

DOI: 10.11766/trxb202008210182

肖玖金, 杨礼通, 冯秋红, 陈东海, 张健, 陈良华, 胡宗达. 雷竹凋落叶不同分解环境中土壤动物群落特征[J]. 土壤学报, 2021, XIAO Jiujin, YANG Litong, FENG QiuHong, CHEN Donghai, ZHANG Jian, CHENG Lianghua, HU Zongda. Soil Fauna Community Dynamics of *Phyllostachys violascens* Litter in Different Decomposition Environments[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021,

## 雷竹凋落叶不同分解环境中土壤动物群落特征\*

肖玖金<sup>1</sup>, 杨礼通<sup>2</sup>, 冯秋红<sup>1</sup>, 陈东海<sup>1</sup>, 张健<sup>1,3</sup>, 陈良华<sup>4</sup>, 胡宗达<sup>5†</sup>

(1. 四川农业大学林学院, 森林和湿地生态恢复与保育四川省重点实验室, 成都 611130; 2. 四川省彭州市国有林场, 四川彭州 611930; 3. 四川农业大学长江上游森林资源保育与生态安全国家林业和草原局重点实验室, 成都 611130; 4. 四川农业大学华西雨屏区人工林生态系统研究长期科研基地, 成都 611130; 5. 四川农业大学资源学院, 成都 611130)

**摘要:** 为研究火烧迹地雷竹 (*Phyllostachys violascens*) 凋落叶分解过程中土壤动物群落特征, 以毗邻雷竹林为对照, 采用凋落物袋法研究雷竹凋落叶分解速率及土壤动物群落结构的变化特征。结果显示, 两个样地雷竹凋落叶分解过程总体上可以划分为 3 个阶段, 即分解初期 (质量损失率较高)、分解中期 (凋落叶的质量损失率较上阶段减缓)、分解后期 (质量损失率再次上升)。调查共捕获土壤动物 824 只, 其中火烧迹地 375 只, 对照样地 449 只, 以缓蟊科、蚁科、线虫纲和等节蛭科为优势类群, 所占百分比为 49.27%, 火烧迹地土壤动物类群数变化幅度较个体数小。统计分析表明, 火烧迹地和对照样地凋落叶分解过程中土壤动物类群数无显著差异 ( $P>0.05$ )。两个样地土壤动物均匀度指数、多样性指数和丰富度指数均呈上升趋势, 而优势度指数则逐渐降低, 凋落叶分解过程中土壤动物个体数、类群数均与降水量存在显著相关关系 ( $P<0.05$ )。主坐标分析 (PCoA) 表明, 凋落叶分解初期受火烧干扰较大, 后期受分解时间累积效应影响较大。试验表明, 火烧干扰延缓了雷竹凋落叶的分解速率, 但随着时间的延续, 火烧迹地雷竹叶分解速率则迅速提升, 土壤动物群落也得到恢复。

**关键词:** 火烧迹地; 凋落叶分解; 土壤动物; 雷竹

中图分类号: S714.3 文献标志码: A

## Soil Fauna Community Dynamics of *Phyllostachys violascens* Litter in Different Decomposition Environments

XIAO Jiujin<sup>1</sup>, YANG Litong<sup>2</sup>, FENG QiuHong<sup>1</sup>, CHEN Donghai<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1,3</sup>, CHENG Lianghua<sup>4</sup>, HU Zongda<sup>5†</sup>

(1. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Key Laboratory of Forest and Wetland Ecological Restoration and Conservation in Sichuan Province, Chengdu 611130, China; 2. State-owned Forest Farm of Pengzhou, Pengzhou, Sichuan 611930, China; 3. National Forestry and Grassland Administration Key Laboratory of Forest Resources Conservation and Ecological Safety on the Upper Reaches of the Yangtze River, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 4. Rainy Area of West China Plantation Ecosystem Permanent Scientific Research Base, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 5. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

**Abstract:** Soil fauna is an important component of soil ecosystems, which plays a significant role in the decomposition of biological remains, modification of soil properties, enhancement of material recycling, and energy conversion in soils. Forest fire is a common phenomenon disturbance on the terrestrial ecosystem which destroys the biology diversity above and under the forest floor. Soil fauna is also affected intensively by forest

\* 国家自然科学基金青年科学基金 (31400457)、四川省科技计划 (2019YJ0427、2019YJ0416) 和森林和湿地生态恢复与保育四川重点实验室开放课题 (2019KFKT02) 资助 Supported by the Youth Science Foundation of the National Natural Science Foundation of China (No. 31400457), the Sichuan Science and Technology Program (Nos. 2019YJ0427, 2019YJ0416), and open project fundation of the Key Laboratory of Forest and Wetland Ecological Restoration in Sichuan Province (No.2019KFKT02)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: huzd98@163.com

