

DOI: 10.5846/stxb201610242166

许还,殷秀琴,马辰.长白山地典型农田生态系统土壤跳虫群落结构及其生态分布特征.生态学报,2017,37(23):8005-8014.

Xu H, Yin X Q, Ma C. Community structure and ecological distribution of soil Collembola from typical farmland ecosystems in the Changbai Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(23): 8005-8014.

长白山地典型农田生态系统土壤跳虫群落结构及其生态分布特征

许 还¹, 殷秀琴^{1,2,*}, 马 辰¹

1 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024

2 吉林省动物资源保护与利用重点实验室, 长春 130024

摘要: 为了解长白山地不同地貌类型典型农田生态系统土壤跳虫群落结构及其分布, 探讨不同地貌类型对土壤跳虫群落结构和分布及其季节动态的影响, 于 2015 年春季(5 月)、夏季(7 月)、秋季(9 月)分别对长白山地玄武岩台地、花岗岩低山、花岗岩丘陵三种地貌类型玉米田土壤跳虫进行了研究。研究表明, 3 个生境共获土壤跳虫 881 头, 隶属 10 科 16 属 22 种。其中, 玄武岩台地土壤跳虫个体密度是 1 760 头/m², 17 种; 花岗岩低山个体密度是 2 206.67 头/m², 13 种; 花岗岩丘陵个体密度是 1 906.67 头/m², 18 种。地貌及取样时间的差异对土壤跳虫个体密度、物种数、多样性指数均有一定的影响。花岗岩低山与花岗岩丘陵的个体密度和物种数大小为秋季>春季>夏季, 而玄武岩台地的个体密度和物种数表现出随季节变化呈递增的趋势($P < 0.05$)。不同地貌土壤跳虫多样性均在秋季达到最大, 夏季玄武岩台地多样性指数显著高于花岗岩低山和花岗岩丘陵, 秋季, 玄武岩台地丰富度指数和均匀度指数显著高于花岗岩低山, 玄武岩台地优势度指数显著低于花岗岩低山($P < 0.05$)。不同土壤环境因子对跳虫的影响不同, 土壤温湿度、有机质、全氮、速效氮和全磷与土壤跳虫的群落结构、生态分布有明显的相关性。综上可知, 长白山地农田生态系统土壤跳虫群落结构和生态分布因地貌类型不同而存在差异, 季节变化也对其影响明显。

关键词: 土壤跳虫; 群落结构; 生态分布; 农田生态系统; 长白山地

Community structure and ecological distribution of soil Collembola from typical farmland ecosystems in the Changbai Mountains

XU Huan¹, YIN Xiuqin^{1,2,*}, MA Chen¹

1 School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

2 Jilin Key Laboratory of Animal Resource Conservation and Utilization, Changchun 130024, China

Abstract: Soil Collembola are an important part of terrestrial ecosystems and play important roles in enhancing soil fertility and other soil properties. Furthermore, soil Collembola are good indicator species for the soil environment. At present, most studies have been concerned with community structure and ecological distribution of soil Collembola, but little research has addressed soil Collembola in the Changbai Mountains. To investigate the community structure and ecological distribution of soil Collembola from typical farmland ecosystems in the Changbai Mountains, three typical geomorphic types, including basalt platform, granite low-mountain, and granite hills, were chosen from the Changbai Mountains. The study was conducted in spring (May), summer (July), and autumn (September) of 2015. The results could help to provide a scientific basis for maintaining and managing farmland ecosystems in the Changbai Mountains. The plots (5 m × 5 m) were established using permanent signs in each maize field in the three landforms. Within each plot, we randomly selected five

基金项目: 国家自然科学基金项目(41471211)

收稿日期: 2016-10-24; 网络出版日期: 2017-08-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yinxq773@nenu.edu.cn

subplots, 10 cm × 10 cm, where we made collections from the 0—5 cm, 5—10 cm, and 10—15 cm soil layers. Soil Collembola were extracted from each of the soil sample by using a Tullgren funnel extractor. The effects of landforms and seasonal variation on the individual density and species number of soil Collembola were analyzed using a one-way ANOVA. Indexes of diversity were calculated to describe the characteristics of the soil Collembola community. The influence of soil environmental factors on soil Collembola diversity was examined using redundancy analysis (RDA). We obtained 881 collembolan individuals in the three landforms, belonging to 10 families, 16 genera, and 22 species. Significant differences were observed in individual density and species number of soil Collembola for all three landforms. The order for individual density was as follows: granite low-mountain > granite hills > basalt platform. Furthermore, the order for species number was as follows: granite hills > basalt platform > granite low-mountain. In this study, *Protaphorura* sp.1, *Proisotoma* sp.1, and *Proisotoma* sp.2 were the dominant species, accounting for 56.04%. There were 11 common species, accounting for 41.59%. In addition, eight species were rare, accounting for 2.37%. Landforms and sampling time had a significant effect on individual density, species number, and indexes of diversity of soil Collembola. In granite low-mountain and granite hills, the dynamics of individual density and species number of soil Collembola were autumn > spring > summer. In the basalt platform, the dynamics of species number of soil Collembola was autumn > summer > spring. Regardless of landform, soil Collembola had the highest diversity during autumn. The Shannon-Wiener indexes were significantly different in the three landforms during summer ($P < 0.05$), and the one-way ANOVA showed that a significantly lower abundance and richness of soil Collembola was evident in the basalt platform compared to that of the other landforms in autumn ($P < 0.05$). In addition, different environmental factors had various influences on soil Collembola. Redundancy analysis (RDA) showed that the community structure and ecological distribution of soil Collembola had obvious correlations with soil moisture, soil temperature, organic matter, total nitrogen, available nitrogen, and total phosphorus. In this study, geomorphic types and seasonal variations had significant effects on community structure and ecological distribution of soil Collembola.

