.5km,海拔 165.0m,占地面积 4.0km²。该矿区从 1968 年开采,1990 年起陆续关闭,1999 年起由部分关闭,到 2004 年已经全部关闭。

该地区气候为温带季风气候,冬季干燥寒冷,最低温度 -15℃左右,7、8 月份温度最高,在 35℃以上。年均降水量 600~700 mm,多集中 7~8 月份,无霜期 170~200 d 左右。土壤类型主要为碳酸岩褐土、山地淋褐土和山地棕壤。矿区开采前地表植被主要是荆条、胡枝子以及酸枣组成的灌草丛群落,目前地表植物主要包括人工种植的柏树、荆条、酸枣以及狗尾草、虎尾草、牛筋草等草本植物。

1.2 研究方法

2006 年 3 月 10 日~4 月 28 日,在该矿区沿废弃矿场最低点海拔 141m 至最高点海拔 158m 处布设 5m 宽样带,样带长约 200m,基本涵盖了矿区开采区、开采边缘和矿区外围 3 部分。由于开采边缘样带长度较短,且开采边缘和矿区外围的地势均高于矿区开采区,地表植被状况差异明显,为便于分析,将样带人为划分为两

段 ,即一长约 130m 地表主要为狗尾草、虎尾草、牛筋草等草本植物且灌木稀少的开采区作为下段 ;而将一长约 70m 的地表为主要有荆条、沙枣以及人工种植的柏树等的开采边缘和矿区外围合并作为上段。下段地表土壤 (0 ~ 10cm)pH、有机质、全氮、容重以及含水量分别为 8. 0、1. 40 g/kg、0. 12 g/kg、1. 66% 和 2. 25% ,上段则分别为 8. 3、5. 93 g/kg、0. 43 g/kg、1. 33% 和 3. 98%。

采用陷阱法^[7]采集土壤动物。在设定的样带内平行布设两列陷阱 ,沿折线方式每隔 10m 左右在每条样线布设一个。具体方法是 :将置 30% 浓度的稀酒精溶液的一次性塑料杯埋在地下 ,口与地面齐平。每隔 10m 左右放置一个。上段放置 20 个 ,下段放置 18 个 ,共计放置 38 个陷阱 ,在采样后期根据实际情况适度添加陷阱 ,具体情况见表 1。每个一星期采集一次。

本研究共采集 8 次 ,其中前两次由于陷阱内结冰和陷阱内液体挥发而未进行采集 ,实际 6 次采集到土壤动物样品 ,其采集时间和采集数量如表 1。

受分类的限制 ,土壤动物分类以大类进行分类 ,除蜘蛛类和蛱蝶类以外 ,其他均鉴定到科水平^[8,9] ;土壤动物体型大小依据在食物分解过程中作用^[10]进行分类。

表 1 陷阱法采集土壤动物时间和采集陷阱数量
Table 1 The number and date of collecting sample

采样时间 Time	气温 Weather	次数 No.	采集陷阱数 (个) Pitfall collected			布设陷阱数 Pitfall number	占全部样品的 百分比 (%) Percent	备注 Note
			下段 Down	上段 Upper	小计 Sub.			
2006-03-26 Mar. 26 2006	气温 14 ℃ ,风沙 Temperature 14 ℃ and sand by wind	1	13	15	28	38	73. 68	
2006-03-31 Mar. 31 2006	气温 5 ~ 20 ℃ ,南风 2 ~ 3 级 Temperature 5 ~ 20 ℃ , Souther 4 ~ 6m/s	2	14	13	27	40	67. 50	上下段增 1 陷阱 Each side added 1 pitfall trap
2006-04-07 Apr. 7 ,2006	气温 5 ~ 18 ℃ ,南风 2 ~ 3 级 Temperature 5 ~ 18 ℃ , Souther 4 ~ 6 m/s	3	17	10	27	40	67. 50	
2006-04-14 Apr. 14 2006	气温 5 ~ 15 ℃ Temperature 5 ~ 15 ℃	4	12	7	19	44	43. 18	下段增 3 个陷阱 ,上段增 1 个陷阱 Added 3 at upper side and 1 at upper side
2006-04-21 Apr. 21 2006	气温 11 ~ 20 ℃ Temperature 11 ~ 20 ℃	5	11	14	25	44	56. 82	
2006-04-27 Apr. 27 2006	阵雨 ,气温 9 ~ 18 ℃ Shower ,Temperature 9 ~ 18 ℃	6	19	13	31	44	70. 45	26 日夜下雨 Raining at night Apr. 26
总计 Total		6	86	71	157	250	62. 80	

