

DOI: 10.13332/j.1000-1522.20170045

不同生境土壤跳虫及地表节肢动物群落结构和多样性特征

何振^{1,2} 赵琴² 李迪强¹ 李密^{2,3} 谷志容⁴

(1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所,国家林业局森林生态环境重点实验室 2 湖南省林业科学院

3 国家油茶工程技术研究中心 4 湖南八大公山国家级自然保护区管理处)

摘要:为探明天然次生林和人工油茶林土壤节肢动物多样性特征及其变化规律,基于 Tullgren 干漏斗法和罐诱法对八大公山亮叶水青冈林、枫香林、光皮桦林、栲树林和耒阳市南京乡半垦复油茶幼林、全垦复油茶幼林、全垦复油茶成林、未垦复油茶成林 8 种生境的土壤跳虫和地表节肢动物群落结构及多样性特征进行研究。Tullgren 干漏斗法共分离出土壤跳虫 1 830 头,隶属 4 目 10 科 19 属;罐诱地表节肢动物 12 目 24 科 34 属 1 136 头。分析结果表明:天然次生林土壤跳虫的多样性显著高于人工油茶林,多样化的地表植被和凋落物有利于提高土壤跳虫的多样性,但对地表节肢动物没有显著影响;而油茶人工林不同垦复方式对跳虫群落和地表节肢动物结构及多样性均影响显著,适当垦复对于增加土壤动物的多样性具有积极作用。

关键词:土壤跳虫;节肢动物;生境;群落;多样性

中图分类号:S154.5 文献标志码:A 文章编号:1000-1522(2017)05-0098-11

HE Zhen^{1,2}; ZHAO Qin²; LI Di-qiang¹; LI Mi^{2,3}; GU Zhi-rong⁴. **Structure and diversity of soil collembolan and aboveground arthropod communities under different habitats.** *Journal of Beijing Forestry University*(2017)39(5) 98-108 [Ch, 44 ref.]

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment of State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091, P. R. China;

2 Hunan Academy of Forestry, Changsha, Hunan, 410004, P. R. China;

3 National Engineering Research Center for Oil-tea Camellia, Changsha, Hunan, 410004, P. R. China;

4 Administration Bureau of Badagongshan National Nature Reserve, Sangzhi, Hunan, 427100, P. R. China.

In order to explore the impact of vegetation types of natural secondary forest and the reclamation types of artificial *Camellia oleifera* forest on the soil fauna biodiversity, we investigated the community structure and diversity characteristics of soil collembolan and other arthropods in 4 types of natural secondary forest in Badagong Mountains National Nature Reserve and 4 types of artificial *Camellia oleifera* forest in Nanjing Township, Leiyang City, Hunan Province of southern China based on Tullgren dry funnel method and pitfall trap method. We captured 1 830 soil collembolan which belonging to 4 orders, 10 families and 19 genera by Tullgren dry funnel method; and 1 136 other soil arthropods which belonging to 12 orders, 24 families and 34 genera by pitfall trap method. The analysis results indicated that: 1) the soil collembolan biological diversity of natural secondary forest was significantly higher than artificial *Camellia oleifera* forest. 2) The multiplex component of surface vegetation and litter were beneficial to improving the diversity of soil collembolan, but no obvious impact on the surface arthropods. 3) Proper reclaiming type was helpful to increase the biological diversity of soil fauna by promoting both the soil collembolan and surface soil arthropod community diversity.

收稿日期:2017-02-22 修回日期:2017-03-06

基金项目:“十三五”国家科技支撑计划项目(2013BAC09B02)。

第一作者:何振,博士生,高级工程师。主要研究方向:自然保护区与生物多样性。Email:hezhen531@sina.com 地址:410004 湖南省长沙市韶山南路 658 号湖南省林业科学院。

责任作者:李迪强,研究员,博士生导师。主要研究方向:保护生物学。Email:lidq@caf.ac.cn 地址:100091 北京市海淀区香山路东小府 1 号中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

Key words soil collembolan; arthropod; habitat; community; diversity

土壤动物是人类重要的生物资源和自然生态系统的重要组成部分^[1-3]。土壤节肢动物是土壤生态系统重要类群,在生态系统物质循环和能量转换中发挥着积极作用^[4]。其类群数、个体密度、多样性指数等群落结构特征可作为反映土壤环境质量状况和生态系统变化的量化指标^[5-7]。因而对不同生态系统土壤节肢动物群落结构、多样性及生态功能的研究广受关注^[2,5]。然而,国内外关于土壤节肢动物的研究主要集中在森林^[8-10]、草地^[11-12]、农田^[13-14]或城市用地^[15]等单一生态系统,对不同植被类型和耕作方式对土壤节肢动物群落结构与多样性的影响对比研究较少^[16-18]。

尽管天然林在净化空气、保持水土、涵养水源、减少自然灾害以及保持生物多样性等方面有着人工林无可替代的优势,但随着社会经济发展和人口迅速增长,人工林面积逐年扩大,对生态环境的影响也日益凸显。在南方各省,优质木本食用油料树种——油茶(*Camellia oleifera*)种植历史悠久,分布广泛。为了追求更高的经济效益,人工油茶林一般采用精细化管理,定期进行垦复、施肥和病虫害防治,而过多的人为干扰势必加剧对生态环境的破坏。向昌国等^[19]曾对八大公山国家级自然保护区(以下简称八大公山)的森林土壤动物群落多样性做过初步的调查研究,研究结果表明螨类、弹尾类、线虫类和线蚓类为优势类群,占全捕量的88.67%,是该区土壤动物的主体。此后十多年来,未见对该区土壤动物分布特征的详细研究报道。本文拟通过研究天然林与人工油茶林土壤节肢动物群落结构及其与地表植被、耕作方式等因子间的关系,探讨生物多样性保护途径和人工油茶林健康经营方式,以期合理利用土地资源,科学开展自然保护区建设和管理提供参考,从而使经济效益与生态效益达到最佳平衡,防止生态环境进一步恶化。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

