

皇甫川流域中小型土壤动物对 不同水土治理措施的响应

哈斯塔米尔 罗瑞芳 刘新民*

内蒙古师范大学生命科学与技术学院 呼和浩特 010022

摘要: 2007年9月至2008年9月,选择皇甫川流域人工松树林、人工杨树林、人工锦鸡儿灌木林、人工沙打旺草地和撂荒地等不同水土治理措施植被为采样地,以耕作农田为对照,研究了中小型土壤动物对不同水土治理措施的响应。结果表明,共捕获中小型土壤动物14 747只,隶属于5门7纲10类。优势类群为线虫,占群落总个体数的比例为95.53%,常见类群为螨类和弹尾类。不同水土治理措施样地中,中小型土壤动物群落个体数较农田有提高趋势,但无显著差异($P > 0.05$);螨类和弹尾类个体数显著提高($P < 0.05$);线虫个体数在人工沙打旺草地中显著高于农田($P < 0.05$);中小型土壤动物垂直分布的表聚性较农田增强,并以地表凋落物覆盖显著的人工林最为明显。RDA分析表明,中小型土壤动物群落、螨类和弹尾类个体数与凋落物厚度、树(草)高和土壤有机质的变化之间呈显著正相关。以上结果说明,研究地区采取的几种水土治理植被均有利于中小型土壤动物群落的恢复;相比较,地表凋落物层显著的人工松树林、人工杨树林更加有益于螨类和弹尾类的恢复。

关键词: 皇甫川流域;水土流失治理;中小型土壤动物;群落特征

中图分类号:Q958.1 文献标识码:A 文章编号:0250-3263(2013)06-859-09

The Response of Soil Meso- and Microfaunal Community to Water-Soil Erosion Controlling Methods in Huangfuchuan Watershed, Inner Mongolia

HASITAMIER LUO Rui-Fang LIU Xin-Min*

College of Life Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Huhhot 010022, China

Abstract: The responses of soil meso- and microfaunal community to the different water-soil erosion controlling methods was investigated in Huangfuchuan Watershed, Inner Mongolia from September 2007 to September 2008. Sampling plots were chosen as *Pinus tabulaeformis* woodland, *Populus simonii* woodland, *Caragana intermedia* shrub, *Astragalus adsurgens* meadow, and abandoned cropland. Cropland was chosen as control. A total of 14 747 meso- microfauna belonging to 5 phyla, 7 classes and 10 groups were captured. The dominant group was Nematode, which accounted for 95.53% of the total number of meso- and microfauna. The common groups were Acarina and Collembola. Compared to the cropland, the individual number of meso- and microfauna had an increase trend in all of water-soil erosion controlling plots, but had no significance between them ($P > 0.05$). The number of Nematode in *A. adsurgens* meadow, and the number of Acarina and

基金项目 内蒙古自然科学基金项目(No. 20067010506, 2010MS0519);

* 通讯作者, E-mail: Liuxm6596671@163.com;

第一作者介绍 哈斯塔米尔,男,硕士研究生;研究方向:土壤动物生态学;E-mail: hasitamira@sina.com。

收稿日期:2013-01-20,修回日期:2013-05-10

Collembola in *Pinus tabulaeformis* woodland and *Populus simonii* woodland were significant higher than that of in cropland ($P < 0.05$). The soil surface gathering of the vertical distribution of meso- and microfauna were enhanced in different water-soil erosion controlling plots. The results from RDA showed that the significant positive correlations occurred between the individual number of meso- and microfauna, Acarina, Collembola and the litter thickness, average tree (grass) height and soil organic matter. The results suggested that all of the water-soil erosion controlling methods that carried out in the study region were favorable to the restoration of meso- and Microfaunal community. In contrast, the plots which had thicker leaf litter layer (e. g. *Pinus tabulaeformis* woodland, *Populus simonii* woodland and abandoned cropland) were more beneficial to the restoration of Acarina and Collembola.

Key words: Huangfuchuan watershed; Water-soil erosion controlling; Soil meso- and microfauna; Community features

皇甫川是黄河中游的一级支流,属典型的半干旱区季节性河流,多粗泥沙,水土流失极其强烈,并严重影响着流域的生态环境(喻锋等 2006)。自 1978 年实施小流域综合治理试验示范研究以来,在控制水土流失方面取得了良好效果(金争平等 1992)。对小流域综合治理中各种人工植被水土保持效果的科学评价是完善治理措施和在区域范围推广的重要环节,也是人们关注的重点问题。有文献对流域实施水土流失综合治理措施后的植被空间动态变化(杨劫等 2001)、生物多样性恢复(贾志斌等 2001)、微生物类群组成变化(韩芳等 2001)、土壤肥力改善(黄和平等 2005)等方面进行了研究,但土壤动物角度的相关研究较为少见(哈斯塔米尔等 2011)。

研究表明,皇甫川小流域综合治理示范试验中所采用的不同人工植被治理措施均有益于大型土壤动物群落的恢复和保护(哈斯塔米尔等 2011)。与大型土壤动物比较,中小型土壤动物具有数量大、生活周期短和对土壤环境依赖性强等特征,在某些情况下,对由不同土地利用方式导致的土壤环境要素(如土壤水分、pH、有机质等)和地表凋落物覆盖状况的变化更为敏感(Ponge et al. 2003,李玉娟等 2005,吴鹏飞等 2011)。本文以皇甫川流域贺家湾五分地沟综合治理试验区为研究地点,分析了中小型土壤动物对不同水土治理措施的响应特征,以为研究地区水土流失综合治理措施的科学评价提供土壤动物方面的依据。