作者简介: 肖玖金(1982—), 男, 四川隆昌市人, 博士, 副教授, 研究方向为土壤生态学。E-mail:j.xiao@sicau.edu.cn

收稿日期: 2020-08-21; 收到修改稿日期: 2020-11-07

fire although it is often ignored. To understand the effects of *Phyllostachys violascens* after fire disturbance on soil fauna community characteristics, *Phyllostachys violascens* with fire disturbance were selected as the research object and *Phyllostachys violascens* without fire disturbance were used as a reference. Litter bags were used to study the characteristics of the soil fauna from May to November 2016. The litter bags were collected each month and stored in soil fauna sealing black bags, then, soil fauna was separated and collected from the litter bags by the Tullgren method. The results showed that the decomposition process occurred in three stages. The first stage represented the primary decomposition stage, in which the litter mass loss rate was higher. In the second or middle decomposition stage, the litter mass loss rate was slower compared to the first stage. Lastly, in the third stage or final decomposition stage, the litter mass loss rate increased again. Importantly, a total of 824 individuals of soil fauna, belonging to 34 orders were collected. *Phytoseiidae*, *Formicidae*, *Nematodes*, and *Isotomidae* were the dominant species and accounted for 49.27% of the collected total animals. The rangeability of soil fauna species was lower than the individual number. The results of statistical analysis showed that there was no significant difference between the burned plot and reference plot on the soil fauna species during litter decomposition. Also, the Pielou index, Shannon-Wiener index, and Margalef index increased as the decomposition continued while the Simpson index declined. There was a significant relationship between soil individual number, species number, and precipitation respectively. Furthermore, PCoA analysis results showed that fire disturbance was the main factor that affected litter decomposition during the primary stage while cumulative time controlled the final stage. The results of these experiments indicated that litter decomposition was delayed by the forest fire, but the decomposition rate and soil fauna community recovered with time.

**Key words:** Forest fire; Litter decomposition; Soil fauna; *Phyllostachys violascens*

森林演替是生态系统过程的综合结果, 包括物种组合、土壤环境、土壤动物群落结构、林内微环境等诸多变化过程<sup>[1]</sup>。作为森林生态系统最重要的自然干扰因子之一, 林火对凋落叶分解、土壤动物群落的分布以及森林生态系统的循环过程具有重要作用<sup>[2-3]</sup>。森林火烧后林内小气候发生变化, 土壤温度上升, 湿度降低, 通过消耗凋落叶层、燃烧植被、分解土壤有机质等方式, 改变了森林地表以及土壤表层生物量, 影响土壤动物及微生物区系群落结构乃至整个森林生态系统<sup>[4-5]</sup>。研究发现, 林火发生后短期内对凋落叶分解有抑制作用, 长期则可能逐渐转变为积极的促进作用<sup>[6]</sup>。

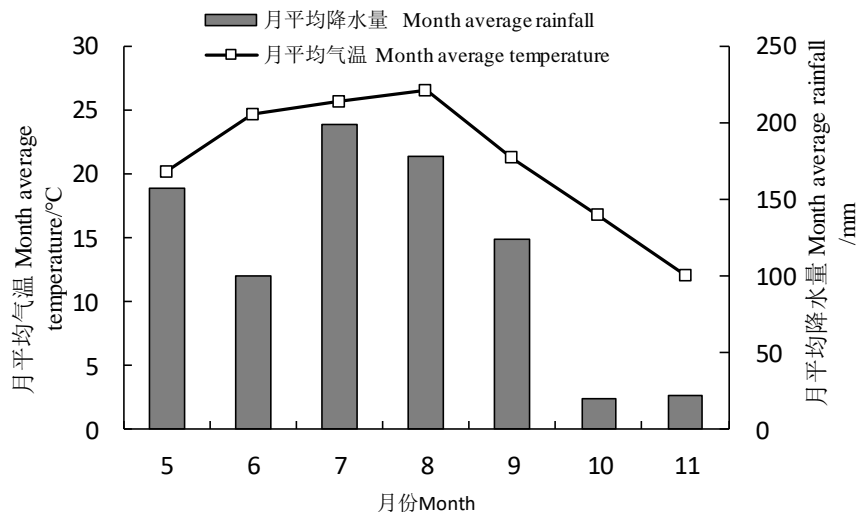
凋落叶分解作为陆地生态系统物质循环和能量流动的核心环节之一, 不仅可促进森林养分的归还和森林更新, 其分解情况又会直接或间接地受到土壤环境、土壤动物群落结构、林内微环境变化的影响<sup>[7-8]</sup>。经过长期的研究, 国内外对森林生态系统中凋落叶分解方面的研究内容涵盖了凋落叶的空间分布及生态作用、凋落叶分解动态变化、环境气候变化, 碳氮磷等营养元素的计量等方面<sup>[9-12]</sup>, 树种主要集中在针叶林和阔叶林上<sup>[13]</sup>, 而这与竹林在我国林业生产中的地位是不相匹配的<sup>[14-15]</sup>。