天然林样地位于湖南省桑植县西北部的八大公山,属于亚热带山地湿润季风气候,年平均气温为11.5℃,年平均降水量为2 105.4 mm,全年相对湿度在90%以上,最高海拔1 890.4 m^[20]。天然林所选生境分别为:生境Ⅰ落叶阔叶林,优势树种为亮叶水青冈(*Fagus lucida*),主要植被包括多脉青冈(*Cyclobalanopsis multinervis*)、云锦杜鹃(*Rhododendron fortunei*)、茶叶山矾(*Symplocos*

theaeifolia)等。生境Ⅱ常绿落叶阔叶混交林,优势树种为枫香(*Liquidambar formosana*),主要植被有中华猕猴桃(*Actinidia chinensis*)、中华石楠(*Photinia beauverdiana*)、水马桑(*Weigela japonica*)等。生境Ⅲ常绿落叶阔叶混交林,优势树种为光皮桦(*Betula luminifera*),主要植被包括青柞槭(*Acer davidii*)、鹅耳枥(*Carpinus turczaninowii*)、黄檀(*Dalbergia hupeana*)。生境Ⅳ沟谷常绿阔叶林,优势树种为丝栗栲(*Castanopsis fargesii*),主要植被包括刨花润楠(*Machilus pauhoi*)、锥栗(*Castanea henryi*)、拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*)、木荷(*Schima superba*)等。

人工油茶林样地位于湖南省的“油茶之乡”——耒阳市南京乡,是油茶林的主要分布区,其中在湖南省耒阳市现有油茶林8万hm²,年产茶油5×10⁶ kg。该地区为低山丘陵地带,属亚热带季风湿润气候区,年平均气温17.9℃,年平均降水量为1 337 mm,日照时间1 640 h左右。4种生境油茶林样地分别为:生境Ⅴ半垦复人工油茶幼林,地表植被较丰富,平均盖度0.4,有箬竹(*Indocalamus tessellatus*)、五节芒(*Miscanthus floridulus*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)和白茅(*Imperata cylindrica* var. *major*)等;生境Ⅵ全垦复人工油茶幼林,地表几乎没有其他植被和凋落物;生境Ⅶ全垦复人工油茶成林,地表植被稀少,平均盖度小于0.1;生境Ⅷ未垦复人工油茶成林,地表植被较少,平均盖度0.2,主要有芒萁和五节芒等。各生境基本情况见表1。

1.2 研究方法

1.2.1 采样、分离和鉴定

于2013年10月底至11月初,在选定的8个样地中各随机设置5个20 m×30 m的样方,每个样方按5点取样法设5个相距5 m以上的采样点,每个采样点按凋落物层和其下的真土层分别进行采样。凋落物层取样时,用面积为20 cm×20 cm的木制框放置在地表,收集框内凋落物和腐殖质;然后在其下的真土层用直径为5 cm的土钻钻取15 cm深的土样。采集的凋落物层和土壤层样品分别装入PE自封袋带回实验室。收集跳虫共设置取样80个(8个样地×5个样方×2层),由于全垦复油茶幼林地几乎没有凋落物,实际取样75个。把土壤和凋落物样品分别用改进的Tullgren干漏斗法分离48 h,将土壤动物标本收集到75%的酒精中固定。分离出的跳虫被制作成玻片标本置于解剖镜下观察其形态,进行分类鉴定和数量统计。分类检索方法参考

尹文英^[21-22]和 Bellinger 等^[23]共同修改的跳虫分类系统,鉴定到属。在每个样地采集完凋落物和土样后,再在选定的样方中随机设置1个面积为1 m²的样点,在样点的4个角和对角线交叉处各挖坑放置1个一次性纸杯(口径8.0 cm,底径6.0 cm,高7.8 cm),杯口与地表齐平,内盛50 mL糖醋液用于诱集

地表节肢动物。5 d后将纸杯取回,收集诱集到的地表土壤动物。共取回诱罐200个,每个样点的5个诱罐合并算一个重复,计算时样品个数为8个样地×5个样方=40个。节肢动物分类参考尹文英的《中国土壤动物检索图鉴》^[22]和《湖南省森林昆虫图鉴》^[24],一般鉴定到属,个别类群鉴定到科。

表1 样地基本情况

Tab. 1 Basic situation of sample plots

生境 Habitat	林型 Forest type	优势树种 Dominant species	演替阶段或林龄/a Stage of succession or stand age/year	经纬度 Geographic location	坡位 Slope position	海拔 Altitude/ m
I	落叶阔叶林 Broadleaved deciduous forest	亮叶水青冈 <i>Fagus lucida</i>	天然次生林 Natural secondary forest	111°05'34" E, 29°47'22" N	南 South	1 455
	落叶常绿阔叶混交林 Evergreen and deciduous broadleaved mixed forest	枫香 <i>Liquidambar formosana</i>	天然次生林 Natural secondary forest	111°03'25" E, 29°45'10" N		
III	落叶常绿阔叶混交林 Evergreen and deciduous broadleaved mixed forest	光皮桦 <i>Betula luminifera</i>	天然次生林 Natural secondary forest	111°03'06" E, 29°45'06" N	南 South	1 059
	沟谷常绿阔叶林 Vale evergreen broadleaved forest	栲树 <i>Castanopsis fargesii</i>	天然次生林 Natural secondary forest	111°02'38" E, 29°45'02" N		
V	半垦复人工油茶幼林 Semi-reclaimed young <i>Camellia oleifera</i> plantation	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	4	112°40'44" E, 26°21'51" N	山谷 Valley	97
VI	全垦复人工油茶幼林 Reclaimed young <i>Camellia oleifera</i> forest	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	4	112°40'34" E, 26°22'08" N	山脊 Ridge	146
	全垦复人工油茶成林 Wholly-reclaimed mature <i>Camellia oleifera</i> plantation	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	32	112°41'07" E, 26°20'53" N		
VIII	未垦复人工油茶成林 Non-reclaimed mature <i>Camellia oleifera</i> plantation	油茶 <i>Camellia oleifera</i>	32	112°41'10" E, 26°20'55" N	南 South	128

1.2.2 数据分析

类群优势度划分标准为个体数占总数的10%以上为优势类群(+ + +),个体数占总数的1%~10%为常见类群(+ +),个体数占总数的1%以下为稀有类群(+)。

土壤跳虫和地表节肢动物群落特征分别采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H')、Pielou 均匀度指数(J_s)、Margalef 丰富度指数(D)和 Simpson 优势度指数(C)来计算。

Shannon-Wiener 多样性指数:

$$H' = - \sum_{i=1}^S (P_i \ln P_i) \quad (1)$$

Pielou 均匀度指数:

$$J_s = H' / \ln S \quad (2)$$

Margalef 丰富度指数:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

Simpson 优势度指数:

$$C = \sum_{i=1}^S P_i^2 \quad (4)$$

式中: $P_i = n_i / N$, n_i 为第 i 类群个体数, N 为群落个体总数, S 为群落类群数。

数据的采集和做图在 Excel 软件中完成。土壤动物数据先进行 $\log(x + 1)$ 对数转换,再在 SPSS 19.0 统计分析软件中进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并用最小显著差异法(LSD)比较均值。