1 材料与方法

1.1 样地选择 实验地点选择在皇甫川流域贺家湾五分地沟综合治理试验区。为反映不同水土治理措施对中小型土壤动物群落的影响,在五分地沟(39°45'N 和 111°07'E)选择了人工松树(*Pinus tabulaeformis*)林(PTW)、人工杨树(*Populus simonii*)林(PSW)、人工锦鸡儿(*Caragana intermedia*)灌木林(CIS)、人工沙打旺(*Astragalus adsurgens*)草地(AAM)和撂荒地(AC)等为水土治理措施采样地,并以农田(FL1)为对照。由长川中游谷底至东岸方向,顺序为 AAM、FL1、AC、PSW 和 PTW 等几种采样地,并地势逐渐提高。CIS 位于东岸梁崩部位,地势相对平坦,其地形和小环境特征与其他水土治理措施采样地显著不同,与 FL1 缺乏可比性,另在其附近选择旱作农田(FL2)作为其对照。

在阳泉沟(位于与五分地沟相对的长川西岸;地理坐标为 39°45' N 和 111°06' E),选择了百里香(*Thymus serpyllum*)草地(TSG)和退化草地(DG)2 种采样地,以反映研究地区未治理情况下中小型土壤动物群落的特征。各采样地背景资料见文献(哈斯塔米尔等 2011)及表 1。

1.2 研究方法 在选定的样地中,于 2007 年 9 月和 2008 年 5、7、9 月每月下旬,分 4 次,以 100 ml 土壤环刀,沿土壤剖面由地表向下分 0~5 cm、5~10 cm 和 10~15 cm 三层采集土壤

表 1 样地背景资料

Table 1 Background date of sampling plots

样地 Plots	土壤全氮 Total N (g/kg)	土壤全磷 Total P (g/kg)	土壤全钾 Total K (g/kg)	土壤速效磷 Available P (mg/kg)	土壤速效钾 Available K (g/kg)
松树林 <i>Pinus tabulaeformis</i> woodland (PTW)	0.44 ^{ab}	0.31 ^d	—	2.82 ^d	—
杨树林 <i>Populus simonii</i> woodland (PSW)	0.28 ^{cd}	0.45 ^c	20.38 ^b	6.52 ^b	0.07 ^a
沙打旺草地 <i>Astragalus adsurgens</i> meadow (AAM)	0.07 ^e	0.77 ^a	24.28 ^a	5.41 ^c	0.02 ^d
撂荒地 Abandoned cropland (AC)	0.24 ^d	0.42 ^c	18.05 ^c	5.62 ^c	0.04 ^c
农田 1 Cropland 1 (FL1)	0.34 ^c	0.71 ^b	20.19 ^b	8.03 ^a	0.04 ^{bc}
锦鸡儿灌木林 <i>Caragana intermedia</i> shrub (CIS)	0.34 ^c	0.33 ^d	19.28 ^b	1.56 ^e	0.05 ^{bc}
农田 2 Cropland 2 (FL2)	0.47 ^a	0.40 ^c	—	2.90 ^d	—
百里香草地 <i>Thymus serpyllum</i> grassland (TSG)	0.30 ^{cd}	0.42 ^c	17.99 ^c	6.92 ^b	0.05 ^{ab}
退化草地 Degenerated grassland (DG)	0.36 ^{bc}	0.46 ^c	16.89 ^d	6.84 ^b	0.05 ^{bc}

同列不同字母表示样地间差异显著 ($P < 0.05$)。“—”未测定数据。

Different letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among plots. “—”Data were not determined.

样品,同时采集有地表凋落物样地(包括 PTW、PSW 和 AC)的凋落物样品,每样地、每次采样 5 个重复。样品带回室内,4℃ 冰箱中保存。每份土壤样品分为 2 等份,分别以干漏斗(tullgren)法和湿漏斗(baermann)法分离提取干生和湿生中小型土壤动物,参照相关文献(尹文英 1998)进行标本鉴定和统计。同法以 3 个重复另取一份土壤样品,用于土壤理化指标的测定。烘干法测定土壤含水量, PB10 酸度计测定 pH,重铬酸钾容量法测定有机质含量,常规方法测定全 N、全 P、全 K、速效 P 和速效 K 含量(鲁如坤 1991)。

手持式 GPS 仪测定各样地海拔高度,目测或实际测量各样地郁闭(盖)度、树(草)高和凋落物厚度。在采样中,除了 PTW、PSW 和 AC 三种样地中有较显著凋落物层外,其他样地凋落物层均不显著。

1.3 数据处理 统计各样地中捕获的中小型土壤动物总个体数和出现的类群数。个体数占群落总个体数 10% 以上为优势类群,1% ~ 10% 为常见类群,小于 1% 为稀有类群。采用 Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Pielou 均匀度指数 (E) 和 Margalef 丰富度指数 (D_{Ma}) (钱迎倩等 1994) 计算中小型土壤动物群落的多样性。Duncan 法用于相关数据间的差异显著性分析。采用冗余分析 (redundancy analysis, RDA) 方法,分析中小型土壤动物群落以及主要动物类群与环境要素间的相关关系。数据统