Key Words: soil collembola; community structure; ecological distribution; farmland ecosystem; Changbai Mountains

长白山地是我国东北地区最高的山系和欧亚大陆北半部最具代表性的自然综合体,是中国东北的生态屏障^[1],也是我国土壤动物生态研究的“发源地”。1979年,在张荣祖研究员、陈鹏教授等倡导下成立了长白山森林生态系统定位站土壤动物组,在长白山首次开展我国土壤动物生态地理研究。近年来,学者们对长白山地土壤动物生态地理及功能作用研究,取得了丰富的资料和研究成果^[2-5]。

土壤跳虫是陆地生态系统中重要的消费者和分解者,在土壤生态系统中分布广泛,与线虫、螨虫共称为土壤动物三大优势类群,是中小型土壤动物的主要组成部分^[6]。土壤跳虫具有提高土壤肥力^[7]、改善土壤理化性质的功能,在土壤质量评价、环境污染监测、污染土壤的生物修复等方面起着重要作用^[8-9]。跳虫活动范围小、迁移能力弱,对环境变化与人为干扰十分敏感,是良好的环境指示生物^[10]。

国内外关于土壤跳虫群落结构、分布格局及与环境要素之间的关系方面已有很多报道^[11-13],但有关长白山地土壤跳虫的研究鲜见报道。农田生态系统是人类活动最活跃的部分,近年来关于农田生态系统中土壤动物生态方面研究受到广泛的关注^[14],跳虫群落结构和生态分布随着生态环境的变化而发生相应的变化,可很好的反应人类活动对其生存环境的影响,通过对农田生态系统土壤跳虫的研究,可更好的评价农田生态系统。因此,本文选取土壤跳虫为研究对象,探讨长白山地不同地貌类型农田生态系统土壤跳虫的群落结构与季节动态变化规律及其与主要环境因子的关系,为评价农田生态系统的质量,管理农田生态系统提供科学依据,同时可为长白山地农田生态系统土壤动物生态地理研究提供基础数据。

1 研究区概况

选取长白山地玄武岩台地的二道白河镇、花岗岩低山的蛟河市乌林朝鲜族自治乡以及花岗岩丘陵的左家

镇三地的玉米(*Zea mays*)田为研究样地(图1)。

玄武岩台地选择的样地位于 42°25'40"N, 128°5'44"E, 海拔 736 m。所在区域属于温带大陆性山地气候, 年均温约 3℃, 年降水量为 750 mm 左右, 无霜期约为 110 d^[1]; 地带性土壤为暗棕壤。原始植被为红松针阔混交林, 由于受到人类活动的影响, 红松针阔混交林的面积急剧减少, 形成大面积的次生林和农田。次生林主要为蒙古栎(*Quercus mongolica*)、白桦(*Betula platyphylla*)、山杨(*Populus davidiana*), 农田以种玉米为主。

花岗岩低山选择的样地位于 43°40'1"N, 127°35'21"E, 海拔 451 m。所在区域气候为典型的温带大陆性季风气候, 年平均气温约 3.4℃, 年降水量为 708 mm 左右, 无霜期约为 124 d^[1]; 地带性土壤为暗棕壤。原始植被为红松针阔混交林, 受人类活动的影响, 多为次生针阔混交林、次生落叶林, 部分地段被开垦为农田。次生林主要为蒙古栎、紫椴(*Tilia amurensis*)、花曲柳(*Fraxinus rhynchophylla*)等, 农田以种玉米为主。

花岗岩丘陵选择的样地位于 44°10'7"N, 126°05'22"E, 海拔 308 m。该区属温带大陆性季风气候, 年均温约 4℃, 气温年较差较大, 年降水量为 600 mm 左右, 无霜期约为 125 d^[15]; 地带性土壤为暗棕壤。原生植被为红松针阔叶混交林, 现生植被为次生落叶阔叶林, 部分地区开垦为农田。次生落叶阔叶混交林主要为蒙古栎、黑桦(*Betula dahurica*)、糠椴(*Tilia mandshurica*)等, 农田以种玉米为主。不同地貌类型土壤理化性质见表 1。



图 1 研究区示意图

Fig.1 The location of the study sites

表 1 不同地貌土壤理化性质

Table 1 Soil physical and chemical properties from different Landforms

地貌类型 Geomorphie types	季节 Season	SOM/%	TN/ (g/kg)	TP/ (g/kg)	TK/ (g/kg)	Ca/ (g/kg)	Mg/ (g/kg)	Mn/ (g/kg)
玄武岩台地 Basalt platform	春季	4.79	3.92	1.08	15.98	4.95	5.57	0.91
	夏季	7.43	4.63	1.31	16.85	5.33	6.04	1.08
	秋季	9.69	5.61	1.26	15.77	6.86	6.34	1.07
花岗岩低山 Granite low-mountain	春季	3.72	1.55	0.97	19.20	7.32	6.37	0.80
	夏季	5.06	2.64	1.38	17.16	7.75	6.66	0.95
	秋季	6.06	3.53	1.46	17.83	9.00	7.37	1.03
花岗岩丘陵 Granite hills	春季	4.61	2.06	1.08	20.08	7.74	6.12	0.61
	夏季	4.64	3.02	1.44	19.37	7.57	5.38	0.77
	秋季	4.54	2.09	0.71	18.68	6.21	5.20	0.74
地貌类型 Geomorphie types	季节 Season	N/ (mg/kg)	P/ (mg/kg)	K/ (mg/kg)	pH	SM/%	ST/℃	
玄武岩台地 Basalt platform	春季	333.43	43.80	127.73	5.37	15.41	19.13	
	夏季	516.37	106.80	187.31	5.00	23.96	25.73	
	秋季	461.61	11.05	153.97	5.84	22.18	16.49	
花岗岩低山 Granite low-mountain	春季	144.43	82.47	197.03	5.23	17.58	21.66	
	夏季	346.66	176.18	315.93	5.12	10.64	26.06	
	秋季	253.40	191.24	247.79	5.12	16.76	16.83	
花岗岩丘陵 Granite hills	春季	149.33	153.83	373.75	6.49	25.12	14.81	
	夏季	137.20	266.08	463.75	6.45	9.73	26.52	
	秋季	151.43	27.54	124.02	5.47	14.98	22.33	