1.3 数据分析

各类群数量等级划分 ,以个体数量占全部捕获量 10% 以上为优势类群 ,介于 1% ~ 10% 之间的为常见类群 ,介于 0. 1% ~ 1% 为稀有类群、0. 1% 以下的为极稀有类群。

群落多样性指数采用香农-威纳多样性指数 (Shanon-Wiener index)、Pielous 均匀性指数和辛普森优势度指数 (Simpson index) ,即 $H' = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$ 、 $J_s = H' / \ln S$ 、 $C = \sum \left(\frac{n_i}{N} \right)^2$ 。

非参数检验 Spearman 等级相关法分析弃矿地表不同地段土壤动物个体数量的差别 ;Kruskal-Wallis 方差及其多重比较分析上下段内不同时间内个体数量、类群丰富度、类群多样性以及类群均匀性。

为降低数量占优势的个别类群对群落结构的影响权重 ,将原始数据进行 4 次方根变换后 ,对弃矿区土壤动物群落、营养功能群通过非度量多维标度法 (Non-matric Multidimentional Scaling ,No-metric MDS)进行分类

排序。所有运算通过 SPSS11.0 软件进行^[1]。

2 结果

2.1 土壤动物群落组成与多样性

在 157 个陷阱中,共采集到土壤动物 2604 只,未能进一步鉴定个体数 112 只,隶属 4 纲 16 目 1 亚目 47 科,由于革翅目昆虫为残体,进行统计时未算入,因此采集到大型土壤动物 44 类,占所鉴定个体数的 89.80%;中小型土壤动物 5 类,占所鉴定个体数的 10.20%。大型土壤动物优势类群 2 类,即叶蝉科、蚁科,分别占大型土壤动物的 22.45% 和 47.71%;常见类群 8 类,即卷甲虫科、薪甲科、拟步甲科、小蕈甲科、蝉科、出尾蕈甲科、蓟马科、蜘蛛目,分别占大型土壤动物的 1.51%、2.06%、2.12%、2.42 %、2.77%、3.48%、4.01%、4.60%;中小型土壤动物优势类群 3 类,即等节跳科、长角跳科和甲螨亚目,分别占中小型土壤动物的 23.27%、35.22% 和 41.01%;常见类群无(表 2)。

矿区地表动物营养功能群包括植食性、枯食性、菌食性、捕食性、腐食性、杂食性、尸食性 7 类,分别占该地段土壤动物个体数的 41.51%、3.77%、1.89%、28.30%、3.77%、18.87%、1.89%。

整体而言,样带上段土壤动物类群数和每瓶个体数均大于样带下段土壤动物类群数和每瓶个体数,其中前者平均类群数和个体数分别为 33.17 类和 101.07 只,后者分别为 29.55 类和 100.39 只。Spearman 等级相关分析表明,弃矿上段与下段之间地表土壤动物个体数差别极显著($r_s=0.446, p<0.01$)。

弃矿地表 6 次采样中,上段除土壤动物类群性均匀性差别不显著外,土壤动物个体数、类群丰富度和类群多样性采样间差异均显著,而下段土壤动物个体数、类群丰富度和类群多样性和均匀性采样间差别均不显著;弃矿的上、下段,部分土壤动物个体数、类群丰富度和类群多样性之间存在显著性差异(表 3)。