计和处理以及文中图和表的制作在软件 Canoco 4.5、SPSS 11.5 和 Excel 2003 中完成。

2 结果与分析

2.1 中小型土壤动物群落组成 共分离到中小型土壤动物 14 747 只,隶属于 5 门 7 纲 10 类。优势类群为线虫(Nematode),占群落总个体数的比例为 95.53%,常见类群为螨类(Acarina)和弹尾类(Collembola),占群落总个体数比例分别为 2.14% 和 1.51%;稀有类群为轮虫(Rotifera)、线蚓科(Enchytraeidae)、熊虫(Eutardigrada)、蚁科成虫(Formicidae)、步甲科幼虫(Carabidae larvae)、叩甲科幼虫(Elateridae larvae)和蜘蛛(Araneida),合计占总个体数的比例为 0.82%。

从捕获的中小型土壤动物总个体数看(表 2),除人工杨树林(PSW)外,人工沙打旺草地(AAM)、人工松树林(PTW)和撂荒地(AC)中捕获的中小型土壤动物个体数均高于位于谷底的农田(FL1);位于梁峁区域的人工锦鸡儿灌木林(GIS)中的中小型土壤动物总个体数也高于旱作农田(FL2)。即,不同水土治理措施样地中小型土壤动物个体数有较农田提高的趋势,但之间无显著差异($P > 0.05$)。

从各样地中 4 次采样捕获的中小型土壤动物总类群数看,除人工锦鸡儿灌木林高于农田(FL2)外,其他水土治理措施样地均低于农田

表 2 不同水土治理措施下中小型土壤动物群落组成的变化

Table 2 Changes of soil meso- and microfaunal community in different plots

动物类群 Soil animals	PTW	PSW	AAM	AC	FL1	CIS	FL2	TSG	DG	合计 Total
线虫 Nematode	2 522 ^{ab} (90.43)	1 229 ^b (87.35)	3 058 ^a (99.80)	1 694 ^{ab} (96.25)	1 494 ^{ab} (97.46)	1 260 ^b (94.45)	764 ^b (98.84)	1 105 ^b (99.10)	962 ^b (98.97)	14 088 (95.53)
螨类 Acarina	157 ^a (5.63)	77 ^b (5.47)	6 ^c (0.20)	20 ^c (1.14)	20 ^c (1.30)	20 ^c (1.50)	8 ^c (1.03)	2 ^c (0.18)	6 ^c (0.62)	316 (2.14)
弹尾类 Collembola	97 ^a (3.48)	20 ^b (1.42)	0 ^b (0)	35 ^b (1.99)	7 ^b (0.46)	51 ^{ab} (3.82)	1 ^b (0.13)	7 ^b (0.63)	4 ^b (0.41)	222 (1.51)
轮虫 Rotifera	11 ^b (0.39)	80 ^a (5.69)	0 ^b (0)	3 ^b (0.17)	6 ^b (0.39)	0 ^b (0)	0 ^b (0)	0 ^b (0)	0 ^b (0)	100 (0.68)
线蚓科 Enchytraeidae	0 (0)	1 (0.07)	0 (0)	4 (0.23)	2 (0.13)	0 (0)	0 (0)	1 (0.09)	0 (0)	8 (0.05)
熊虫 Eutardigrada	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (0.17)	1 (0.07)	2 (0.15)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	6 (0.04)
蚁科成虫 Formicidae	1 (0.04)	0 (0)	0 (0)	1 (0.06)	1 (0.07)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3 (0.02)
步甲科幼虫 Carabidae larvae	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0.07)	1 (0.07)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	2 (0.01)
叩甲科幼虫 Elateridae larvae	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0.07)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0.01)
蜘蛛目 Araneida	1 (0.04)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	0 (0)	1 (0.01)
个体数合计 Total number of individuals	2 789 ^{ab}	1 407 ^{bc}	3 064 ^a	1 760 ^{abc}	1 533 ^{abc}	1 334 ^{bc}	773 ^c	1 115 ^c	972 ^c	14 747
类群数 Number of groups	5 ^a	5 ^{bc}	2 ^d	7 ^{ab}	9 ^{cd}	5 ^{bc}	3 ^{cd}	4 ^d	3 ^d	10

PTW. 松树林; PSW. 杨树林; AAM. 沙打旺草地; AC. 撂荒地; FL1. 农田 1; CIS. 锦鸡儿灌木林; FL2. 农田 2; TSG. 百里香草地; DG. 退化草地。表中数据为 4 次采样捕获的中小型土壤动物总个体数(只)和出现的动物类群数($n = 20$)。括弧中数据为优势度(%)。同行字母不同表示样地间差异显著($P < 0.05$)。

PTW. *Pinus tabulaeformis* woodland; PSW. *Populus simonii* woodland; AAM. *Astragalus adsurgens* meadow; AC. Abandoned cropland; FL1. Cropland 1; CIS. *Caragana intermedia* Shrub; FL2. Cropland 2; TSG. *Thymus serpyllum* grassland; DG. Degenerated grassland. The data in the table were the total individual number of soil meso- and microfauna and the number of animal groups that captured from the four sampling times ($n = 20$). The data in the brackets were dominance (%). Different letters in the same row meant significant difference at 0.05 level among plots.