SOM: 土壤有机质 Soil Organic Matter; TN: 全氮 Total Nitrogen; TP: 全磷 Total Phosphorus; TK: 全钾 Total Potassium; Ca: 钙 Calcium; N: 速效氮 Available Nitrogen; P: 速效磷 Available Phosphorus; K: 速效钾 Available Potassium; pH: 土壤 pH; SM: 土壤含水率 Soil Moisture; ST: 土壤温度 Soil Temperature; Mg: 镁 Magnesium; Mn: 锰 Manganese

2 研究方法

2.1 野外取样方法

2015年春季(5月)、夏季(7月)、秋季(9月)分别在长白山地玄武岩台地的二道白河镇、花岗岩低山的蛟河市乌林朝鲜族自治乡以及花岗岩丘陵的左家镇选取玉米田为研究生境,进行土壤跳虫的研究。玉米田种植采用传统耕作方式,取样期间玉米的生长期一致。首先用GPS确定各生境的地理位置与海拔高度,在各生境内设置 $5\text{ m} \times 5\text{ m}$ 样地,按对角线法选取5个样点作为重复样,取样面积为 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$,按0—5、5—10、10—15 cm层取样,带回实验室内分离土壤跳虫。并在野外使用EM50仪器分别对0—5、5—10、10—15 cm 3层土壤进行土壤温湿度的测定。在采集土壤跳虫的同时收集每层土壤样品,带回实验室待测土壤理化性质。

2.2 室内研究方法

跳虫的鉴定:采用Tullgren法分离土壤跳虫并保存于75%酒精溶液中。土壤跳虫在OLYMPUS SZX16体视镜和OLYMPUS CX41生物学显微镜下进行分类鉴定,土壤跳虫属种的鉴定参照<http://www.collembola.org/index.html>等相关鉴定方法,鉴定到种,并统计个体数量。

土壤理化性质测定:采用重铬酸钾-硫酸消化法测定土壤有机质含量(SOM),使用PHS-3B酸度计测定土壤pH,采用Smartchem140全自动化学分析仪测定土壤速效磷(P)、全氮(TN)、全磷(TP)含量,采用碱解扩散法测定土壤速效氮(N)含量,采用醋酸铵-原子吸收法测定速效钾(K)以及采用原子吸收法测定土壤全钾(TK)、钙(Ca)、镁(Mg)和锰(Mn)含量。

2.3 数据处理与统计

根据多样性公式计算各地貌土壤跳虫的Shannon-Wiener指数(H')、Pielou均匀度指数(e)、Margalef丰富度指数(D)和Simpson优势度指数(C);用one-way ANOVA分析不同地貌、季节土壤跳虫个体密度、物种数、多样性特征的差异,在进行参数检验前,对土壤跳虫个体密度、物种数、多样性指数进行 $\log(x+1)$ 转换,以满足数据的正态分布和方差齐次性。若数据转换后仍不满足参数检验条件则采用非参数检验,使用SPSS 18.0分析软件完成;使用冗余分析(RDA)来探讨土壤跳虫群落与主要环境因子间的关系,使用数据为3个样地 $\times$ 3个季节 $\times$ 5个样方,共45组数据。冗余分析采用Canoco 5.0软件完成。

3 结果与分析

3.1 不同地貌农田生态系统土壤跳虫的群落组成

3种地貌共采集土壤跳虫881头,隶属10科16属22种。其中,Isotomidae、Onychiuridae、Proisotomidae个体密度最大,占总个体密度的76.96%,其中Proisotomidae和Neanuridae均有3属,Hypogastruridae、Isotomidae有2属,其余科均有1属,Desoria、Proisotoma为优势属。3种地貌优势种有3种,分别为Protaphorura sp.1, Proisotoma sp.1, Proisotoma sp.2, 占总个体密度的56.04%;常见种有Isotomiella sp.1, Ceratophysella sp.1, Parisotoma sp.1等11种, 占总个体密度的41.59%;优势种和常见种构成了长白山地典型农田生态系统土壤跳虫的主体, 占总个体密度的97.63%。其余8种为稀有种, 仅占总个体密度的2.37%(表2)。

玄武岩台地共获取土壤跳虫17种,264头,个体密度为1760头/ m^2 ,3种地貌中个体密度最少。其中,优势种为Desoria sp.1, Protaphorura sp.1, Sminthurides sp.1, 占个体密度的56.06%,常见种有10种, 占总个体密度的42.42%,稀有种有4种, 仅占总个体密度的1.52%(表2)。

花岗岩低山共获取土壤跳虫13种,331头,个体密度为2206.67头/ m^2 ,该地貌与其他两地貌相比,个体密度最大,物种数最少。Proisotoma sp.1, Proisotoma sp.2为优势种, 占总个体密度的68.88%,常见种有6种, 占总个体密度的27.2%,稀有种有5种, 占总个体密度的3.92%(表2)。

花岗岩丘陵共获取土壤跳虫18种,286头,个体密度为1906.67头/ m^2 ,该地貌物种数最多。优势种为Protaphorura sp.1, Proisotoma sp.2, Mesaphorura sp.1, 占总个体密度的69.58%,常见种有8种, 占总个体密度的26.58%;稀有种有7种, 占总个体密度的3.84%(表2)。