表 2 门头沟弃矿地表土壤动物群落结构

Table 2 Structure of Ground-dwelling soil animal at abandoned quarry area in Mentougou							
类群 Group		体型 Size	下段 Down	上段 Upside	Pre. Dre.	Guild	
1 蛛形纲 Arachnida	蜘蛛目 Araneae	Macro	36	42	4.60 *	Pr	
2	蜱螨目 Acariformes	甲螨亚目 Oribatida	Meso/micro	134	192	41.01 * *	O
3 软甲纲 Malacostraca	等足目 Isopoda	卷甲虫科 Armadillidiidae	Macro	10	16	1.53 *	S
4 唇足纲 Chilopoda	蛃蜴目 Scutigermorpha	蛃蜴科 Scutigelidae	Macro	3	2	0.29	Pr
5	蜈蚣目 Scolopendromorpha	蜈蚣科 Scolopendridae	Macro	1		0.06	Pr
6 昆虫纲 Insecta	弹尾目 Collembola	等节跳科 Isotomidae	Meso/micro	144	41	23.27 * *	O
7		长角跳科 Entomobryidae	Meso/micro	175	105	35.22 * *	O
8	蜚蠊目 Blattaria	蜚蠊科 Blattidae	Macro	1		0.06	O
9	直翅目 Orthoptera	螞蚱科 Tettigoniidae	Macro	1	5	0.35	Ph/Pr
10		蟋蟀科 Gryllidae	Macro		1	0.06	Ph
11		棒角螞科 Gomphomastacidae	Macro		1	0.06	Ph
12		斑翅蝗科 Oedipodidae	Macro	1	2	0.18	Ph
13		网翅蝗科 Arcypteridae	Macro		3	0.18	Ph
14		菱蝗科 Tetrigidae	Macro	2	14	0.94	Ph
15	啮虫目 Psocoptera	重啮科 Amphisocidae	Meso/micro	2		0.25	O
16		跳啮科 Psyllipsocidae	Meso/micro	1	1	0.25	O
17	缨翅目 Thysanoptera	蓟马科 Thripidae	Macro	37	31	4.01 *	Ph
18	半翅目 Hemiptera	红椿科 Pyrrhocoridae	Macro		1	0.06	Ph
19		长椿科 Lygaeidae	Macro		3	0.18	Ph/Pr
20		奇椿科 Enicocephalidae	Macro	2	1	0.18	Pr
21		椿科 Pentatomidae	Macro	1	3	0.24	Ph/Pr
22		网椿科 Tingidae	Macro	2		0.12	Ph
23		土椿科 Cydnidae	Macro		1	0.06	Ph
24		花椿科 Anthocoroidae	Macro	1	3	0.24	Pr