(FL1)。以每样方中捕获的中小型土壤动物类群数做统计检验的结果,人工松树林(PTW)和撂荒地(AC)中小型土壤动物群落的类群数显著高于农田(FL1) ($P < 0.05$);即在农田中,4 次采样捕获的中小型土壤动物总类群数是最高的,但每样方中捕获的类群数却较低,这应该与农田的持续耕作扰动有关。

不同水土治理措施对线虫个体数的影响与中小型土壤动物群落总个体数基本类似,即在大多数水土治理措施样地中均有较农田(FL1 和 FL2)提高的趋势,但无显著差异($P > 0.05$),这与各样地中捕获的线虫数量均占总个体数比例

较高(大多数样地为 90% 以上,仅 PSW 为 87.35%)有关;仅人工沙打旺草地(AAM)中线虫数量显著高于农田(FL1) ($P < 0.05$)。螨类个体数则在人工松树林(PTW)和人工杨树林(PSW)中显著高于农田(FL1) ($P < 0.05$)。弹尾类个体数在人工松树林(PTW)中显著高于农田(FL1) ($P < 0.05$)。轮虫个体数在人工杨树林(PSW)中显著高于农田(FL1) ($P < 0.05$)。

与环境特征类似的旱作农田(FL2)比较,次生百里香草地(TSG)中小型土壤动物群落的个体数和类群数以及线虫个体数均相对较高;放牧导致百里香草地退化[即退化草地(DG)]的情

况下,中小型土壤动物群落个体数和类群数也呈降低趋势。但之间均无显著差异($P > 0.05$)。

计算了不同样地中小型土壤动物群落和主要动物类群个体数的季节变化特征(表3)。

从2008年春、夏和秋季3次采样结果看,春季捕获的中小型土壤动物群落个体数在人工松树林(PTW)中最高,并显著高于百里香草地(TSG)、位于梁峁部位的农田(FL2)和人工杨树林(PSW) ($P < 0.05$),夏季各样地间无显著差异($P > 0.05$),秋季则为人工沙打旺草地(AAM)显著较高($P < 0.05$)。

线虫在不同季节各样地之间的差别情况与中小型土壤动物群落类似,这与线虫在各次采样中均有较高的捕获量(即季节变化相对较小)有关。其他3个主要类群的季节变化则相

对明显,螨类在春季和夏季均为人工松树林(PTW)中显著较其他样地高($P < 0.05$),秋季则为人工杨树林(PSW)显著较其他样地高($P < 0.05$)。弹尾类仅2008年秋季人工松树林(PTW)中数量显著较其他样地高($P < 0.05$)。轮虫与弹尾类类似,也仅在2007年秋季人工杨树林(PSW)中数量显著较其他样地高($P < 0.05$)。

从表3还可以看出,2007年秋季和2008年秋季捕获的中小型土壤动物群落和主要类群的个体数量存在较大差别,年际之间气温、降水量和植被生长状况的差异应该是造成这种差别的主要原因。

2.2 中小型土壤动物群落多样性 选择3种多样性指数计算了不同水土治理措施对中小型

表3 不同水土治理措施下中小型土壤动物群落及主要类群的季节动态

Table 3 Seasonal dynamic of meso- and microfaunal communities and the main groups in different plots

土壤动物 Soil fauna	时间(年-月)	PTW	PSW	AC	AAM	FL1	CIS	FL2	TSG	DG
	Time (Year-month)									
土壤动物群落 Soil faunal community	2007-09	930 ^a	387 ^b	306 ^{bc}	47 ^c	78 ^c	178 ^{bc}	-	267 ^{bc}	104 ^{bc}
	2008-05	668 ^a	198 ^b	345 ^{ab}	445 ^{ab}	411 ^{ab}	296 ^{ab}	211 ^b	274 ^b	319 ^{ab}
	2008-07	267	155	321	250	156	285	173	184	165
	2008-09	924 ^b	667 ^b	788 ^b	2 322 ^a	888 ^b	575 ^b	389 ^b	390 ^b	384 ^b
线虫 Nematode	2007-09	902 ^a	286 ^b	292 ^b	45 ^b	66 ^b	176 ^b	-	267 ^b	99 ^b
	2008-05	583 ^a	191 ^b	342 ^{ab}	445 ^{ab}	404 ^{ab}	291 ^{ab}	208 ^b	272 ^{ab}	319 ^{ab}
	2008-07	230	153	309	246	156	274	167	177	160
	2008-09	807 ^b	599 ^b	751 ^b	2 322 ^a	868 ^b	519 ^b	389 ^b	389 ^b	384 ^b
螨类 Acarina	2007-09	11 ^{ab}	19 ^a	3 ^{ab}	2 ^b	10 ^{ab}	0 ^b	-	0 ^b	5 ^{ab}
	2008-05	83 ^a	7 ^b	2 ^b	0 ^b	6 ^b	5 ^b	3 ^b	2 ^b	0 ^b
	2008-07	33 ^a	2 ^b	6 ^b	4 ^b	0 ^b	8 ^b	5 ^b	0 ^b	1 ^b
	2008-09	30 ^{ab}	49 ^a	9 ^b	0 ^b	4 ^b	7 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b
弹尾类 Collembola	2007-09	4 ^a	1 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b	-	0 ^b	0 ^b
	2008-05	2	0	1	0	1	0	0	0	0
	2008-07	4	0	6	0	0	3	1	7	4
	2008-09	87 ^a	19 ^b	28 ^b	0 ^b	6 ^b	48 ^{ab}	0 ^b	0 ^b	0 ^b
轮虫 Rotifera	2007-09	11 ^b	80 ^a	3 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b	-	0 ^b	0 ^b
	2008-05	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008-07	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2008-09	0 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b	6 ^a	0 ^b	0 ^b	0 ^b	0 ^b