表 2 不同地貌农田生态系统土壤跳虫群落组成

科 Family	属 Genus	种 Species	玄武岩台地 Basalt platform		花岗岩低山 Granite low-mountain		花岗岩丘陵 Granite hills		合计 Total	
			个体密度/ (头/m ²)	%	个体密度/ (头/m ²)	%	个体密度/ (头/m ²)	%	个体密度/ (头/m ²)	%
奇刺跳虫科 Frieseidae	<i>Friesea</i>	<i>Friesea</i> sp.1					6.67	0.35	2.22	0.12
球角跳虫科 Hypogastruridae	<i>Ceratophysella</i>	<i>Ceratophysella</i> sp.1	33.33	1.89	53.33	2.42	153.33	8.04	80	4.12
	<i>Xenylla</i>	<i>Xenylla</i> sp.1					73.33	3.85	24.44	1.28
等节跳虫科 Isotomidae	<i>Desoria</i>	<i>Desoria</i> sp.1	280	15.91	193.33	8.76	20	1.05	164.44	8.57
		<i>Desoria</i> sp.2	106.67	6.06	113.33	5.14	13.33	0.7	77.78	3.97
		<i>Desoria</i> sp.3	40	2.27					13.33	0.76
	<i>Isotomiella</i>	<i>Isotomiella</i> sp.1	40	2.27	80	3.63	53.33	2.8	57.78	2.9
磷长跳虫科 Lepidocyrtidae	<i>Lepidocyrtus</i>	<i>Lepidocyrtus</i> sp.1	73.33	4.17	6.67	0.3			26.67	1.49
		<i>Lepidocyrtus</i> sp.2	6.67	0.38					2.22	0.13
		<i>Lepidocyrtus</i> sp.3	6.67	0.38			6.67	0.35	4.45	0.24
	<i>Anurida</i>	<i>Anurida</i> sp.1	6.67	0.38			13.33	0.7	4.44	0.23
疣跳虫科 Neanuridae	<i>Deutunura</i>	<i>Deutunura</i> sp.1								
	<i>Paranura</i>	<i>Paranura</i> sp.1					20	1.05	6.67	0.35
	<i>Protaphorura</i>	<i>Protaphorura</i> sp.1	480	27.27	73.33	3.32	753.33	39.51	435.55	23.37
齿跳虫科 Odontellidae	<i>Superodontella</i>	<i>Superodontella</i>	6.67	0.38	20	0.91	53.33	2.8	26.67	1.36
	<i>Proisotoma</i>	<i>Proisotoma</i> sp.1	93.33	5.3	1013.33	45.92	106.67	5.59	404.44	18.94
原等跳虫科 Proisotomidae		<i>Proisotoma</i> sp.2	93.33	5.3	506.67	22.96	246.67	12.94	282.22	13.73
	<i>Folsomia</i>	<i>Folsomia</i> sp.1			20	0.91			6.67	0.3
	<i>Parisotoma</i>	<i>Parisotoma</i> sp.1	80	4.55	86.67	3.93	26.67	1.4	64.45	3.29
掘角圆跳虫科 Sminthuridae	<i>Sminthurides</i>	<i>Sminthurides</i> sp.1	226.67	12.88	20	0.91	13.33	0.7	86.67	4.83
		<i>Sminthurides</i> sp.2	66.67	3.79	20	0.91	13.33	0.7	33.33	1.8
	<i>Mesaphorura</i>	<i>Mesaphorura</i> sp.1	120	6.82			326.67	17.13	148.89	7.98
合计 Total			1 760		2 206.67		1 906.67		1 957.78	

注: 多度等级: 个体密度占总个体密度>10%代表优势种, 个体密度占总个体密度 1%—10%代表常见种, 个体密度占总个体密度<1%代表稀有种

3 种地貌土壤跳虫的优势种和常见种存在一定的差异,花岗岩低山与花岗岩丘陵优势种、常见种、稀有种所占比重相近,而玄武岩台地三者的比重较花岗岩低山、花岗岩丘陵相差较大。玄武岩台地和花岗岩丘陵个体密度和物种数相近,而花岗岩低山相差较大。*Friesea* sp.1, *Xenylla* sp.1, *Deutonura* sp.1, *Paranura* sp.1 4 物种仅出现在花岗岩丘陵中, *Desoria* sp.3, *Lepidocyrtus* sp.2 2 物种仅出现在玄武岩台地中, *Folsomia* sp.1 仅出现在花岗岩低山中。

3.2 不同地貌农田生态系统土壤跳虫水平分布特征与季节动态

长白山地不同地貌农田生态系统土壤跳虫在整体上看,个体密度为花岗岩低山>玄武岩台地>花岗岩丘陵,物种数为花岗岩丘陵>玄武岩台地>花岗岩低山。同一季节不同地貌土壤跳虫的个体密度和物种数存在差异(图2)。春季花岗岩低山土壤跳虫的个体密度显著高于玄武岩台地和花岗岩丘陵($P < 0.05$),夏季,玄武岩台地的个体密度和物种数最大,花岗岩丘陵次之,花岗岩低山最少,但各地貌个体密度和物种数差异不大($P > 0.05$);秋季,土壤跳虫的个体密度表现为花岗岩低山>花岗岩丘陵>玄武岩台地,3 个地貌间差异不显著($P > 0.05$)。春季花岗岩低山的物种数显著高于玄武岩台地($P < 0.05$),而其他均未达到显著性差异($P > 0.05$)。

不同地貌农田生态系统土壤跳虫群落的个体密度与物种数存在明显的季节差异。花岗岩低山与花岗岩丘陵的个体密度大小为秋季>春季>夏季,秋季显著高于春季和夏季($P < 0.05$);玄武岩台地的个体密度表现出随季节变化递增的趋势,秋季显著高于春季($P < 0.05$)。3 种地貌土壤跳虫物种数的季节变化规律与个体密度的季节变化规律相一致,玄武岩台地和花岗岩丘陵秋季物种数显著高于春季和夏季,花岗岩低山夏季物种数显著低于春季和秋季($P < 0.05$)(图2)。