续表							
类群 Group			体型 Size	下段 Down	上段 Upside	Pre. Dre.	Guild
25	同翅目 Homoptera (larva)	蚜科 Aphididae	Macro	4	3	0.41	Ph
26		叶蝉科 Cicadellidae	Macro	294	87	22.45 **	Ph
27		沫蝉科 Cercopidae	Macro	1	4	0.29	Ph
28		蝉科 Cicadidae	Macro	24	23	2.77 *	Ph
29	鞘翅目 Coleoptera	隐翅甲科 Staphylinidae	Macro		2	0.12	Pr
30		窃蠹科 Anobiidae	Macro	1		0.06	O
31		薪甲科 Lathridiidae	Macro	22	13	2.06 *	F
32		伪瓢甲科 Endomychidae	Macro	1	1	0.12	Pr
33		瓢虫科 Coccinellidae	Macro	2		0.12	Pr
34		葬甲科 Silphidae	Macro	2	4	0.35	Ca
35		锯谷盗科 Silvanidae	Macro	1		0.06	Pr
36		苔甲科 Scydmaenidae	Macro		3	0.18	Pr
37		扁甲科 Cucujidae	Macro	3	2	0.29	Pr
38		长角象甲科 Anthribidae	Macro		1	0.06	Ph
39		出尾蕈甲科 Scaphidiidae	Macro	30	29	3.48 *	D
40		粪金龟科 Geotrupidae	Macro	1		0.06	O
41		叩头甲科 Elateridae	Macro	3	4	0.41	Ph
42		皮蠹科 Dermestidae	Macro	1	1	0.12	Ph/Pr
43		小蕈甲科 Mycetophagidae	Macro	24	17	2.42 *	D
44		拟步甲科 Tenebrionidae	Macro	22	14	2.12 *	S
45		露尾甲科 Nitidulidae	Macro	4	1	0.29	O
46	鳞翅目 Lepidoptera (larva)	尺蛾科 Geometridae	Macro	4	2	0.35	Ph
47		蛱蝶科 Nymphalidae	Macro		1	0.06	Ph
48		灯蛾科 Arctiidae	Macro		1	0.06	Ph
49	膜翅目 Hymenoptera	蚁科 Formicidae	Macro	357	456	47.91 **	O
总计 total		个体数 individual	Macro	899	798		
			Meso/micro	456	339		
		类群数 group	Macro	33	37		
			Meso/micro	5	4		
Ph 植食性 Phytophage ,D 枯食性 Debris-feeder 's ,F 菌食性 Fungivorous forms ,Pr 捕食性 Predators ,S 腐食性 Saprozoic ,O 杂食性 Omnivores ,Ca 尸食性 Cadavericoles ,Degr. :丰度 Degree ,Fre :多度 Frequence ,Gui. :功能群 Guild							

表 3 不同地段土壤动物个体数量、类群丰富度、类群多样性与均匀性

Table 3 Means of soil animal individuals ,group richness ,diversity and evenness in abandoned quarry

	时间 Time	个体数量 Individual	类群丰富度 Group richness	类群多样性 Diversity	类群均匀性 Evenness	差异性检验 Significantly
下段 Down side	3-26	17.17 ± 3.90 ^a	0.49 ± 0.47 ^a	1.10 ± 0.13 ^{acde}	0.72 ± 0.06 ^{acef}	个体 Individual $X^2 = 4.84$ $a > 0.05$
	3-31	13.75 ± 2.52 ^{bd}	5.17 ± 0.59 ^{bd}	1.20 ± 0.14 ^{bede}	0.77 ± 0.06 ^b	类群 Group $X^2 = 6.16$ $a > 0.05$
	4-07	16.75 ± 3.40 ^c	5.94 ± 0.44 ^{cf}	1.42 ± 0.06 ^{cde}	0.83 ± 0.03 ^c	多样性 Diversity $X^2 = 7.94$ $a > 0.05$
	4-14	19.64 ± 3.51 ^{df}	6.45 ± 0.87 ^{dae}	1.44 ± 0.16 ^d	0.81 ± 0.06 ^d	均匀性 Evenness $X^2 = 3.77$ $a > 0.05$
	4-21	20.56 ± 7.46 ^e	6.44 ± 0.91 ^{ef}	1.50 ± 0.15 ^e	0.84 ± 0.05 ^e	
	4-27	12.53 ± 1.99 ^f	5.06 ± 0.50 ^f	1.29 ± 0.11 ^f	0.81 ± 0.06 ^f	
上段 Upper side	3-26	22.21 ± 5.27 ^a	6.10 ± 0.71 ^{abce}	1.63 ± 0.10 ^{ace}	0.88 ± 0.03 ^{ade}	个体 Individual $X^2 = 12.69$ $a < 0.05$
	3-31	9.67 ± 2.35 ^{abd}	5.08 ± 0.81 ^{bde}	1.35 ± 0.18 ^{be}	0.83 ± 0.08 ^{bde}	类群 Group $X^2 = 18.90$ $a < 0.01$
	4-07	17.67 ± 5.45 ^c	5.44 ± 0.69 ^{cde}	1.29 ± 0.19 ^{ce}	0.82 ± 0.09 ^c	多样性 Diversity $X^2 = 14.86$ $a < 0.01$
	4-14	26.67 ± 9.61 ^{de}	7.17 ± 1.01 ^{de}	1.44 ± 0.20 ^{de}	0.74 ± 0.08 ^d	均匀性 Evenness $X^2 = 7.78$ $a > 0.05$
	4-21	9.69 ± 2.20 ^{def}	3.54 ± 0.51 ^{ef}	0.93 ± 0.13 ^{ef}	0.73 ± 0.07 ^e	
	4-27	15.17 ± 2.98 ^f	5.83 ± 0.72 ^f	1.41 ± 0.14 ^f	0.82 ± 0.04 ^f	
* 多重比较 , $a = 0.05$,字母不同表示差异性显著 The means with different superscripts are significantly different ($\alpha = 0.05$)						