本研究以都江堰市蒲阳镇雷竹林火烧迹地为研究对象, 以毗邻雷竹林为对照, 采用凋落叶分解袋法, 研究雷竹凋落叶分解过程中火烧迹地土壤动物群落变化特征, 为了解雷竹凋落叶分解中物质循环过程以及火烧迹地恢复与重建提供数据支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于成都平原与四川盆周西缘山地接合部的都江堰市蒲阳镇 (103°44'73"E, 31°4'45"N), 海拔 714~725 m, 属亚热带季风性湿润气候, 为浅切割低山地貌类型。年平均气温 15.2 °C, 极端最高、最低温度分别为 38 °C 和 -10 °C, 年平均相对湿度 81%, 年平均降水量 1 243 mm, 年平均日照时数 1 024 h, 无霜期 269 d。土壤为黄壤, 质地为重壤质, pH 6.5~6.8。植被主要有雷竹 (*Phyllostachys violascens*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、核桃 (*Juglans regia*) 和蒲公英 (*Taraxacum mongolicum*)。试验期间 (2016 年 5—11 月) 都江堰蒲阳镇月平均降水量及气温如图 1 所示。



注：数据来源都江堰气象局蒲阳镇观测站。Note: The data was from the Puyang Town Observatory of Dujiangyan Meteorological Bureau.

图1 样地气候动态变化图

Fig. 1 Dynamic change of climate in the sample plots

## 1.2 试验方法

于2016年4月收集雷竹凋落叶，剔除泥土等杂质后带回室内风干，采用凋落物网袋法<sup>[16]</sup>对雷竹凋落叶分解过程中土壤动物群落进行研究，将收集的雷竹叶称取10.00 g装入18目的凋落叶袋中，将封口后的凋落物袋放置于坡向和坡位向一致的样地内，并将其固定于土壤表面，火烧迹地和对照样地各放置21个凋落物袋，共计42个。

2016年5—11月每月分别收集火烧迹地和对照样地内的凋落物袋各3个，标记后装入黑布袋中迅速带回实验室，将袋外泥土去除，袋内基质全部取出放置于解剖盘中，手捡大型土壤动物，然后采用Tullgren法分离凋落叶中的中小型土壤动物，采用75%酒精溶液收集，参照《中国土壤动物检索图鉴》<sup>[17]</sup>和《昆虫分类检索》<sup>[18]</sup>，在体式显微镜（SZ760）下进行分类和计数，一般鉴定至目、科等分类阶元。将剩余的凋落叶于65℃烘干后称重，统计凋落叶质量损失率。

## 1.3 数据处理

采用Shannon-Wiener多样性指数 ( $H'$ )、Pielou均匀度指数 ( $J$ )、Simpson优势度指数 ( $C$ ) 和Margalef丰富度指数 ( $D$ ) 对土壤动物群落进行多样性分析<sup>[19]</sup>。

$$H' = -\sum P_i \ln P_i;$$

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

$$C = \sum (n_i / N)^2;$$

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

式中， $P_i = n_i / N$ ， $n_i$ 为第*i*个类群的个体数量， $S$ 为类群数； $N$ 为所有类群的个体数量。

凋落叶质量损失率  $D_{wi} = (\Delta M / M_0) \times 100\%$

式中， $D_{wi}$ 为第*i*个月的质量损失率（%）， $\Delta M$ 为各月所取样品的损失质量（g）； $M_0$ 为投放时分解袋内投放质量（g）。

将分解袋内凋落叶的重量损失作为凋落叶的分解部分，不同样地分解袋内的分解速率采用Olson指数衰减模型<sup>[20]</sup>进行动态模拟获得：

$$X/X_0 = e^{-KT}$$

式中， $X_0$ 为凋落叶初始重量（g）， $X$ 为经过时间*T*后的凋落叶残留量（g）， $T$ 为分解时间， $K$ 为凋落叶分解系数（ $K$ 值越大，凋落叶分解越快）。