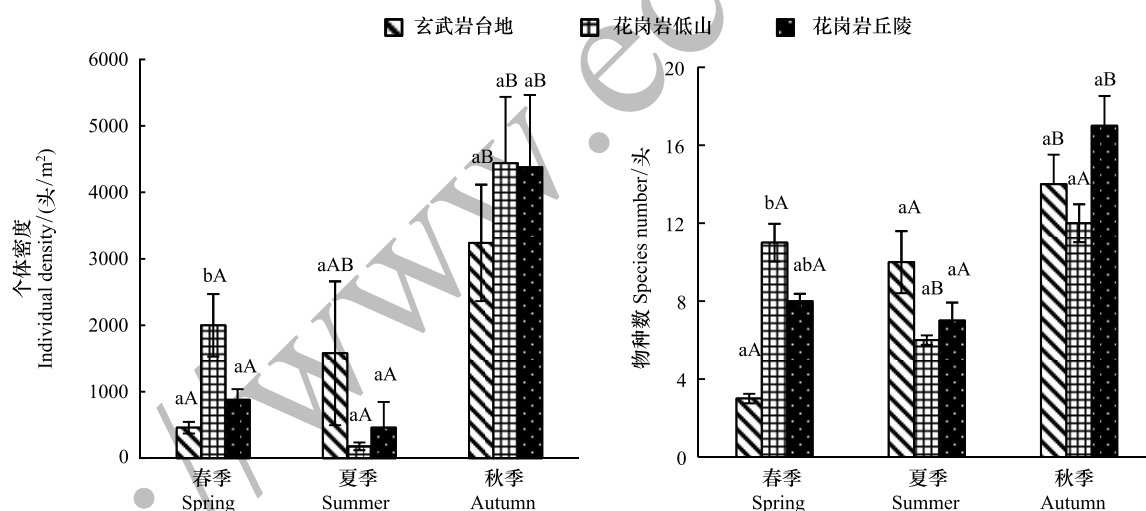


图2 不同地貌农田生态系统土壤跳虫个体密度和物种数季节动态(均值±标准误)

Fig.2 Densities and species numbers of soil Collembola of farmland ecosystem from different landforms (Mean±SE)

小写字母代表同一季节不同地貌的差异显著性($P < 0.05$),大写字母表示同一地貌不同季节的差异显著性($P < 0.05$)

3.3 不同地貌农田生态系统土壤跳虫的多样性特征及其季节动态

同一季节不同地貌土壤跳虫的多样性特征各不相同。就物种数而言:春季,花岗岩低山多样性最高,夏季,玄武岩台地最高,秋季,花岗岩丘陵最高。通过对长白山地不同地貌土壤跳虫多样性特征进行分析,从各项指标来看(图3),春季,玄武岩台地和花岗岩丘陵的均匀度指数显著高于花岗岩低山($P < 0.05$),多样性指数花岗岩丘陵>花岗岩低山>玄武岩台地,3 个地貌间差异不显著($P > 0.05$);夏季,玄武岩台地多样性最高,显著高于花岗岩低山和花岗岩丘陵($P < 0.05$),其他指数未达到显著差异($P > 0.05$)。秋季,玄武岩台地的均匀度指数和丰富度指数显著高于花岗岩低山和花岗岩丘陵($P < 0.05$),而玄武岩台地的优势度指数显著低于花岗岩低山和花岗岩丘陵($P < 0.05$)。

同一地貌不同季节土壤跳虫的多样性特征存在差异。从各项指标看,秋季多样性指数在各地貌中均最大,玄武岩台地秋季多样性指数显著高于春季($P < 0.05$),花岗岩低山与花岗岩丘陵夏季多样性特征指数显著低于春季和秋季($P < 0.05$);花岗岩丘陵夏季均匀度指数显著低于春季($P < 0.05$),花岗岩丘陵秋季的丰富度指数显著高于夏季($P < 0.05$),花岗岩低山的丰富度指数春季显著高于夏季($P < 0.05$)。花岗岩低山的优势度指数夏季显著低于春季和秋季($P < 0.05$),花岗岩低山春季显著高于夏季($P < 0.05$)。其他均为达到显著性差异($P > 0.05$)。