PTW. 松树林; PSW. 杨树林; AAM. 沙打旺草地; AC. 撂荒地; FL1. 农田1; CIS. 锦鸡儿灌木林; FL2. 农田2; TSG. 百里香草地; DG. 退化草地。表中数据为每次采样捕获的中小型土壤动物群落和主要动物类群个体数($n = 5$)。同行字母不同表示样地间差异显著($P < 0.05$)。“-”为未测定数据。

PTW. *Pinus tabulaeformis* woodland; PSW. *Populus simonii* woodland; AAM. *Astragalus adsurgens* meadow; AC. Abandoned cropland; FL1. Cropland 1; CIS. *Caragana intermedia* Shrub; FL2. Cropland 2; TSG. *Thymus serpyllum* grassland; DG. Degenerated grassland. The data in the table were the individual number of soil meso- and microfauna that from each sampling time ($n = 5$). Different letters in the same row meant significant difference at 0.05 level among plots. “-”Data were not determined.

土壤动物群落多样性的影响(表4)。

9种样地的 Shannon-Wiener 多样性指数 (H') 和 Pielou 均匀度指数 (E) 大小排序一致, 均为 PSW > PTW > CIS > AC > FL1 > FL2 > DG > TSG > AAM, Margalef 丰富度指数 (D_{Ma}) 的大小排序则为 FL1 > AC > PTW > CIS > PSW > TSG > FL2 > DG > AAM。研究结果可以说明, 人工杨树林 (PSW)、人工松树林 (PTW)、人工锦鸡儿灌木林 (CIS) 和撂荒地 (AC) 4 种水土治理措施植被中的中小型土壤动物群落的多样性 (H') 和均匀性 (E) 均较耕作农田有提高趋势; 除退化草地 (DG) 和人工沙打旺草地 (AAM) 外, 其他水土治理措施样地中小型土壤动物群落的丰富度 (D_{Ma}) 基本介于两种农田采样地之间, 即低于位于谷底的农田 (FL1), 高于位于梁砵区域的旱作农田 (FL2)。

2.3 中小型土壤动物垂直分布 图1为不同水土治理措施样地中小型土壤动物群落个体数和类群数垂直分布的统计结果。由图可以看出, 与位于谷底的农田 (FL1) 比较, 中小型土壤动物个体数在人工松树林 (PTW)、人工杨树林 (PSW)、撂荒地 (AC) 和人工沙打旺草地 (AAM) 4 种样地中垂直分布形式的显著变化是, 土壤表层中动物数量的比例明显提高, 深层明显降低; 即不同水土治理措施样地内中小型土壤动物垂直分布的表聚性特征有较农田提高的趋势。这一点在地表凋落物显著的几种样地 (即 PTW、PSW 和 AC) 中表现更加明显, 且凋

落物层中小型土壤动物数量所占比例与凋落物量的多少关系密切。位于梁砵部位的人工锦鸡儿灌木林 (GIS) 中土壤表层中小型土壤动物个体数的比例同样较农田 (FL2) 有提高趋势。

与中小型土壤动物群落类似, 不同水土治理措施样地中线虫的垂直分布也呈较农田表聚性提高的趋势。螨类和弹尾类的垂直分布在农田 (FL1) 中即显示明显的表聚性特征, 在地表凋落物积累较为显著的样地 (如 PTW 和 PSW) 中表聚性更加显著, 是两类土壤动物对水土治理措施较为一致的响应特征。

与农田 (FL2) 比较, 次生百里香草地中的中小型土壤动物群落以及线虫个体数的垂直分布显示较为明显的表聚性特征, 草地退化对其垂直分布特征的影响较小。

2.4 中小型土壤动物与土壤环境因子的相关性 图2为中小型土壤动物群落以及主要动物类群与12种环境因素变化之间的 RDA 分析结果。图中的排序轴1和2特征值分别为0.292和0.033, 土壤动物类群-环境因素相关性为0.768和0.415, 土壤动物类群-环境因素关系方差累计贡献率达到93.9%, 说明排序能较好地反映土壤动物类群与环境因素间的关系。与排序轴1呈显著正相关的环境因素是凋落物厚度、平均树(草)高、土壤有机质、土壤全氮和郁闭(盖)度; 即排序轴1主要反映以上4项环境因素的梯度变化。排序轴2则主要反映土壤全磷和速效磷的梯度变化。

表4 不同水土治理措施下中小型土壤动物群落多样性的变化

Table 4 Changes of the biodiversity of soil meso- and microfaunal community in different plots