按照原始捕获量占捕获总量的百分比来划分各类群数的数量等级，个体数量占捕获总量的10.0%以上者为优势类群（+++），占1.0%~10.0%者为常见类群（++），不足1.0%者为稀有类群（+）<sup>[21]</sup>。

采用Excel10.0和SPSS19.0对数据进行分析与处理。采用独立样本T检验对土壤动物群落特征进行差异性检验。采用R语言进行PCoA排序分析。利用双因素方差分析检验样地类型以及月份动态对土壤动物群落多样性的影响。土壤动物群落个体数和类群数与气温和降水量采用Pearson相关性分析,显著性水平设定为 $P=0.05$ 。

## 2 结果

### 2.1 凋落叶质量损失率

不同样地凋落叶质量损失率随分解时间的推移而逐渐上升,其分解的过程总体上可以划分为3个阶段(图2),第一阶段5—7月,为分解初期,其分解特点主要表现为两样地凋落叶的质量损失率均随时间的推移而上升,其中,对照样地质量损失率高于火烧迹地,两样地在6月质量损失率差异达到最大后,至7月差异逐渐缩小;第二阶段7—9月,为分解中期,两个处理的凋落叶质量损失速率减缓,同时,凋落叶质量损失率差异为各分解阶段的最小;第三阶段9—11月,为分解后期,两个样地凋落叶分解在经历上阶段缓慢的过程后,凋落叶质量损失率迅速上升,同时,随着时间的推移,两个处理下凋落叶质量损失率的差异逐渐增大,至10月和11月时,火烧迹地凋落叶分解的质量损失率高于对照样地,显著性分析表明,实验分解过程中,火烧迹地与对照样地凋落叶的质量损失率差异均未达显著水平( $P>0.05$ )。

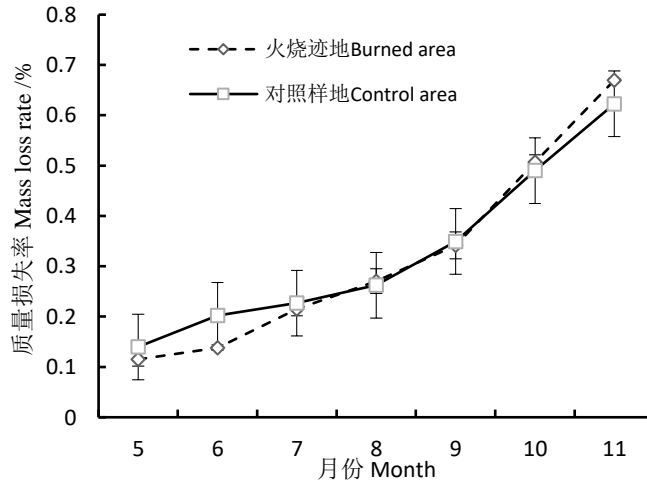


图2 分解袋中雷竹凋落叶分解动态

Fig. 2 Dynamic changes of decomposition of *Phyllostachys violascens* litters in burned and control area

采用指数衰减模型来计算雷竹凋落叶分解过程中的分解时间和分解系数( $K$ )。从表1可以看出,对照样地雷竹凋落叶分解系数为0.151,高于火烧迹地的分解系数值(0.122),同时,对照样地雷竹凋落叶分解至50%时所需时间 $t_{0.5}$ 为4.59,分解至95%时所需时间 $t_{0.95}$ 为19.83,均较火烧迹地雷竹凋落叶分解至50%时所需时间( $t_{0.5}=5.68$ )和分解至95%时所需时间( $t_{0.95}=24.56$ )短。

表1 凋落叶分解时间和分解系数

Table 1  $K$  values and decomposition time of litter

样地 Plot	半分解时间 ( $t_{0.5}$ ) Time to decompose 50% of the litter	95%分解时间 ( $t_{0.95}$ ) Time to decompose 95% of the litter	分解系数 ( $K$ ) Decomposition coefficient
火烧迹地 Burned area	5.68	24.56	0.122
对照样地 Control area	4.59	19.83	0.151

### 2.2 土壤动物的群落组成特征

本次凋落叶分解试验共捕获土壤动物824只,分属于33类,其中,优势类群为缓蟎科、蚁科、线虫纲、等节蟎科,所占百分比为49.27%;常见类群以懒甲蟎科、管蓟马科、蜈蚣科、丽甲蟎科等类群为主,占土壤动物总个体数的42.6%;剩余蜈蚣科等20类为稀有类群,占土壤动物总个体数的8.13%(表2)。其中,对照样地凋落叶分解袋共收集土壤动物449只,大于火烧迹地凋落叶分解袋土壤动物个体数(375只)。