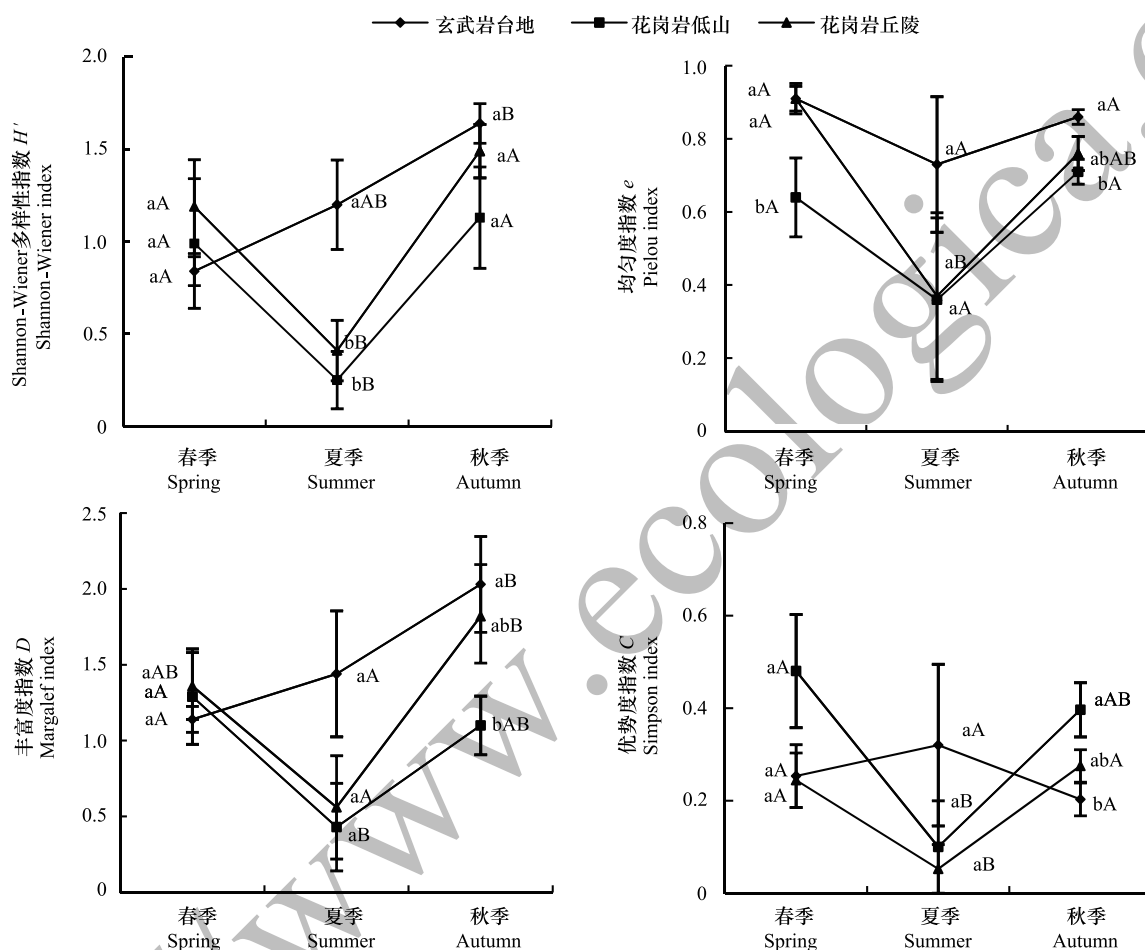


图3 不同地貌农田生态系统土壤跳虫多样性特征指数季节动态(均值±标准误)

Fig.3 Biodiversity indexes of soil Collembola of farmland ecosystem from different landform (Mean±SE)

小写字母代表同一季节不同地貌的差异显著性($P < 0.05$),大写字母表示同一地貌不同季节的差异显著性($P < 0.05$)

3.4 土壤跳虫群落与环境因子的关系

本文选用冗余分析(RDA)探讨土壤跳虫与主要环境因子之间的关系。第一排序轴解释了62%的物种-环境因子关系信息,前两个排序轴解释了100%的物种-环境因子关系。经蒙特卡洛检验物种和环境因子的 P 值均为0.001,说明RDA排序分析可靠。排序轴1主要反映了全磷、镁、pH对土壤跳虫分布的影响,排序轴2主要反映了土壤含水率、全氮、速效氮、海拔、有机质、钙、土壤温度、速效磷、全钾、速效钾对土壤跳虫分布的影响。从RDA分析图中可以看出,不同类群受环境因子的影响程度存在明显的不同。*Protaphorura*、*Mesaphorura*与Mg呈负相关关系;*Desoria*与Mn呈正相关关系,而对pH呈负相关;*Parisotoma*与土壤湿度成负相关关系;*Sminthurides*、*Lepidocyrtus*与N,SOM存在正相关关系。不同属的跳虫对土壤环境因子的响应不同。