2 结果与分析

2.1 土壤跳虫的群落结构特征

2.1.1 土壤跳虫群落组成

8个样地共捕获跳虫1 830头,隶属于4目10科19属(表2)。其中,在八大公山10科19属1 515

表2 不同生境土壤跳虫群落组成

Tab.2 Composition of soil collembolan communities in different habitats

类群 Group	天然次生林 Natural secondary forest						人工油茶林 <i>Camellia oleifera</i> plantation					
	I	II	III	IV	小计 Subtotal	优势度 Dominance	V	VI	VII	VIII	小计 Subtotal	优势度 Dominance
长蛭属 <i>Entomobrya</i> sp.	100	118	61	52	331	+ + +	21	3	10	16	50	+ + +
符蛭属 <i>Folomia</i> sp.	133	56	53	57	299	+ + +						
等节蛭属 <i>Isotoma</i> sp.	46	93	77	69	285	+ + +						
球角蛭属 <i>Hypogastrura</i> sp.	33	29	40	40	142	+ +	24	4	5	26	59	+ + +
原等蛭属 <i>Proisotoma</i> sp.	8		13	3	24	+ +	25	12	16	70	123	+ + +
圆蛭属 <i>Sminthurus</i> sp.	26	7	19	35	87	+ +	7		18	6	31	+ +
刺齿蛭属 <i>Homidia</i> sp.	25	14	51	7	97	+ +						
棘蛭属 <i>Onychiurus</i> sp.	15	21	29	7	72	+ +	3			16	19	+ +
拟裸长蛭属 <i>Pseudosinella</i> sp.	1	9	7		17	+ +	21			5	26	+ +
长角长蛭属 <i>Orchesellides</i> sp.	7		26	2	35	+ +						
土蛭属 <i>Tullbergia</i> sp.	18	2	4	3	27	+ +						
疣蛭属 <i>Neanura</i> sp.	8	6	6	4	24	+ +						
齿棘圆蛭属 <i>Arrhopalites</i> sp.	12	6	6		24	+ +						
鳞蛭属 <i>Tomocerus</i> sp.	3		15		18	+ +						
德蛭属 <i>Desoria</i> sp.	3	3	1		7	+	5				5	+ +
伪亚蛭属 <i>Pseudachorutes</i> sp.	7	2	3		12	+						
裔符蛭属 <i>Folomides</i> sp.	1	5	1		7	+						
刺蛭属 <i>Acanthocyrus</i> sp.	2		2		4	+	2				2	+
短角蛭属 <i>Neelus</i> sp.			3		3	+						
合计 Total	448	371	417	279	1 515		108	19	49	139	315	

注: + + + 表示优势类群(个体数占总数的10%以上); + + 表示常见种群(个体数占总数的1% ~ 10%); + 表示稀有类群(个体数占总数的1%以下)。下同。Notes: + + + denote dominant group (individual number is more than 10%), + + denote common group (individual number is between 1% and 10%), + denote rare group (individual number is less 1%). The same below.

头,占个体总数的82.79%;人工油茶林5科8属315头,占个体总数的17.21%。

在天然次生林中,长蛭属(*Entomobrya*)、符蛭属(*Folomia*)和等节蛭属(*Isotoma*)为优势类群,共占个体总数的60.4%;常见类群包括球角蛭属(*Hypogastrura*)、刺齿蛭属(*Homidi*)、棘蛭属(*Onychiurus*)、圆蛭属(*Sminthurus*)和长角长蛭属(*Orchesellides*)等11属,占个体总数的37.42%;稀有类群包括伪亚蛭属(*Pseudachorutes*)、刺蛭属(*Acanthocyrus*)、德蛭属(*Desoria*)等5属,占总个体数的2.18%。油茶人工林中优势类群为原等蛭属(*Proisotoma*)、球角蛭属和长蛭属,占个体总数的73.65%,数量最多的原等蛭属占个体总数的39.05%。圆蛭属、拟裸长蛭属(*Pseudosinella*)、棘蛭属、德蛭属为常见类群,占个体总数的25.71%。刺蛭属为油茶人工林稀有类群,仅占个体总数的0.64%。

2.1.2 土壤跳虫群落的分布特征

从水平分布来看,8个样地中,光皮桦林类群数最多,本次调查发现的所有土壤跳虫类群在该样地

均有分布。亮叶水青冈林个体数量最多,其个体数量比4个人工油茶林个体数量的总和还多。就人工油茶林的4种生境比较而言,半垦复油茶幼林的种类数最多,未垦复油茶成林的个体数量最多。而全垦复油茶幼林的土壤跳虫分布较少,仅分离到3属19头,其类群数和个体数均为8个样地最低(图1)。