统计分析表明, 火烧迹地和对照样地土壤动物个体数具有显著差异 ( $P < 0.05$ ), 而类群数无显著差异 ( $P > 0.05$ )。

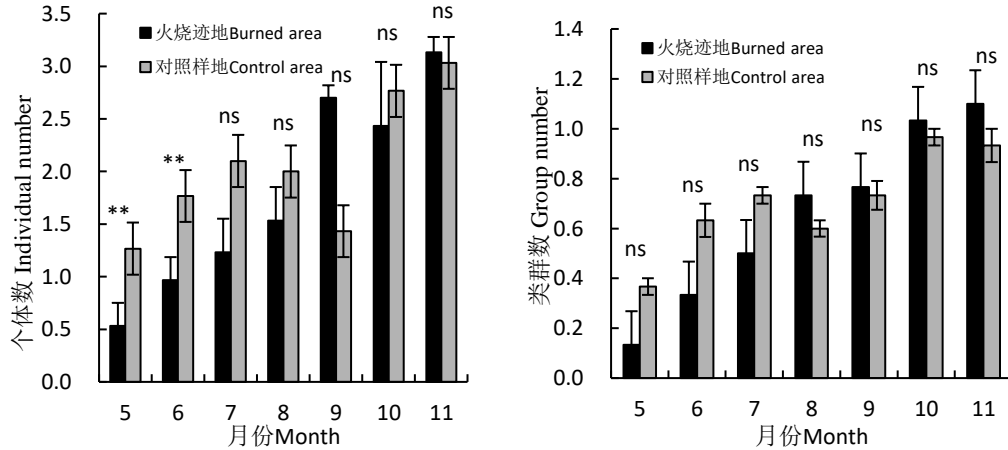
表2 凋落叶分解过程中土壤动物群落组成  
Table 2 Composition of soil fauna community during the litter decomposition

类群 Group	火烧迹地 Burned area		对照样地 Control area		个体数 Individuals (n)	百分比 Percent /%	多度 Abundance
	个体数 Individuals(n)	百分比 Percent /%	个体数 Individuals (n)	百分比 Percent /%			
缓螬科 Sejidae	54	14.4	71	15.81	125	15.17	+++
线虫纲 Nematoda	39	10.4	60	13.36	99	12.01	+++
等节蟊科 Isotomidae	42	11.2	55	12.25	97	11.77	+++
蚁科 Formicidae	45	12	40	8.91	85	10.32	+++
丽甲蟊科 Liacaridae	36	9.6	41	9.13	77	9.34	++
懒甲蟊科 Nothridae	35	9.33	36	8.02	71	8.62	++
管蓟马科 Phlaeothripidae	29	7.73	34	7.57	63	7.65	++
康蚋科 Campodeidae	10	2.67	22	4.9	32	3.88	++
半虫齿科 Hemipsocidae	13	3.47	7	1.56	20	2.43	++
隐颚蟊科 Cryptognathidae	14	3.73	6	1.34	20	2.43	++
刺盲蛛科 Podocidae	7	1.87	9	2	16	1.94	++
蜈蚣科 Scolopendriidae	2	0.53	13	2.9	15	1.82	++
蜘蛛科 Araneae	6	1.6	9	2	15	1.82	++
棘跳科 Onychiuridae	7	1.87	6	1.34	13	1.58	++
地蛛科 Atypidae	6	1.6	3	0.67	9	1.09	++
白蚁科 Termitidae	4	1.07	4	0.89	8	0.97	+
虫齿科 Psocidae	4	1.07	4	0.89	8	0.97	+
山蛩科 Spirobolidae	4	1.07	3	0.67	7	0.85	+
幺蛩科 Scolopendrellidae	2	0.53	4	0.89	6	0.73	+
蚁甲科 Pselaphidae	-	-	6	1.34	6	0.73	+
隐翅甲科 Staphylinidae	-	-	5	1.11	5	0.61	+
拟步甲科 Tenebrionidae	3	0.8	-	-	3	0.36	+
露尾甲科 Nitidulidae	1	0.27	2	0.45	3	0.36	+
哈氏盾科 Hubbardiidae	3	0.8	-	-	3	0.36	+
石蛎科 Machilidae	1	0.27	2	0.45	3	0.36	+
蟋蟀科 Gryllidae	3	0.80	-	-	3	0.36	+
蝇科 Muscidae	2	0.53	-	-	2	0.24	+
钩马陆科 Harpagophoridae	2	0.53	-	-	2	0.24	+
疣跳科 Neanridae	-	-	2	0.45	2	0.24	+
木伪蝎科 Neobisiidae	-	-	2	0.45	2	0.24	+
圆蟊科 Sminthuridae	-	-	2	0.45	2	0.24	+
长角蟊科 Entomobryidae	1	0.27	-	-	1	0.12	+
绵螯科 Spongiphoridae	-	-	1	0.22	1	0.12	+
类群数 Group(N)	27		27		33		
总个体数 Total Ind.(n)	375		449		824		