多样性指数 Biodiversity indice	PTW	PSW	AC	AAM	FL1	CIS	FL2	TSG	DG
香农-威纳多样性指数 Shannon-Wiener index	0.397 3	0.505 8	0.205 4	0.014 2	0.155 8	0.256 8	0.067 5	0.058 4	0.064 2
Pielou 均匀度指数 Pielou evenness index	0.221 6	0.314 4	0.105 3	0.020 2	0.075 0	0.159 7	0.061 0	0.041 8	0.058 3
Margalef 丰富度指数 Margalef richness index	0.630 2	0.551 8	0.802 9	0.124 6	0.954 8	0.555 9	0.300 7	0.427 6	0.290 7

PTW. 松树林; PSW. 杨树林; AAM. 沙打旺草地; AC. 撂荒地; FL1. 农田1; CIS. 锦鸡儿灌木林; FL2. 农田2; TSG. 百里香草地; DG. 退化草地。

PTW. *Pinus tabulaeformis* woodland; PSW. *Populus simonii* woodland; AAM. *Astragalus adsurgens* meadow; AC. Abandoned cropland; FL1. Cropland 1; CIS. *Caragana intermedia* Shrub; FL2. Cropland 2; TSG. *Thymus serpyllum* grassland; DG. Degenerated grassland.

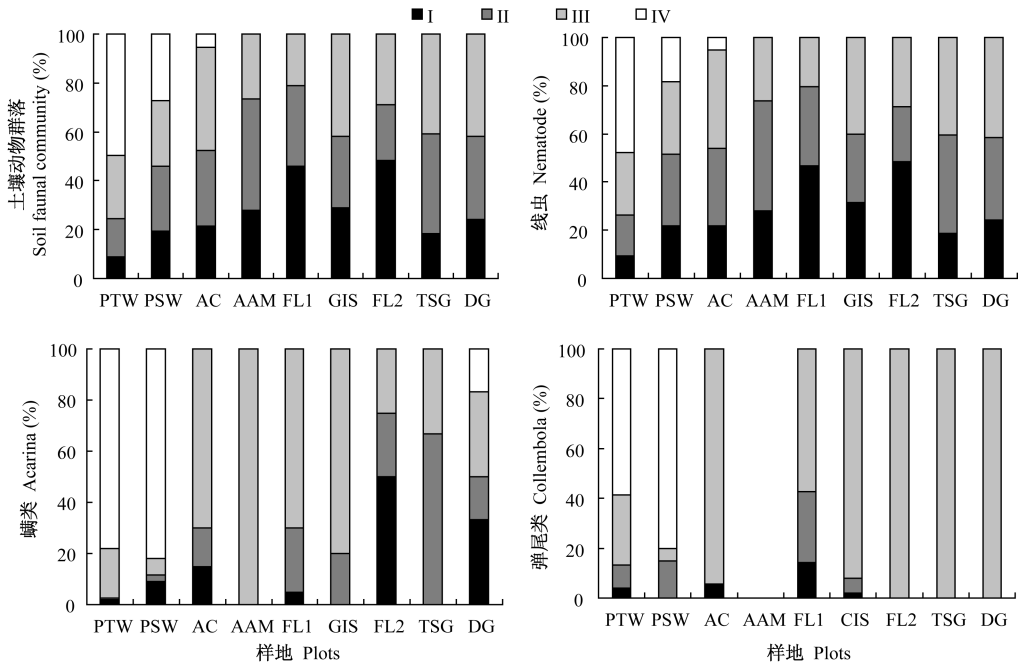


图1 不同水土治理措施下中小型土壤动物的垂直分布

Fig. 1 Vertical distribution of soil meso- and microfauna in different plots

PTW. 松树林; PSW. 杨树林; AAM. 沙打旺草地; AC. 撂荒地; FL1. 农田1; CIS. 锦鸡儿灌木林; FL2. 农田2; TSG. 百里香草地; DG. 退化草地。I. 10~15 cm; II. 5~10 cm; III. 0~5 cm; IV. 凋落物层。

PTW. *Pinus tabulaeformis* woodland; PSW. *Populus simonii* woodland; AAM. *Astragalus adsurgens* meadow; AC. Abandoned cropland; FL1. Cropland 1; CIS. *Caragana intermedia* Shrub; FL2. Cropland 2; TSG. *Thymus serpyllum* grassland; DG. Degenerated grassland. I. 10-15 cm; II. 5-10 cm; III. 0-5 cm; IV. The layer of litter.

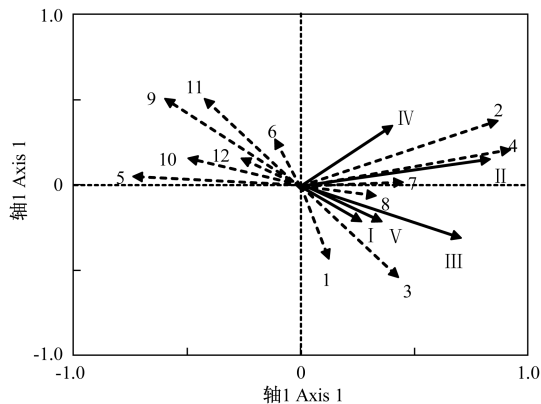


图2 中小型土壤动物与环境因子关系的 RDA 二维排序图

Fig. 2 A two dimensional graph of RDA ordination for meso- and microfauna and the environmental factors

1~12 分别为海拔、树(草)高、郁闭(盖)度、凋落物厚度、土壤含水量、土壤 pH、土壤有机质、土壤全氮、土壤全磷、土壤全钾、土壤速效磷和土壤速效钾。I. 线虫; II. 螨类; III. 弹尾类; IV. 轮虫; V. 土壤动物群落。

The figures that from one to twelve represented altitude, height of wood (grass), canopy closure (coverage), litter thickness, water content, soil pH, organic matter, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, available phosphorus and available potassium. I. Nematode; II. Acarina; III. Collembola; IV. Rotifera; V. Soil faunal community.