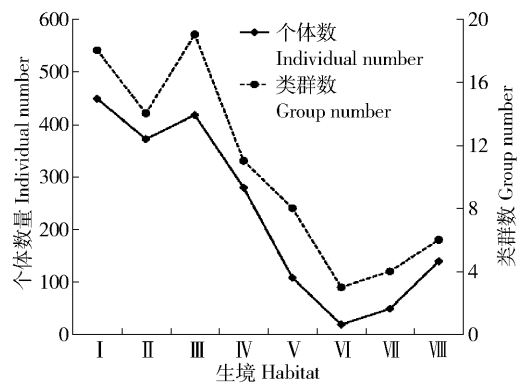


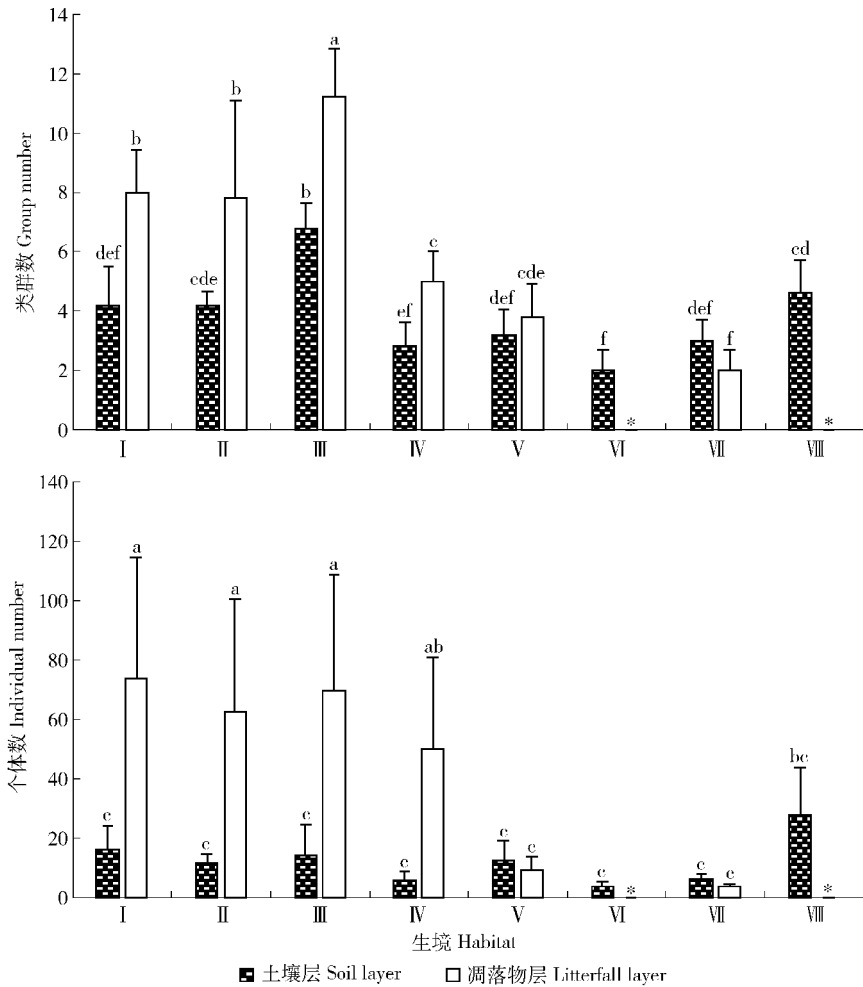
图1 不同生境土壤跳虫群落的水平分布

Fig.1 Horizontal distribution of soil collembolan communities in different habitats

从垂直分层分布来看,天然次生林凋落物层土壤跳虫的类群数和个体数均显著高于土壤层($P <$

0.05),且凋落物层个体数量优势比类群数优势更为明显(图2)。人工油茶林中,全垦复幼林因为地表凋落物极少,未垦复成林地表凋落物过干等原因,

未收集到土壤跳虫。半垦复油茶幼林和全垦复油茶成林凋落物层与土壤层类群数没有显著差异($P > 0.05$)。



图中数据是平均值 \pm 标准误, $n=5$ 。小写字母代表显著性差异,相同字母差异不显著,不同字母差异显著 ($P < 0.05$)。* 代表缺失数据。下同。Data in the figures are mean \pm SE, $n=5$. Small letters denote statistical significance, same letters indicate no significant difference, while different letters indicate significant differences ($P < 0.05$). * denotes missing data. Same as below.

图2 不同生境土壤跳虫群落的垂直分布

Fig.2 Vertical distribution of soil collembolan communities in different habitats

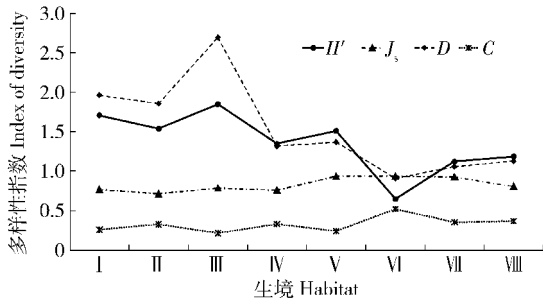
2.1.3 土壤跳虫群落的多样性

8种生境的多样性指数 H' 与丰富度指数 R 大小顺序均为光皮桦林 > 亮叶水青冈林 > 枫香林 > 半垦复油茶幼林 > 栲树林 > 未垦复油茶成林 > 全垦复油茶成林 > 全垦复油茶幼林。且光皮桦林的 Shannon-Wiener 多样性指数极显著地高于栲树林、未垦复油茶成林、全垦复油茶成林和全垦复油茶幼林 ($P < 0.01$), Margalef 丰富度指数显著高于亮叶水青冈林和枫香林 ($P < 0.05$), 极显著地高于栲树林和4种不同垦复方式的油茶林 ($P < 0.01$)。单就人工油茶林来看,半垦复幼林的 Shannon-Wiener 多样性指数显著高于全垦复成林和未垦复成林 ($P <$

0.05), 极显著地高于全垦复幼林 ($P < 0.01$); 半垦复幼林的 Margalef 丰富度指数显著高于全垦复幼林 ($P < 0.05$), 与全垦复成林、未垦复成林没有显著差异。Pielou 均匀度表现出人工油茶林均大于天然次生林的趋势,且在天然林不同生境中差异不显著 ($P > 0.05$),在人工油茶林中则是半垦复幼林、全垦复幼林和全垦复成林显著高于未垦复成林 ($P < 0.05$)。Simpson 优势度指数变化较为复杂,光皮桦林、半垦复油茶幼林显著低于枫香林、栲树林、全垦复油茶成林和未垦复油茶成林 ($P < 0.05$), 并极显著地低于全垦复油茶幼林 ($P < 0.01$)。

对不同生境土壤跳虫群落多样性指数进行

Pearson 相关性分析发现, 土壤跳虫群落 Shannon-Wiener 多样性指数与 Margalef 丰富度指数呈显著正相关($r=0.72, P<0.01$), 而与 Pielou 均匀度指数、Simpson 优势度指数则表现出较显著负相关($r=-0.31, P<0.05$; $r=-0.35, P<0.05$); 且 Margalef 丰富度指数与 Simpson 优势度指数显著负相关($r=-0.59, P<0.05$) (图 3)。



H'. Shannon-Wiener 多样性指数; J_s . Pielou 均匀度指数; D. Margalef 丰富度指数; C. Simpson 优势度指数。H', Shannon-Wiener diversity index; J_s , Pielou evenness index; D, Margalef richness index; C, Simpson dominance index.

图 3 不同生境土壤跳虫群落多样性指数

Fig. 3 Soil collembolan community diversity index in different habitats

2.2 地表节肢动物的群落结构特征

2.2.1 节肢动物群落组成

在 8 个样地设置的 200 个诱集罐共诱集到土壤节肢动物 1 136 头, 经鉴定隶属于 12 目 24 科 34 属。其中, 天然次生林 841 头, 隶属于 9 目 15 科 20 属, 个体总数和类群数分别占总数的 74.03% 和 58.82%。油茶林样地 295 头, 隶属于 8 目 14 科 16 属, 个体总数和类群数分别占总数的 25.97% 和 47.06% (表 3)。