### 2.3 土壤动物的群落动态变化特征

两个处理分解袋中,土壤动物群落个体数和类群数均随分解的推进而逐渐增加,其中,土壤动物个体数最大值均出现在11月,土壤动物类群数的最大值则分别出现在10月和11月(图3)。同时,与火烧迹地凋落叶分解过程中土壤动物数量除8月和11月外,其余月份均高于火烧迹地,类群数则表现出5—7月以对照样地高于火烧迹地,8—11月则低于火烧迹地。其中,两个处理的土壤动物个体数和类群数差值总体表现出分解初期较大,在分解后期较小的特点。

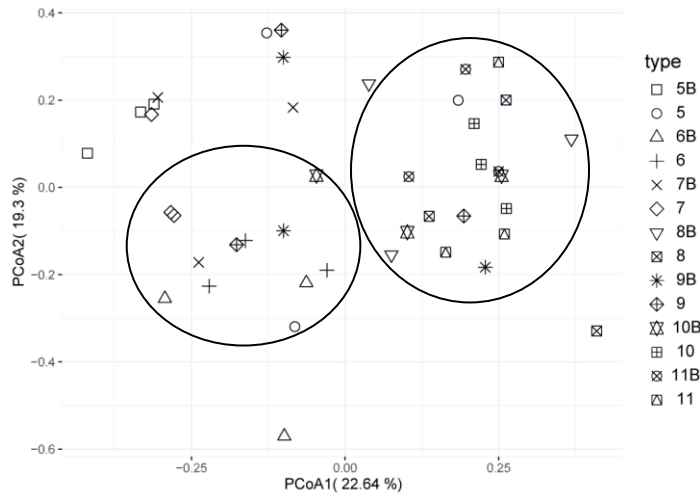
差异性检验结果显示,初期(5月和6月)对照样地土壤动物个体数显著高于火烧迹地( $P < 0.05$ ),中后期差异逐渐减小并逐渐趋于一致,而在整个过程中,火烧迹地和对照样地分解袋中土壤动物的类群数均无显著差异( $P > 0.05$ ),这显示出土壤动物类群数的稳定性较个体数更强。



注:图中误差棒为标准误。下同。Note: The error bars in the figure are standard error. The same below.

图3 雷竹凋落叶分解过程中分解袋内土壤动物个体数与类群数月动态变化

Fig. 3 Monthly dynamic changes of individual and group number of soil fauna during litter decomposition of *Phyllostachys violascens* in each bag



注:图例中数字表示月份,B表示为火烧迹地。Note: The number represents the month, and B represents the burned area.

图4 土壤动物群落PCoA分析

Fig. 4 PCoA analysis of soil fauna community

主坐标分析(PCoA)表明(图4),火烧迹地及对照样地雷竹叶不同分解时间土壤动物群落聚集可分为2组,其中,第一组以火烧迹地5—7月、9月和对照样地5月、6月、8月的土壤动物群落较为相似,第二组以火烧迹地8—11月和对照样地5月、8—11月的土壤动物群落具有较好的相似性,可以看出,凋落叶分

解初期受火烧干扰的影响较大(组1),同时也显示出分解时间对于凋落叶分解后期有着重要影响,第二组中,无论受火烧干扰与否,8—11月显现出较高的相似性,表明凋落叶分解在初期受火烧干扰较大,后期受分解时间影响较大。

#### 2.4 土壤动物多样性动态变化特征

土壤动物群落多样性指数变化结果见图5。可以看出,两个处理除优势度指数值随分解时间的推移而下降外,其余三个指数均随着分解时间的推移而呈上升趋势。其中,火烧迹地土壤动物群落均匀度指数较对照样地波动大,均匀度指数的最低和最高值出现在火烧迹地的5月和10月;火烧迹地的多样性指数在5—7月低于对照,8—11月则较对照高,表明火烧干扰后,随着时间的推移,土壤动物群落多样性指数有所提高;与多样性指数相反,优势度指数呈现逐渐减低的变化趋势,表明随着凋落叶的分解过程推进,参与分解的土壤动物类群越来越丰富,其变化具体表现为5—7月火烧迹地低于对照,8—11月则较对照高;丰富度指数随着分解时间的推进逐渐增大,其中,火烧迹地以5—7月和9月低于对照,在8月和10—11月则高于对照。