从图可以看出,中小型土壤动物群落以及 4 种主要动物类群均与排序轴 1 呈正相关,螨类和轮虫以及中小型土壤动物群落、弹尾类和线虫则分别与排序轴 2 呈正相关和负相关;并且,均为与排序轴 1 的相关性高于排序轴 2。即在 12 种环境因素中,凋落物厚度、平均树(草)高、土壤有机质、土壤全氮和郁闭(盖)度这 4 种因素对中小型土壤动物数量的影响较为重要。中小型土壤动物的 4 个主要类群相互比较,螨类和弹尾类与排序轴 1 的相关性更高。

3 讨论与结论

过度农耕和放牧是导致皇甫川流域环境退化的主要原因(杨劼等 2001),农田中作物的季节性生长和收获、放牧活动均可以显著改变耕作层土壤的性质及地表植被的覆被状况,从而使由风蚀(何文清等 2005)和水蚀作用引起的土壤侵蚀过程更加显著(喻锋等 2006),水土流失综合治理实践对流域范围植被状况的改善起到了明显的促进作用(杨劼等 2001,周德成等 2012)。

地表植物覆被状况是影响土壤动物群落组成和结构的重要因素之一(Mikola et al. 2001, Cole et al. 2005),持续农耕活动导致的地表覆被变化影响土壤动物的栖息环境和食物来源(Cole et al. 2005, Liu et al. 2009),对大型土壤动物密度形成负面影响(Döring et al. 2003, Asteraki et al. 2004)。皇甫川小流域综合治理试验示范内不同人工植被的种植均消除了人为耕作和放牧活动的干扰,极大地改善了土壤动物的生存条件,吸引了更多土壤动物栖居和生存(林英华等 2006,秦钟等 2009),大型土壤动物群落个体数、类群数和生物量均较耕作农田显著提高(哈斯塔米尔等 2011)。本文中,不同人工植被中的中小型土壤动物群落个体数尽管有较农田提高的趋势,但无显著差异;从群落组成角度看,中小型土壤动物群落的这种变化特征是由个体数占绝对优势的线虫决定的,在一定程度上反映了线虫对人工水土治理措施植被响应的特殊性,可能与线虫的湿生性质、相对较

短的生活史和多样地土壤水分含量的变化幅度未达到显著影响其个体数的程度有关。研究表明,皇甫川流域单一树种人工林中有导致黑绒金龟(*Serica orientalis*)和毛缺鳃金龟(*Diphycerus davidis*)大量集中发生的趋势(哈斯塔米尔等 2011),人工沙打旺草地(AAM)中线虫个体数较农田(FL1)的显著提高是否也因其中某些线虫种类的大量发生所致值得注意,并需要进一步确证。与线虫明显不同,螨类和弹尾类的个体数在人工松树林(PTW)和人工杨树林(PSW)中较在农田中显著提高,这显然与常规土壤动物分离方法提取的螨类和弹尾类大多为自由生活种类以及其干生习性有关,也说明两种人工植被种植导致的地表覆被状况变化有益于两类土壤动物的恢复。

对大多数土壤动物而言,在土壤中的垂直分布均具有表聚性特征。耕作扰动下,土壤动物的表聚性特征会发生显著变化(吴东辉等 2006 a, b)。本文中,不同水土治理措施样地中小型土壤动物群落个体数有随土层加深呈递减趋势,显示出比农田较为突出的表聚性垂直分布特征;尤其在凋落物层显著的几种水土治理措施样地(如人工松树林、人工杨树林和撂荒地)中,土壤动物个体数在凋落物层中的比例明显较高。几种主要动物类群比较,线虫在农田中的垂直分布体现相对较弱的表聚性特征,这可能与其生活习性以及本研究采集土壤的深度范围较小(0~15 cm)有关(Zhang et al. 2012),但在不同水土治理措施植被样地中的表聚性同样提高。螨类和弹尾类的垂直分布则显示明显的表聚性特征,且在地表凋落物显著的人工松树林和人工杨树林中更加突出。这显然与常规中小型土壤动物采样方法(土壤环刀取样)采集到的螨类和弹尾类大多为营自由生活的种类、并以捕食性和腐食性种类为主有关。在自然环境中,地表凋落物是螨类和弹尾类(尤其是腐食性种类)的最适生境,地表凋落物移除对其密度影响极大(吴东辉等 2006 a, b)。因此,本文中人工林(松树林、杨树林)较厚的凋落物层和较高的表层土壤有机质含量是土壤