天然次生林地地表节肢动物优势属为蚁科的厚结猛蚁属 (*Pachycondyla*)、举腹蚁属 (*Crematogaster*)、立毛蚁属 (*Paratrechina*)、小家蚁属 (*Monomorium*), 4 属共占个体总数的 83.71%。常见类群为多刺蚁属 (*Polyrhachis*)、油葫芦属 (*Teleogryllus*)、田野蟋蟀属 (*Gryllus*)、步甲属 (*Carabus*)、蠼螋属 (*Labidura*), 稀有类群包括地蜈蚣科 (*Geophilus*)、隐翅虫属 (*Staphylinus*)、屁步甲属 (*Pheropsophus*) 等 16 个类群; 人工油茶林地地表节肢动物优势属为蚁科的弓背蚁属 (*Camponotus*)、大头蚁属 (*Pheidole*) 和蟋蟀科的油葫芦属、斗蟋属 (*Velarifictorus*), 4 属共占总数的 74.58%。常见类群为细长蚁属 (*Tetraoponera*)、蜜蜂属 (*Apis*)、史氏叶蜂属 (*Dasmithius*)、角胸肖叶甲属 (*Basilepta*)、刺蛾寄蝇属 (*Chaetexorista*)、林蠖属 (*Episymploce*)、钻头蛛属 (*Hyllyphantes*)、新圆蛛属

(*Neoscona*); 稀有类群包括地蜂属 (*Andrena*)、斑腿蝗科 (*Catantopidae*)、守瓜属 (*Aulacophora*)、蠼螋属等。

2.2.2 地表节肢动物群落结构的多样性

整体来看, 天然次生林和人工油茶林两种林型间地表节肢动物群落的结构和多样性差异不像土壤跳虫那样具有明显规律。在天然次生林中, 亮叶水青冈和枫香林的类群数和个体数显著高于光皮桦林和栲树林 ($P<0.05$), 枫香林的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数最高, Simpson 优势度指数最低。栲树林的 Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数最低, Simpson 优势度指数最高 (表 4)。

在人工油茶林中, 全垦复油茶成林类群数最多, Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数最高, Simpson 优势度指数最低。半垦复油茶幼林个体数最多, 但未达到显著水平 ($P>0.05$)。未垦复油茶成林的类群数、个体数、Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数最低, Simpson 优势度指数最高。

3 结论与讨论

3.1 天然次生林土壤节肢动物群落结构

不同生境间土壤跳虫和地表节肢动物的群落结构与多样性具有显著差异, 这种差异与生境的异质性紧密相关。一般来说, 生境的空间异质性越高, 可提供的小生境及小气候条件越丰富, 也就意味着更高的生物多样性^[25-26]。天然次生林原生植被保存相对完好, 植物多样性高, 林下调落物层较厚, 水热条件好, 能为不同功能群的土壤节肢动物提供多样化的栖息环境和食物源, 因而节肢动物群落结构相对复杂, 多样性指数较高。出于对经济效益的追求, 人为耕作使得人工油茶林地表植被单一, 凋落物层较薄或缺失, 土壤保温保湿能力差, 加上施肥等人为活动对土壤节肢动物的干扰, 致使其类群数和个体数不如天然次生林丰富。

从土壤跳虫的多样性来看, 凋落物层相对较丰厚的光皮桦林、亮叶水青冈林、枫香林和半垦复油茶幼林比凋落物层较薄的生境要高, 并且极显著地高于凋落物层缺失的全垦复油茶幼林, 表明凋落物层的数量和质量对土壤跳虫分布具有决定性作用。这一方面是因为数量丰富且组成多样的凋落物是森林生态系统的主要养分来源, 能为绝大多数土壤动物提供充足的食物资源, 从而决定其群落多样性的高低^[27]。另一方面, 凋落物层丰厚意味着局部空间更大, 能为更多的土壤动物提供栖居、繁殖的空间, 同

表3 不同生境地表节肢动物群落组成

Tab. 3 Composition of trapped arthropod communities in different habitats

类群 Group	天然次生林 Natural secondary forest						人工油茶林 <i>Camellia oleifera</i> plantation								
	节肢动物数量				小计 Subtotal	优势度 Dominance	节肢动物数量				小计 Subtotal	优势度 Dominance			
	Number of arthropod						Number of arthropod								
I	II	III	IV			V	VI	VII	VIII						
厚结猛蚁属 <i>Pachycondyla</i> sp.		11	35	74	120	+	+	+							
举腹蚁属 <i>Crematogaster</i> sp.		66	8	12	86	+	+	+							
多刺蚁属 <i>Polyrhachis</i> sp.	34	3		1	38	+	+								
立毛蚁属 <i>Paratrechina</i> sp.	169	163		9	341	+	+	+							
小家蚁属 <i>Monomorium</i> sp.	115	42			157	+	+	+							
弓背蚁属 <i>Camponotus</i> sp.								30		30	+	+	+		
大头蚁属 <i>Pheidole</i> sp.						50				50	+	+	+		
细长蚁属 <i>Tetraoponera</i> sp.								11		11	+	+			
地蜂属 <i>Andrena</i> sp.							1	1		2		+			
蜜蜂属 <i>Apis</i> sp.							19			19	+	+			
史氏叶蜂属 <i>Dasmithius</i> sp.							7			7	+	+			
斑腿蝗科 Catantopidae							2			2		+			
剑角蝗属 <i>Acrida</i> sp.	1	1	1		3		+								
油葫芦属 <i>Teleogryllus</i> sp.	3	11	2		16	+	+	38	33	11	19	101	+	+	+
田野蟋蟀属 <i>Gryllus</i> sp.	10	11	1		22	+	+								
斗蟋属 <i>Velarifictorus</i> sp.								12	7	11	9	39	+	+	+
屁步甲属 <i>Pheropsophus</i> sp.			4		4		+								
婪步甲属 <i>Harpalus</i> sp.			1		1		+								
步甲属 <i>Carabus</i> sp.	3	11			14	+	+								
劫步甲属 <i>Lesticus</i> sp.	1				1		+								
叶甲属 <i>Chrysomela</i> sp.	1	1			2		+								
莹叶甲属 <i>Galeruca</i> sp.		1			1		+								
守瓜属 <i>Aulacophora</i> sp.								1				1		+	
角胸肖叶甲属 <i>Basilepta</i> sp.								4	1	3		8	+	+	
新锹甲属 <i>Neolucanus</i> sp.		2			2		+								
隐翅虫属 <i>Staphylinus</i> sp.	2	2			4		+								
蛻螂属 <i>Gymnopleurus</i> sp.		1			1		+								
刺蛾寄蝇属 <i>Chaetexorista</i> sp.								3	1		2	6	+	+	
蠼螋属 <i>Labidura</i> sp.	2	6	1		9	+	+	1				1		+	
鼠妇属 <i>Porcellio</i> sp.		1			1		+								
林蠹属 <i>Episymphloe</i> sp.								3		3		6	+	+	
钻头蛛属 <i>Hylyphantes</i> sp.								2		5	1	8	+	+	
新圆蛛属 <i>Neoscona</i> sp.									3			3	+	+	
象甲科 Curculionidae		3			3		+								
尺蛾科 Geometridae		1		1	2		+	1				1		+	
管蓟马科 Phlaeothripidae			1		1		+								
圆马陆科 Sphaeropoecidae	1	2			3		+								
地蜈蚣科 Geophilidae	5		1	1	7		+								
革翅目 Dermaptera				2	2		+								
合计 Total	347	339	55	100	841			113	73	75	34	295			