调查期间 (表 3) ,弃矿下段地表土壤动物个体数和类群丰富度在 3 月 31 日至 4 月 21 日呈递增的趋势 ,土壤动物类群多样性和类群均匀性则在 3 月 26 日至 4 月 21 日呈递增的趋势 ;弃矿上段地表土壤动物递增趋势不明显 ,土壤动物类群多样性和类群均匀性则在 3 月 26 日至 4 月 21 日呈下降的趋势。

2.2 分类与排序

对 6 次采样获得的弃矿不同地段地表土壤动物个体数量、类群和营养功能群进行非度量多维标度的二维分析 (图 1 a、b、c)。其结果表明 图 1a 将弃矿上、下段 12 个点划分为 6 组 :即下段前 3 次 (d1、d2、d3)、第 6 次 (d6)以及上段的第 6 次 (u6)采样为 1 组 ,下段的第 5 次 (d5)、上段的第 5 次 (u5)采样为一组、下段的第 4 次 (d4)、上段的第 4 次 (u4)采样为一组 ,其他各为一组 ,因此第一维代表不同恢复阶段土壤养分状况对地表土壤动物个体数量的影响 ;在二维方向 ,第二维代表人工恢复地段不同时段地表土壤动物间的差别。图 1b 划分为 4 组 ,上段第 2 次 (u2)、上段第 3 次 (u3)、上段第 5 次 (u5)、各为一组 ,其他各次采样划为一组 ,因此第一维代表不同恢复阶段地表植被对土壤动物类群的影响 ;第二维代表人工恢复地段不同时段地表土壤动物间的差别。图 1c 划分为 4 组 ,上段第 2 次 (u2)、上段第 3 次 (u3)、上段第 4 次 (u4)、上段第 6 次 (u6)、下段第 2 次 (d2)为一组 ;下段的第 3 次 (d3)、下段的第 4 次 (d4)、下段的第 5 次 (d5)、上段的第 5 次 (u5)为一组 ;下段的第 6 次 (d6)和上段的第 1 次 (u1)为一组 ;下段的第 1 次 (d1)为一组 ,第一维代表在不同恢复地段对土壤动物功能群分布状况的影响 ,第二维代表自然恢复对土壤动物功能群的影响状况。

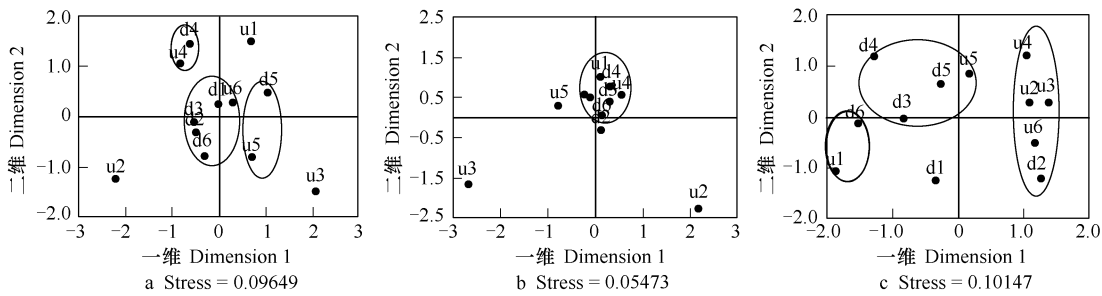


图 1 地表土壤动物个体数量 (a)、类群 (b)和营养功能群 (c)非度量多维标度二维排序图

Fig. 1 The 2-dimensional No-metric MDS ordinal configuration of soil animal individuals (a) ,community (b)and guild (c)