表层中的螨类和弹尾类个体数增加的主要原因。RDA 分析中凋落物厚度和土壤有机质含量与螨类和弹尾类个体数变化之间呈显著正相关也支持这一结果。

综合以上讨论,皇甫川流域综合治理中采用的几种人工植被对中小型土壤动物的影响与大型土壤动物(哈斯塔米尔等 2011)显著不同。不同人工植被中,中小型土壤动物群落和线虫的个体数均有较农田提高的趋势,但无显著差异;螨类和弹尾类个体数较农田显著提高,这种提高在凋落物覆盖显著的样地(如人工松树林和人工杨树林)中更加明显。可以认为,几种人工水土治理植被对中小型土壤动物群落的恢复均有益;对于螨类和弹尾类的恢复则以凋落物层显著的人工松树林、杨树林更为理想。

参 考 文 献

- Asteraki E J, Hart B J, Ings T C, et al. 2004. Factors influencing the plant and invertebrate diversity of arable field margins. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 102(2): 219–231.
- Cole L, Buckland S M, Bardgett R D. 2005. Relating microarthropod community structure and diversity to soil fertility manipulations in temperate grassland. *Soil Biology & Biochemistry*, 37(9): 1707–1717.
- Döring T F, Hiller A, Wehke S, et al. 2003. Biotic indicators of carabid species richness on organically and conventionally managed arable fields. *Agriculture, Ecosystem & Environment*, 98(1/3): 133–139.
- Liu R T, Zhao H L, Zhao X Y. 2009. Soil macrofaunal response to sand dune conversion from mobile dunes to fixed dunes in Horqin sandy land, northern China. *European Journal of Soil Biology*, 45(5/6): 417–422.
- Mikola J, Yeates G W, Wardle D A, et al. 2001. Response of soil food-web structure to defoliation of different plant species combinations in an experimental grassland community. *Soil Biology & Biochemistry*, 33(2): 205–214.
- Ponge J F, Gillet S, Dubs F, et al. 2003. Collembolan communities as bioindicators of land use intensification. *Soil Biology & Biochemistry*, 35(6): 813–826.
- Zhang M, Liang W J, Zhang X K. 2012. Soil nematode abundance and diversity in different forest types at Changbai Mountain, China. *Zoological Studies*, 51(5): 619–626.
- 哈斯塔米尔, 罗瑞芳, 刘新民. 2011. 皇甫川流域大型土壤动物对不同水土治理措施的响应. *动物学杂志*, 46(6): 1–10.
- 韩芳, 邵玉琴, 赵吉, 等. 2001. 皇甫川流域不同林地土壤微生物类群的初步研究. *内蒙古林业科技*, 3(3): 5–7.
- 何文清, 赵彩霞, 高旺盛, 等. 2005. 不同土地利用方式下土壤风蚀主要影响因子研究—以内蒙古武川县为例. *应用生态学报*, 16(11): 2092–2096.
- 黄和平, 杨劼, 毕军, 等. 2005. 皇甫川流域植被恢复对改善土壤肥力的作用研究. *水土保持通报*, 25(3): 55–67.
- 贾志斌, 金争平, 刘书润. 2001. 流域治理与生物多样性恢复初步研究. *内蒙古农业大学学报: 自然科学版*, 22(3): 56–60.
- 金争平, 史培军, 侯福昌, 等. 1992. 黄河皇甫川流域土壤侵蚀系统模型和治理模式. 北京: 海洋出版社.
- 李玉娟, 吴纪华, 陈慧丽, 等. 2005. 线虫作为土壤健康指示生物的方法及应用. *应用生态学报*, 16(8): 1540–1546.
- 林英华, 孙家宝, 刘海良, 等. 2006. 黑龙江帽儿山土壤动物群落组成与多样性分析. *林业科学*, 42(4): 71–77.
- 鲁如坤. 1991. 土壤农化分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 146–238.
- 钱迎倩, 马克平. 1994. 生物多样性研究的原理与方法. 北京: 中国科学技术出版社, 141–166.
- 秦钟, 章家恩, 李庆芳. 2009. 城市化地区不同生境下中小型土壤动物群落结构特征. *应用生态学报*, 20(12): 3049–3056.
- 吴东辉, 张柏, 卜照义, 等. 2006a. 长春市不同土地利用生境土壤螨类群落结构特征. *生态学报*, 26(1): 16–25.
- 吴东辉, 张柏, 陈鹏, 等. 2006b. 长春市不同土地利用生境土壤弹尾虫群落结构特征. *生态学杂志*, 25(2): 180–184.
- 吴鹏飞, 杨大星. 2011. 若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响. *生态学报*, 31(13): 3745–3757.
- 杨劼, 高清竹, 李国强, 等. 2001. 内蒙古皇甫川流域植被空间动态变化分析. *水土保持学报*, 15(3): 41–43.
- 尹文英. 1998. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 90–387.
- 喻锋, 李晓兵, 陈云浩, 等. 2006. 皇甫川流域土地利用变化与土壤侵蚀评价. *生态学报*, 26(6): 1947–1956.
- 周德成, 赵淑清, 朱超. 2012. 退耕还林还草工程对中国北方农牧交错区土地利用/覆被变化的影响——以科尔沁左翼后旗为例. *地理科学*, 32(4): 442–449.