表4 不同生境地表节肢动物群落结构的多样性

Tab. 4 Diversity of trapped arthropod community structure in different habitats

生境 Habitat	类群数 Group number	个体数 Individual number	H'	J_s	D	C
I	5.60 ± 0.55 b	69.40 ± 49.64 a	1.02 ± 0.20 bc	0.60 ± 0.12 ns	1.15 ± 0.14 b	0.45 ± 0.10 abc
II	8.20 ± 1.48 a	64.80 ± 84.64 ab	1.49 ± 0.39 a	0.75 ± 0.23 ns	1.96 ± 0.36 a	0.31 ± 0.15 c
III	4.00 ± 0.82 bc	13.75 ± 8.42 bcd	1.04 ± 0.30 bc	0.77 ± 0.21 ns	1.58 ± 0.51 ab	0.44 ± 0.17 abc
IV	3.00 ± 0.71 cd	20.00 ± 8.00 bc	0.67 ± 0.23 c	0.64 ± 0.21 ns	0.68 ± 0.25 c	0.62 ± 0.15 a
V	4.20 ± 1.30 bc	22.60 ± 18.54 bc	1.07 ± 0.22 b	0.78 ± 0.17 ns	1.25 ± 0.41 b	0.40 ± 0.10 bc
VI	3.60 ± 0.55 bc	14.60 ± 3.29 bcd	0.95 ± 0.20 bc	0.78 ± 0.08 ns	1.09 ± 0.64 b	0.37 ± 0.17 bc
VII	5.00 ± 1.41 b	15.00 ± 8.28 cd	1.17 ± 0.19 ab	0.77 ± 0.18 ns	1.56 ± 0.55 ab	0.33 ± 0.16 c
VIII	2.40 ± 0.55 d	6.80 ± 2.49 d	0.73 ± 0.29 c	0.83 ± 0.18 ns	0.86 ± 0.59 c	0.54 ± 0.17 ab

注:表中数据是平均值 ± 标准误, $n=5$ 。小写字母代表显著性差异, 同列相同字母表示差异不显著, 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。Notes: data in the table are mean ± SE, $n=5$. Small letters denote statistical significance, same letters in the column indicate no significant difference, while different letters in the column indicate significant differences ($P < 0.05$).

时还能够降低土壤水分的蒸发速度, 调节土层温度^[28-29], 而大多数土壤跳虫偏好潮湿、温度适中且腐殖质较厚的土壤^[30]。此外, 我们采样时正值新鲜凋落物大量累计的秋季, 不同生境凋落物层的样本质量具有明显差异。因此, 凋落物层丰厚的生境土壤跳虫类群数和个体数具有显著优势。这也与袁志忠等^[31]对森林生态系统凋落物层土壤跳虫群落研究结果一致。

在土壤跳虫的垂直分布上, 天然次生林凋落物层跳虫的类群数和个体数均远高于土壤层, 而人工油茶林则相反。造成这种垂直分布差异的主要原因, 除了凋落物层数量和质量不同外, 还与土壤特征有关。许多研究表明, 土壤跳虫密度与土壤容积密度呈显著的负相关关系, 而与土壤肥力呈正相关^[32-34]。Larsen 等^[35]通过野外调查和对比模拟实验证实, 随着土壤容积密度增加, 跳虫丰富度显著下降, 并且在板结土壤或车轮碾压过的土壤中, 土壤跳虫丰富度只有疏松土壤的 1/5。吴东辉等^[15]对不同生境土壤跳虫的垂直分布特征研究也发现, 耕作改变了土壤结构, 使土壤更加疏松, 有利于土壤跳虫向下移动。而森林生态系统土壤保持自然状态, 土壤跳虫多分布于凋落物层和土壤上层。可见, 地表凋落物的覆盖和土壤特征决定土壤跳虫垂直分布。

从地表节肢动物的多样性和丰富度来看, 天然次生林的生境优越性并不突出。除枫香林的类群数和多样性指数显著高于其他 7 种生境外, 其余 3 种天然次生林生境地表节肢动物多样性与人工油茶林并无显著差异。这与林英华等^[36]和 Uehara-Prado 等^[37]研究得出凋落物的种类和数量与凋落物层的节肢动物多样性成显著正相关关系不尽一致。凋落物层的节肢动物多样性除与凋落物的种类和数量有

关外, 应该还与光照、温度、食物源分布、地表结构和水分因子等密切相关。

3.2 地表植被与海拔对天然次生林土壤节肢动物多样性的影响

天然次生林中, 不同生境的土壤跳虫和地表节肢动物群落结构和多样性存在显著差异。光皮桦林土壤跳虫丰富度和多样性均显著高于枫香林和栲树林, 而枫香林的地表节肢动物丰富度和多样性则显著高于亮叶水青冈林和栲树林。有研究表明^[38-40], 海拔高度的梯度变化常伴随着土壤温度、降水量、光照等诸多因子的改变, 并对土壤动物分布具有决定性作用。但我们通过 Pearson 相关性分析发现, 八大公山海拔梯度与土壤跳虫和地表节肢动物的丰富度 ($r = 0.275, P > 0.05; r = 0.383, P > 0.05$) 及多样性 ($r = 0.427, P > 0.05; r = 0.426, P > 0.05$) 都没有显著相关关系。而我们在采样中发现, 栲树林和青冈林优势树种均是大型乔木, 冠幅较大, 林内郁闭度高, 林下灌木和草本植物少, 枫香林和光皮桦林林分组成复杂, 具有乔、灌、草 3 层结构, 植被多样性高, 群落稳定性好。可见, 地表植被多样性是影响天然次生林土壤跳虫丰富度和多样性的主要原因, 因为植被的多样性决定了土壤动物生境异质性和食物源的多样性, 较高的植物多样性包含更多种类的资源, 并促进生态系统的生产力, 从而提高土壤动物多样性。

3.3 适度垦复对人工油茶林节肢动物多样性的影响

Filho 等^[41]认为, 耕作方式等人为干扰也深刻影响着土壤形成过程和生物、理化性质, 从而决定土壤动物群落结构与多样性^[42-44]。半垦复油茶幼林在一定程度上提高了土壤孔隙度, 并保留了部分凋落物和地表植被, 增加了土壤透气性和持水能力, 有