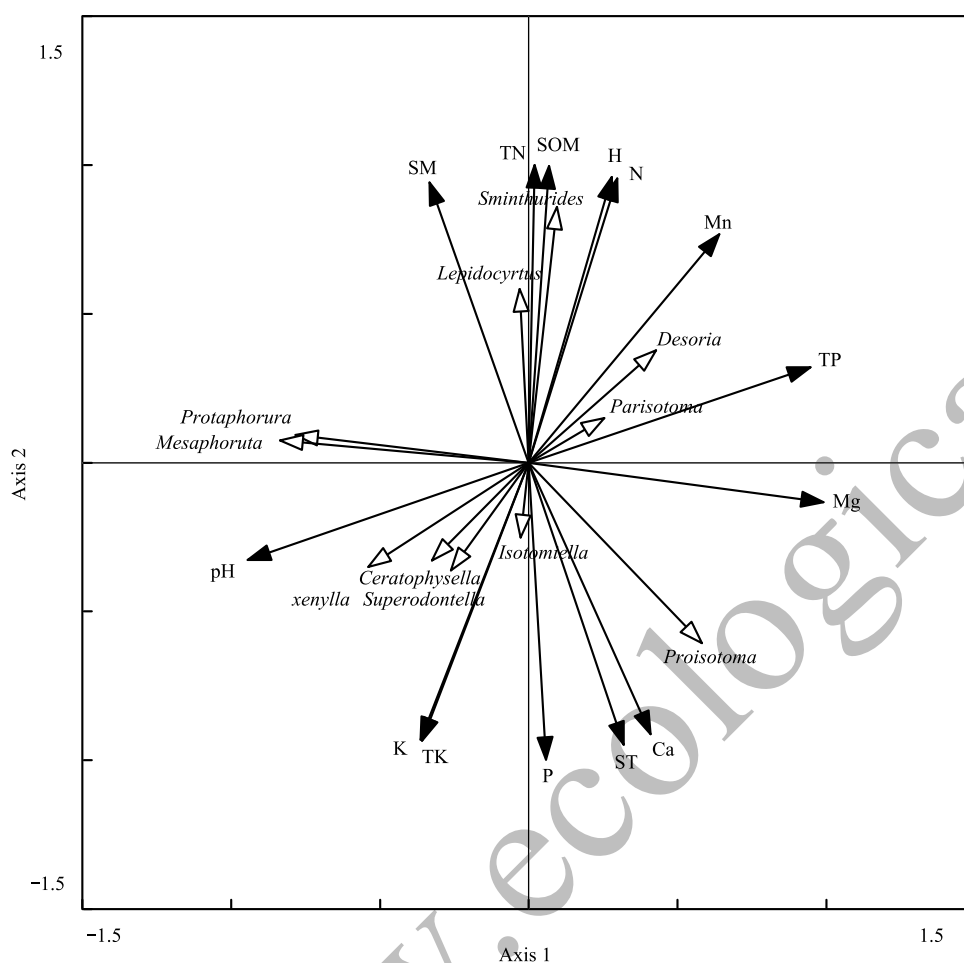


图4 土壤跳虫与主要环境因子的 RDA 分析

Fig.4 RDA analysis between soil Collembola and main soil environmental factors

SOM:土壤有机质 Soil Organic Matter; TN:全氮 Total Nitrogen; TP:全磷 Total Phosphorus; TK:全钾 Total Potassium; Ca:钙 Calcium; N:速效氮 Available Nitrogen; P:速效磷 Available Phosphorus; K:速效钾 Available Potassium; pH: 土壤 pH; SM:土壤含水率 Soil Moisture; ST:土壤温度 Soil Temperature; Mg: 镁 Magnesium; Mn: 锰 Manganese; H: 海拔 Height; *Ceratophysella*: 泡角跳虫属; *Xenylla*: 奇跳属; *Desoria*: 德跳属; *Isotomiella*: 小等跳属; *Lepidocyrtus*: 鳞长跳属; *Proisotoma*: 原等跳属; *Sminthurides*: 握角圆跳属; *Protaphorura*, *Superodontella*, *Parisotoma*, *Mesaphorura* 暂无中文命名

4 讨论

4.1 不同地貌农田生态系统土壤跳虫群落结构特征

土壤跳虫群落结构和生态分布受到多种因素的影响,比如受地上植被、地形、土壤类型等生态条件的影响,还与土地利用方式^[16]、试验处理、取样时间等有关。大量研究显示:不同耕作方式、不同人为干扰程度与农田生态系统土壤动物的群落结构和生态分布存在密切关系^[17-18]。本研究对长白山地典型农田生态系统土壤跳虫进行研究,获得土壤跳虫仅有 10 科 16 属 22 种,明显低于森林生态系统^[19]。这由于本研究选址农田生态系统,受人为干扰程度大,土壤环境恶化,土壤的压实度增加有关。

本研究发现,花岗岩低山土壤跳虫个体密度最大,多样性最低;玄武岩台地多样性较高。这与各地貌土壤温湿度条件和土壤养分含量密切相关。花岗岩低山地区较低的湿度条件,适合 *Proisotoma* 的生存繁殖,且 *Proisotoma* 抵御人类的干扰能力强^[20],*Proisotoma* 个体数量大量增加,占该地貌总个体密度的 68.88%,增大了花岗岩低山土壤跳虫的个体密度,花岗岩低山的个体密度最大。该地貌人类农业活动比较频繁,翻耕、施肥、

喷洒农药等农业活动致使土壤跳虫的生存环境极不稳定;此外该地貌土壤成熟度较低,在采样过程中发现土壤中夹杂着未壤化的岩石砂砾,地貌条件及人为干扰导致该地貌土壤跳虫物种数减少,多样性降低。生境间土壤养分含量的差异,导致土壤动物多样性存在差异^[21],玄武岩台地物种多样性和丰富度高,这与玄武岩台地土壤有机质、全氮、速效氮等含量高有关。Cole 等^[22]的研究表明,温带土壤动物群落结构和多样性与土壤肥力呈明显的正相关,肥力越高,土壤动物多样性越丰富,本研究中玄武岩台地土壤有机质含量高,充足的土壤养分为土壤跳虫的生存提供了丰富的食物,致使物种丰富度较高。此外,玄武岩台地地区的农田生态系统地形相对平坦,经营方式较粗放,人为干扰程度低,土壤环境相对稳定,利于土壤跳虫的生存繁殖。

4.2 农田生态系统土壤跳虫群落季节动态

土壤跳虫的季节变化是其生长、繁殖和世代交替的时间变化过程,因地貌和气候条件的变化而发生相应的波动,土壤跳虫的季节变化体现在个体密度、物种数及不同生境多样性指数的变化上,这种变化体现了不同跳虫类群对环境的不同适应能力^[15]。花岗岩低山和花岗岩丘陵的个体密度随季节的变化均表现为先减后增,而玄武岩台地表现出递增趋势。相关研究表明,由于春季耕作,农机具对土壤结构的破坏以及频繁的干湿循环致使受到团块保护的有机质暴露,进而加快了有机质的降解^[23],致使玄武岩台地春季土壤有机质含量较少,跳虫的食物不足,影响了土壤跳虫的生长。土壤动物数量与土壤温湿度、土壤有机质、全氮成正相关^[3]。夏季和秋季,农田施肥使得土壤有机质、全氮含量明显增加,供给跳虫的养分较多,促进了土壤跳虫的生存繁殖,个体密度增大。花岗岩低山和花岗岩丘陵地区夏季温度很高而土壤含水率较低,且施肥等活动对跳虫干扰较大,因此不利于土壤跳虫的生存和繁衍,进而造成其夏季个体密度最低。土壤湿度是土壤动物分布的限制因子,水分限制又是双向的,土壤水分缺乏时随湿度增加而增大,在土壤水分丰沛时则随湿度增加而降低^[24]。玄武岩台地与花岗岩低山由于秋季土壤较为湿润且有机质、全氮含量丰富,养分较多,有利于土壤跳虫的生存^[25],从而造成了秋季各地貌个体密度和物种数均达最大;除此之外,秋季玉米处于成熟期,人为干扰程度较小,土壤环境稳定,利于跳虫生存繁殖。

5 结论

不同地貌农田生态系统土壤跳虫的个体密度和物种数存在一定的差异。个体密度为花岗岩低山>玄武岩台地>花岗岩丘陵,物种数表现为花岗岩丘陵>玄武岩台地>花岗岩低山。不同地貌土壤跳虫群落随季节变化不同。玄武岩台地个体密度和物种数表现为随季节变化而增加,花岗岩低山和花岗岩丘陵随季节变化是先减后增,夏季达最低。

地貌差异和时间变化对土壤跳虫多样性特征有一定的影响。各地貌多样性指数均在秋季达到最大,夏季,玄武岩台地多样性指数显著高于花岗岩低山和花岗岩丘陵,花岗岩丘陵夏季均匀度指数显著低于春季,花岗岩低山夏季多样性指数和丰富度指数显著低于春季。