3 讨论

3.1 地表土壤动物群落结构与多样性

本研究研究显示 ,矿区在生态恢复过程中 ,不同恢复阶段地表土壤动物数量明显不同 ;人工恢复地段 ,即上段土壤动物数量、类群数以及多样性指数在研究时段内变化差异显著 ,而天然恢复 ,即下段则在研究时段内变化差异性不显著 ,仅是一些样点之间差异性显著 (表 2)。由于人工恢复地段所种植柏树并已成林 ,林地内混杂荆条、酸枣等树种 ,土层较厚 (> 10 cm) ,为一些土壤动物提供了适宜栖息的场所 ,未经人工干扰的自然恢复地段位于弃矿中心 ,土层仅含少量土 ,大部分为矿渣 ,地段地表仅生存一些草本植物 ,地表矿石较多。地表受山区气候的影响明显 ,环境相对恶劣 ,土壤动物受环境干扰 ,土壤动物数量波动较大。Magura 等^[12]研究表明 ,地表无脊椎动物对地面小气候、生物和非生物条件改变非常敏感 ,土壤的 pH、土壤密度和枯枝落叶对步甲有明显影响。因此人工地对和天然恢复地段在土壤因子、植被状况等方面的差异 ,导致两者的土壤动物群落间存在一定的差别。

从土壤动物类群多样性方面而言 ,天然恢复阶段的土壤动物个体数和类群数均低于人工恢复阶段 ,分别为 100.39 只、101.07 只和 29.55 类、33.17 类。调查期间 ,地表土壤动物个体数和类群丰富度均有呈递增的趋势 ,但地表湿度大导致干性土壤动物减少 ,如第 6 次显示到的地表土壤动物的数量变化 ,表明地表土壤动物数量和类群的波动与生态因子中的温度、日照、湿度、降水量相关有关^[13] ,同时地表的植被状况对地表的土壤动物也具有一定的影响 ,并可能与植物盖度、凋落物厚度等有关 ,Mikola 等^[14]已证实了落叶和部分落叶植物

能够改变土壤生物的特性,并且植物叶片的数量与特性能影响土壤生物的种群和类群动态^[15],而不同植物的凋落物可能对大型土壤动物产生影响^[16]。

天然恢复段(下段)土壤动物类群多样性指数基本呈增长趋势,而人工恢复地段(上段)基本呈下降趋势。由于 H' 指数为 J_s 和 C 指数的函数,反映系统信息的大小,具有可累加性,将两段不同时间的 H' 指数进行累加,则下段土壤动物群落多样性指数(7.9496)低于上段土壤动物群落多样性指数(8.0484);优势度指数下段土壤动物变化趋势不明显,而上段基本呈下降趋势。土壤动物群落均匀性多在 0.6000 附近,整体变化趋势不显著。说明在条件严酷的环境中通常土壤动物稀有种类较少,优势类群和常见类群占优势,因此种间差异较小,均匀度较高,优势现象不明显。从群落多样性看,香浓威纳指数和均匀度指数变化较大,群落的各项指标变化大,稳定性较差。

由于研究地段恢复方法、恢复时段、土壤环境以及地表植被差异,尤其人工恢复和天然恢复因其地表植被变迁与土壤环境因子的差异,本研究天然恢复地段地表土壤动物群落多样性指数低于人工恢复地段。