利土壤跳虫和地表节肢动物生存繁衍;全垦复油茶幼林虽然土壤孔隙度更高,但由于缺少地被物,裸露的地表保湿、保温性差,土壤跳虫和节肢动物丰富度均显著低于半垦复幼林。在成林中,垦复方式对土壤跳虫多样性没有显著影响,但全垦复对提高地表节肢动物多样作用显著。这可能与成林垦复干扰后同时改变了土壤结构,增加了生境异质性,同时也与地表节肢动物迁移能力相对较强有关。

值得注意的是,虽然半垦复和保留其他地表植被能够提高土壤节肢动物多样性,保护蜘蛛、甲虫等天敌群落从而有效控制植食性害虫,但我们在实地调查中发现,全垦复油茶幼林因为没有其他植被争夺养分,长势明显比半垦复油茶林好。因此,改变单一油茶种植模式,采取复合种植或林下套种等方式,并进行适当垦复,保留地表凋落物以增加土壤保水保湿能力,既能增加油茶林土壤节肢动物群落多样性,提高油茶林病虫害自我控制能力,促进油茶林增产增收,又能保护好油茶林生态系统健康和稳定。

本研究探讨了天然次生林和人工油茶林不同生境对土壤跳虫和地表节肢动物多样性的影响,研究对象以大中型节肢动物为主。实际上,土壤中除了跳虫还有许多其他类群生物,它们在土壤生态系统中相互制约、相互依存,值得进一步深入研究。

致谢 在标本采集、分离、鉴定和数据分析过程中得到了中国科学院动物研究所戈峰研究员悉心指导、中国科学院东北地理与农业生态研究所常亮副研究员、孙新副研究员和王柏凤博士的热心帮助,在此深表感谢!

参 考 文 献

- [1] FERRIS H, TUOMISTO H. Unearthing the role of biological diversity in soil health[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 85: 101-109.
- [2] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2015, 35(20): 6614-6625.
SHAO Y H, ZHANG W X, LIU S J, et al. Diversity and function of soil fauna [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(20): 6614-6625.
- [3] WARDLE D A, BARDGETT R D, KLIRONOMOS J N, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. *Science*, 2004, 304: 1629-1633.
- [4] MAAB S, CARUSO T, RILLING M C. Functional role of microarthropods in soil aggregation[J]. *Pedobiologia*, 2015, 58(2-3): 59-63.
- [5] 陈建秀, 麻智春, 严海娟, 等. 跳虫在土壤生态系统中的作用[J]. *生物多样性*, 2007, 15(2): 154-161.
CHEN J X, MA Z C, YAN H J, et al. Roles of springtails in soil ecosystem[J]. *Biodiversity Science*, 2007, 15(2): 154-161.
- [6] GERGOCS V, HUFNAGEL L. Application of oribatid mites as indicators [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2009, 7(1): 79-98.
- [7] LEE Y F, KUO Y, LU S S, et al. Trampling, litter removal, and variations in the composition and relative abundance of soil arthropods in a subtropical hardwood forest [J]. *Zoological Studies*, 2009, 48(2): 162-173.
- [8] GROC S, ORIVEL J, DEJEAN A, et al. Baseline study of the leaf litter ant fauna in a French Guianese forest [J]. *Insect Conservation and Diversity*, 2009, 2(3): 183-193.
- [9] SROKA K, FINCH O D. Ground beetle diversity in ancient woodland remnants in north-western Germany (Coleoptera, Carabidae) [J]. *Journal of Insect Conservation*, 2006, 10(4): 335-350.
- [10] 王振中, 张友梅, 李忠武. 黄山森林生态系统土壤动物群落结构特征及其多样性[J]. *林业科学*, 2009, 45(10): 168-173.
WANG Z Z, ZHANG Y M, LI Z W. Structural characteristics and biodiversity of soil animal community in Huangshan forest system [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2009, 45(10): 168-173.
- [11] 刘任涛, 赵哈林, 赵学勇. 半干旱区草地土壤动物多样性的季节变化及其与温湿度的关系[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(1): 97-101.
LIU R T, ZHAO H L, ZHAO X Y. Seasonal changes of soil faunal diversity and its relation to temperature and moisture in semi-arid grassland, North China [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(1): 97-101.
- [12] 吴东辉, 尹文英, 殷秀琴. 松嫩草原中度退化草地不同植被恢复方式下土壤跳虫群落特征比较[J]. *昆虫学报*, 2008, 51(5): 509-515.
WU D H, YIN W Y, YIN X Q. Comparisons among soil collembola community characteristics in relation to different vegetation restoration treatments in the moderate degraded grasslands in the Songnen Plain of Northeast China [J]. *Acta Entomologica Sinica*, 2008, 51(5): 509-515.
- [13] 朱强根, 朱安宁, 张佳宝, 等. 长期施肥对黄淮海平原农田中小型土壤节肢动物的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(1): 69-74.
ZHU Q G, ZHU A N, ZHANG J B, et al. Effects of long-term fertilization on cropland soil meso-micro arthropods in Huang-Huai-Hai Plain of China [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(1): 69-74.
- [14] 徐演鹏, 谭飞, 胡彦鹏, 等. 秸秆还田对黑土区农田中小型土壤节肢动物群落的影响[J]. *动物学杂志*, 2015, 50(2): 262-271.
XU Y P, TAN F, HU Y P, et al. Effect of straw returning on cropland soil meso- and micro-arthropods community in the black soil area [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2015, 50(2): 262-271.
- [15] 吴东辉, 张柏, 陈鹏. 长春市不同土地利用生境土壤弹尾虫群落结构特征[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(2): 180-184.
WU D H, ZHANG B, CHEN P. Community structure of soil collembolan under different land uses in Changchun [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(2): 180-184.
- [16] 丁程成, 戴征凯, 李辉信, 等. 退化红壤不同植被恢复类型的土壤弹尾虫群落结构[J]. *应用生态学报*, 2008, 19(3): 593-598.
DING C C, DAI Z K, LI H X, et al. Community structure of