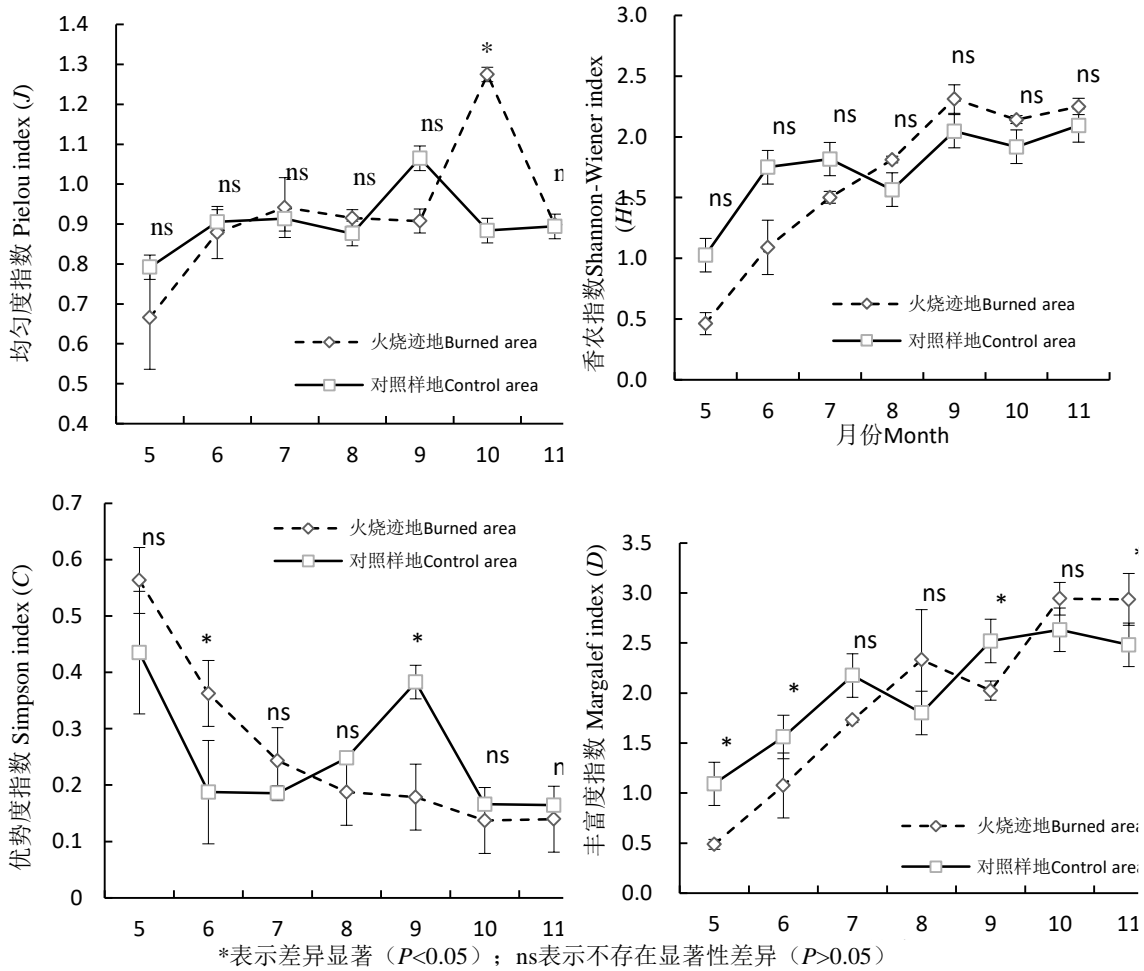


图5 雷竹凋落叶分解过程中土壤动物群落多样性月动态变化  
Fig. 5 Monthly dynamic changes in the diversity of soil fauna community during the litter decomposition

统计分析结果表明:火烧迹地与对照样地间的土壤动物群落均匀度指数在10月表现出显著差异 ( $P < 0.05$ ),多样性指数各月均无显著差异 ( $P > 0.05$ ),优势度指数在6月和9月均存在显著差异 ( $P < 0.05$ ),丰富度指数在5月、6月、9月和11月均存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