3.2 聚类与非度量多维标度的二维分析

非度量多维标度法(No-metric MDS)近期发展起来的适用于非线性数据结构分析的一主复杂的迭代排序方法^[17]。通过样本实体构成的分离的点阵提供生态学分析,能很好地揭示连续梯度变化关系^[18]。其胁强系数(stress)来表征由 MDS 确定的 n 个初始排序点在多大程度上表示了 n 个实体的实际差异大小时, $\text{stress} < 0.0500$ 为吻合极好; $\text{stress} < 0.1000$ 为吻合较好; $\text{stress} < 0.2000$ 为吻合一般; $\text{stress} > 0.3000$ 为吻合较差^[12]。本文土壤动物数量以及类群的胁强系数分别为 0.09649 和 0.05473,吻合较好,其结果揭示了土壤动物群落与矿区生态恢复之间的关系,具有实际的生态学意义。

在本文中,将 6 次采样获得的土壤动物个体数量进行为分类和排序,其 6 次采集的 12 个点划分为 6 组,并且下段的 d1、d2、d3、d6 和上段的 u6 为一组,说明其数量分布与土壤中的有机质、全氮含量有关,即上段有机质和全氮的含量均高于下段,这与土壤有机质和土壤全 N 的含量对土壤动物数量影响最大^[19]相一致。地表土壤动物营养主要来源于土壤的养分、凋落物和降雨等,本文研究的地段虽经人为划分两段,但土壤主要性质分析显示,上段土壤主要性质中,除 pH 值外,有机质、全氮、容重以及含水量均高于下段,研究地的下段地表植被为自然恢复的稀疏草本,部分为裸地,地表土壤动物功能群中,下段的采样点(d)分布和上段采样的(u)分布区别比较明显,上段的 u1、u3 分布在坐标轴最低部, u4、u5、d4 分布在坐标轴最上部,这表明土壤动物功能群分布则除了与土壤养分有关以外,还与地表的植被组成有关,这与 Magura 等^[12]研究的地表无脊椎动物对地面小气候、生物和非生物条件改变非常敏感,土壤的 pH、土壤密度一致,反映出矿区恢复地段不同时段地表土壤动物间的差别。与此相似的是,地表土壤动物类群划分为 4 组,上段 u2、u3、u5 分别为一组,其他各次采样划为一组,其一维方向上,下段除 d5 外,主要集中在坐标轴的左侧, u3、u5、u6 分布在右侧,因此反映了不同恢复阶段土壤养分状况地表土壤动物类群的影响。由此可以认为,地表土壤动物个体数量、类群以及营养功能群的分布与恢复方式、土壤养分状况、地表植被状况有关。

陷阱法适于研究对比相似栖息生境的土壤动物一种方法^[20]。受土壤动物特别是中型土壤动物具有种类多、分布广、活动范围小、迁移能力弱、对环境变化敏感等特征的影响,所采集到的地表土壤动物与其丰度和活动范围以及活动密度相关,这是否影响土壤动物多样性有待于今后进一步研究。

References :

- [1] Waltz A E M , Covington W W . Ecological Restoration Treatments Increase Butterfly Richness and Abundance : Mechanisms of Response. *Restoration Ecology* 2004 ,12 :85 —96.
- [2] Longcore T. Terrestrial Arthropods as Indicators of Ecological Restoration Success in Coastal Sage Scrub (California U. S. A.). *Restoration Ecology* ,2003 ,11 397 —409.
- [3] Andersen A N , Hoffmann B D ,Somes J. Ants as indicators of minesite restoration :community recovery at one of eight rehabilitation sites in central Queensland. *Ecological Management & Restoration* 2003 ,4 (Sup.) 12 —19.

[4] Andre's P ,Mateos E. Soil mesofaunal responses to post-mining restoration treatments. *Applied Soil Ecology* ,2006 33 :67 — 78.

[5] Holec M ,Frouz J. Ant (Hymenoptera :Formicidae) communities in reclaimed and unreclaimed brown coal mining spoil dumps in the Czech Republic. *Pedobiologia* ,2005 49 :345 — 357.

[6] Eggleton P ,Vanbergen A J ,Jones D T , *et al.* Assemblages of soil macrofauna across a Scottish land use intensification gradient : influences of habitat quality , heterogeneity and area. *Journal of Applied Ecology* ,2005 42 :1153 — 1164.