- collembolan in degraded red soil under different restoration vegetation types[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(3): 593-598.
- [17] 刘继亮, 李锋瑞, 牛瑞雪, 等. 黑河中游不同土地利用方式地面节肢动物对土壤盐渍化的响应[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1242-1252.
- LIU J L, LI F R, NIU R X, et al. Responses of ground arthropods to soil salinization in lands different in land-use/cover type in the middle reaches of Heihe River[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1242-1252.
- [18] 何振, 李迪强, 李密. 不同垦复方式油茶林土壤节肢动物多样性特征[J]. 应用昆虫学报, 2016, 53(6): 1361-1368.
- HE Z, LI D Q, LI M. Soil arthropod diversity in *Camellia oleifera* forest of different reclamation ways[J]. Chinese Journal of Applied Entomology, 2016, 53(6): 1361-1368.
- [19] 向昌国, 李文芳, 于德珍. 八大公山自然保护区森林土壤动物群落多样性的初步研究[J]. 生物多样性, 2000, 8(3): 304-306.
- XIANG C G, LI W F, YU D Z. A preliminary study on diversity of soil animal communities in the forest of Badagong Mountain Nature Reserve[J]. Chinese Biodiversity, 2000, 8(3): 304-306.
- [20] 刘博学. 湘西八大公山自然保护区的土壤[J]. 中南林学院学报, 1983, 3(2): 141-159.
- LIU B X. The soil of Badagong Mountain Natural Preserve in western Hunan Province[J]. Journal of Central South Forestry Institute, 1983, 3(2): 141-159.
- [21] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- YIN W Y. Soil arthropod of subtropical China[M]. Beijing: Science Press, 1992.
- [22] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 51-89, 437-475.
- YIN W Y. Pictorial keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998: 51-89, 437-475.
- [23] BELLINGER P, CHRISTIANSEN K, JANSSENS F. Checklist of the Collembola of the world [EB/OL]. 1996-2016, <http://www.collembola.org>.
- [24] 彭建文. 湖南森林昆虫图鉴[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1992.
- PENG J W. Iconography of forest insects in Hunan China[M]. Changsha: Hunan Science and Technology Press, 1992.
- [25] FISCHER J, LINDENMAYER D B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis [J]. Global Ecology and Biogeography, 2007, 16(3): 265-280.
- [26] HEISSWOLF A, REICHMANN S, POETHKE H J, et al. Habitat quality matters for the distribution of an endangered leaf beetle and its egg parasitoid in a fragmented landscape[J]. Journal of Insect Conservation, 2013, 13(2): 165-175.
- [27] FILSER J, MEBES K H, WINTER K. Long-term dynamics and interrelationships of soil Collembola and microorganisms in an arable landscape following land use change[J]. Geoderma, 2002, 105(3-4): 201-221.
- [28] CHIKOSKI J M, FERGUSON S, MEYER L. Effects of water addition on soil arthropods and soil characteristics in a precipitation-limited environment[J]. Acta Oecologica, 2006, 30(2): 203-211.
- [29] SANTONJA M, FERNANDEZ C, PROFFIT M, et al. Plant litter mixture partly mitigates the negative effects of extended drought on soil biota and litter decomposition in a Mediterranean oak forest [J/OL]. Journal of Ecology, 2016 [2017-01-09]. doi: 10.1111/1365-2745.12711.
- [30] 勾影波, 苏永春. 土壤温度和含水量对螨类和弹尾类动物数量的影响[J]. 常熟理工学院学报(自然科学版), 2007, 21(2): 57-62.
- GOU Y B, SU Y C. The impact of soil temperature and moisture on individual number of acarid and Collembola[J]. Journal of Changshu Institute of Technology (Natural Sciences), 2007, 21(2): 57-62.
- [31] 袁志忠, A. N. Singh, 胡颖圆. 添加凋落物对土壤跳虫群落的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(4): 841-846.
- YUAN Z Z, SINGH A N, HU Y Y. Effect of litter addition on soil springtail community [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4): 841-846.
- [32] HEISLER C, KAISER E A. Influence of agricultural traffic and crop management on Collembola and microbial biomass in arable soil[J]. Biology and Fertility of Soils, 1995, 19(2): 159-165.
- [33] DITTMER S, SCHRADER S. Longterm effects of soil compaction and tillage on Collembola and straw decomposition in arable soil [J]. Pedobiologia, 2000, 44(3): 527-538.
- [34] BEYLICH A, OBERHOLZER H R, SCHRADER S, et al. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 109(2): 133-143.
- [35] LARSEN T, SCHJONNING P, AXELSEN J. The impact of soil compaction on euedaphic Collembola[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 26(3): 273-281.
- [36] 林英华, 孙家宝, 张夫道. 我国重要森林群落凋落物层土壤动物群落生态特征[J]. 生态学报, 2009, 29(6): 2938-2944.
- LIN Y H, SUN J B, ZHANG F D. Characteristics of soil fauna community in forest floor at different climate zone, China[J]. Acta Oecologica Sinica, 2009, 29(6): 2938-2944.
- [37] UEHARA-PRADO M, FERNANDES J O, BELLO A M, et al. Selecting terrestrial arthropods as indicators of small-scale disturbance: a first approach in the Brazilian Atlantic forest[J]. Biological Conservation, 2009, 142(6): 1220-1228.
- [38] BROWN J H. Mammals on mountain sides: elevational patterns of diversity[J]. Global Ecology and Biogeography, 2001, 10(1): 101-109.
- [39] WANG S J, RUAN H H, WANG B, et al. Effects of soil microarthropods on plant litter decomposition across an elevation gradient in the Wuyi Mountains[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2009, 41(5): 891-897.
- [40] MAUNSELL S C, KITCHING R L, GREENSLADE P, et al. Springtail (Collembola) assemblages along an elevational gradient in Australian subtropical rainforest [J]. Australian Journal of Entomology, 2013, 52(2): 114-124.
- [41] FILHO L C I O, FILHO O K, BARETTA D, et al. Collembola

- community structure as a tool to assess land use effects on soil quality[J]. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 2016, 40: e0150432 [2017-01-15]. <http://dx.doi.org/10.1590/18069657rbcs20150432>.
- [42] BENTSSON J. Disturbance and resilience in soil animal communities[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2002, 38(2):119-125.
- [43] 王广力, 王勇, 韩立亮, 等. 洞庭湖区不同土地利用方式下的土壤动物群落结构[J]. *生态学报*, 2005, 25(10): 2629-2636.
- WANG G L, WANG Y, HAN L L, et al. Soil animal communities of variously utilized in the Dongting Lake Region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(10): 2629-2636.
- [44] 李岳诚, 张大治, 贺达汉. 荒漠景观固沙柠条林地地表甲虫多样性及其与环境因子的关系[J]. *林业科学*, 2014, 50(5): 109-117.
- LI Y C, ZHANG D Z, HE D H. Species diversity of ground-dwelling beetles and its relationship with environmental factors in the artificial caragana brushland of fixed sandy lands in Ningxia [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(5): 109-117.

(责任编辑 范娟
责任编委 张真)