不同土壤跳虫与土壤环境因子之间相关性不尽相同。*Protaphorura*、*Mesaphorura* 与 Mg 呈负相关关系;*Desoria* 与 Mn 呈正相关关系,而对 pH 呈负相关;*Parisotoma* 与土壤湿度成负相关关系;*Sminthurides*、*Lepidocyrtus* 与 N, SOM 存在正相关关系。土壤跳虫的生态分布主要受土壤含水率、土壤温度、土壤有机质、土壤 pH、速效氮、全氮等土壤环境因子的影响。说明土壤跳虫与土壤环境因子之间存在一定的相关性。不同物种受环境因子的响应程度存在一定的差异性。

参考文献 (References):

- [1] 王野乔, 吴正方, 冯江. 长白山地理系统与生态安全(第四辑). 长春: 东北师范大学出版社, 2011.
- [2] Yin X Q, Song B, Dong W H, Xin W D, Wang Y Q. A review on the eco-geography of soil fauna in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2010, 20(3): 333-346.
- [3] 殷秀琴, 薛文丽, 马辰. 长白山玄武岩台地土壤动物多样性及其生态地理分布. *地理科学*, 2016, 36(7): 1106-1114.
- [4] Jiang Y F, Yin X Q, Wang F B. Composition and spatial distribution of soil mesofauna along an elevation gradient on the north slope of the

- Changbai Mountains, China. *Pedosphere*, 2015, 25(6): 811-824.
- [5] Li X Q, Yin X Q, Wang Z H, Fan W H. Interaction between decomposing litter and soil fauna of the *Betula ermanii* forest floor of the Changbai Mountains, China. *Canadian Journal of Forest Research*, 2014, 44(12): 1507-1514.
- [6] Rusek J. Biodiversity of Collembola and their functional role in the ecosystem. *Biodiversity and Conservation*, 1998, 7(9): 1207-1219.
- [7] Filser J. The role of Collembola in carbon and nitrogen cycling in soil: proceedings of the Xth international colloquium on Apterygota, České Budějovice 2000: Apterygota at the Beginning of the Third Millennium. *Pedobiologia*, 2002, 46(3-4): 234-245.
- [8] Fountain M T, Hopkin S P. Continuous monitoring of *Folsomia candida* (Insecta: Collembola) in a metal exposure test. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2001, 48(3): 275-286.
- [9] 陈建秀, 麻智春, 严海娟, 张峰. 跳虫在土壤生态系统中的作用. *生物多样性*, 2007, 15(2): 154-161.
- [10] 孙元. 我国不同生态系统中弹尾虫研究进展. *国土与自然资源研究*, 2014, (2): 83-84.
- [11] Alvarez T, Frampton G K, Goulson D. Epigeic Collembola in winter wheat under organic, integrated and conventional farm management regimes. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2001, 83(1-2): 95-110.
- [12] Larsen T, Ventura M, O'Brien D M, Magid J, Lomstein B A, Larsen J. Contrasting effects of nitrogen limitation and amino acid imbalance on carbon and nitrogen turnover in three species of Collembola. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(4): 749-759.
- [13] Bandow C, Coors A, Karau N, Römcke J. Interactive effects of lambda-cyhalothrin, soil moisture, and temperature on *Folsomia candida* and *Sinella curviseta* (Collembola). *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2014, 33(3): 654-661.
- [14] 杨旭, 林琳, 张雪萍, 张利敏, 沙迪. 松嫩平原典型黑土耕作区中小型土壤动物时空分布特征. *生态学报*, 2016, 36(11): 3253-3260.
- [15] 单昱, 蒋云峰, 殷秀琴, 王振海. 左家自然保护区采伐迹地土壤动物群落特征. *应用与环境生物学报*, 2014, 20(3): 508-515.
- [16] Chang L, Wu H T, Wu D H, Sun X. Effect of tillage and farming management on Collembola in marsh soils. *Applied Soil Ecology*, 2013, 64(64): 112-117.
- [17] 战丽莉, 许艳丽, 张兴义, 潘凤娟, 裴希超, 刘振宇. 耕作方式对中小型土壤动物多样性影响. *生态学杂志*, 2012, 31(9): 2371-2377.
- [18] 王广力, 王勇, 韩立亮, 张美文, 李波. 洞庭湖区不同土地利用方式下的土壤动物群落结构. *生态学报*, 2005, 25(10): 2629-2636.
- [19] 王宗英, 朱永恒, 路有成, 聂献忠, 陈建秀, 孟文新, 黄诚. 九华山土壤跳虫的生态分布. *生态学报*, 2001, 21(7): 1143-1147.
- [20] 吴东辉, 尹文英, 李月芬. 刈割和封育对松嫩草原退化羊草草地土壤跳虫群落的影响. *草业学报*, 2008, 17(5): 117-123.
- [21] 殷秀琴, 蒋云峰, 陶岩, 安静超, 辛未冬. 长白山红松阔叶混交林土壤动物生态分布. *地理科学*, 2011, 31(8): 935-940.
- [22] Cole L, Dromph K M, Boaglio V, Bardgett R D. Effect of density and species richness of soil mesofauna on nutrient mineralisation and plant growth. *Biology and Fertility of Soils*, 2004, 39(5): 337-343.
- [23] 杨景成, 韩兴国, 黄建辉, 潘庆民. 土壤有机质对农田管理措施的动态响应. *生态学报*, 2003, 23(4): 787-796.
- [24] Sinka M, Jones T H, Hartley S E. The indirect effect of above-ground herbivory on Collembola populations is not mediated by changes in soil water content. *Applied Soil Ecology*, 2007, 36(2-3): 92-99.
- [25] Cassagne N, Gauquelin T, Bal-Serin M C, Gers C. Endemic Collembola, privileged bioindicators of forest management. *Pedobiologia*, 2006, 50(2): 127-134.