[7] Compiled by team of Handbook of soil fauna research methods. *Handbook of soil fauna research methods*. Beijing :China Forest Press ,1998. 24 — 34.

[8] Yin W Y , *et al.* Pictorial keys to soil animal of China. Beijing : Science Press ,1998.

[9] Yuan F ed. *Insect Taxonomy*. Beijing :China Agriculture Publishing House ,1996.

[10] Swift M J ,Heal O W ,Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Univ. Calif. Press ,Berkeley ,1979.

[11] Zhang W B ed. *SPSS application series (2) — SPSS 11.0 statistic and analysis course (super)*. Beijing :Beijing Hope Pubishinghouse 2002.

[12] Magura T ,Tóthmérész B ,Elek Z. Diversity and composition of carabids during a forestry cycle. *Biodiversity and Conservation* ,2003 12 :73 — 85.

[13] Yu Ch F ,Zhao K Z. Primary study of soil fauna at ecological station of Lao Yeling. *Journal of North-East Forestry University* ,1985 13 (3) :128 — 134.

[14] Mikola J ,Yeates G W ,Wardle D A , *et al.* Response of soil food-web structure to defoliation of different plant species combinations in an experimental grassland community. *Soil Biology and Biochemical* ,2001 33 :205 — 214.

[15] Aubert M ,Hedde M ,Decaëns T , *et al.* Effects of tree canopy composition on earthworms and other macroinvertebrates in beech forests of Upper Normandy (France). *Pedobiologia* 2004 47 (5 — 6) 904 — 912.

[16] Wardle D A ,Bonner K I ,Barker G M. Linkages between plant litter decomposition , litter quality , and vegetation responses to herbivores. *Functional Ecology* 2002 16 ,585 — 595.

[17] Yu S X. The application of Nonmetric multidimensional scaling in community classification. *Acta Phytocologica Sinica* ,1995 19 (2) :128 — 136.

[18] Li H M ,Cai L Z ,Lin L Z , *et al.* Using Hierarchial Clusterign and No-metric MDS to explore spatio-temporal variation of benthic community at intertidal in Shenzhen Bay. *Journal of XiaMen University (Natural science)* 2001 40 (3) :735 — 740.

[19] Lin Y H ,Zhang F D ,Yang X Y , *et al.* The analysis of grey relationship between cropland soil fauna community and the environment factors in Shannxi. *Plant Nutrition And Fertilizer Science* ,2005 11 (5) 609 — 614.

[20] Clough Y ,Kruess A ,Tschamtkke T. Organic versus conventional arable farming systems : Functional grouping helps understand staphylinid response. *Agriculture ,Ecosystems and Environment* ,2007 118 285 — 290.

参考文献：

[7] 《土壤动物研究方法手册》编写组编. 土壤动物研究方法手册. 北京 :中国林业出版社 ,1998. 24 ~34.

[8] 尹文英. 中国土壤动物检索图检. 北京 :科学出版社 ,1998.

[9] 袁锋主编. 昆虫分类学. 北京 :中国农业出版社 ,1996.

[11] 张文彬主编. *SPSS 应用系列丛书 (2) 世界优秀统计工具 SPSS11.0 统计分析教程 (高级篇)*. 北京 :希望出版社 2002.

[13] 于长福 ,赵克尊. 老爷岭生态实验站的土壤动物初步调查研究. *东北林业大学学报* ,1985 13 (3) :128 ~ 134

[17] 余世孝. 非度量多维标测度及其在群落分类中的应用. *植物生态学报* ,1995 19 (2) :128 ~ 136.

[18] 厉红梅 ,蔡立哲 ,林丽珠 ,等. 深圳湾潮间带底栖土壤动物群落结构的等级聚类与非度量多维标度排序. *厦门大学学报 (自然科学版)* , 2001 40 (3) :735 ~ 740.

[19] 林英华 ,张夫道 ,杨学云 ,等. 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.