进一步对雷竹凋落叶分解过程中的土壤动物群落相关指标与样地类型和月份进行双因素方差分析(表3),结果显示,样地类型对土壤动物群落结构及多样性特征的影响未达显著水平 ( $P > 0.05$ ),但不同月份的土壤动物群落结构及多样性存在极显著差异 ( $P < 0.01$ )。在样地类型和不同月份的交互作用下,

土壤动物类群数和多样性指数均存在极显著差异 ( $P < 0.01$ ), 同时, 土壤动物群落均匀度指数、优势度指数、丰富度指数存在显著差异 ( $P < 0.05$ )。

表 3 凋落叶分解过程中土壤动物多样性的双因素方差分析

**Table 3** Two-way ANOVA for the diversity of soil fauna during litter decomposition

项目 Item	个体数 Individual number	类群数 Group number	多样性指数( $H'$ ) Shannon-Wiener index	均匀度指数( $J$ ) Pielou index	优势度指数( $C$ ) Simpson index	丰富度指数( $D$ ) Margalef index	质量损失率 Mass loss rate
样地类型 Type	0.762	0.35	1.339	1.01	0.18	0.182	0.09
月份 Month	6.051	24.973	19.262	4.105	8.647	16.17	252.026
样地类型×月份 Type×Month	1.811	6.377	6.361	1.154	3.434	2.515	2.806

### 2.5 水热条件与凋落叶分解各因子的相关关系

由表 4、表 5 可知, 在雷竹林凋落叶分解过程中, 不同月份土壤动物个体数 ( $r = -0.728$ ,  $P = 0.037$ )、类群数 ( $r = -0.582$ ,  $P = 0.039$ ) 及多样性指数与月平均降水量 ( $P < 0.05$ ) 和月平均气温 ( $P > 0.05$ ) 呈负相关关系。进一步对不同样地地下个体数和类群数与水热条件的相关性分析来看, 对照样地中土壤动物个体数与降水间的相关性更加密切, 水热条件与对照样地土壤动物类群数则有更高的相关系数, 表明对照样地土壤动物群落受水热条件的影响高于火烧迹地。同时, 月平均气温和月平均降水量分别与优势度指数和丰富度指数呈正相关关系, 均匀度指数与月平均气温呈正相关, 与月平均降水量呈负相关。

表 4 雷竹凋落叶分解过程中气候因素与土壤动物多样性指数的相关性

**Table 4** Correlation analysis between climatic factors and soil fauna during the litter decomposition of *Phyllostachys violascens*

气候因素 Climatic factor	多样性指数( $H'$ ) Shannon-Wiener index	均匀度指数( $J$ ) Pielou index	优势度指数( $C$ ) Simpson index	丰富度指数( $D$ ) Margalef index
月平均气温 Month average temperature	-0.303	0.262	0.119	0.38
月平均降水量 Month average rainfall	-0.459	-0.101	0.375	0.189

表 5 不同样地雷竹凋落叶分解过程中气候因素与土壤动物群落的相关性

**Table 5** Correlation analysis between climatic factors and soil fauna community during the litter decomposition of *Phyllostachys violascens*

气候因素 Climatic factor	个体数 Individual number			类群数 Group number		
	总个体数 Total individual number	火烧迹地 Burned area	对照样地 Control area	总类群数 Total group number	火烧迹地 Burned area	对照样地 Control area
月平均气温 Month average temperature	-0.698	-0.672	-0.667	-0.484	-0.451	-0.507
月平均降水量 Month average rainfall	-0.728	-0.686	-0.744	-0.582	-0.514	-0.661

## 3 讨论

### 3.1 雷竹凋落叶分解质量损失率变化

在试验期, 两个样地雷竹凋落叶质量损失率呈现出初期 (5—7月) 较高, 中期 (7—9月) 变缓, 后期 (9—11月) 再次升高的变化趋势, 黄张婷等<sup>[21]</sup>对雷竹叶分解过程质量损失率的研究也显示, 雷竹叶分解经历了初期质量损失率迅速提高阶段、中期变化不明显和后期持续上升三个阶段, 这主要与分解初期雷竹凋落叶易分解成分迅速分解, 凋落叶质量短期内大幅减少, 到试验中期, 剩下一些难降解的纤维



素等物质<sup>[22]</sup>,使得分解的速度趋于平缓,但随着分解时间的延长,参与凋落叶分解的微生物和土壤动物的种类及数量增加<sup>[23]</sup>,从而加速了雷竹凋落叶的分解速度有关。同时,两种处理下,分解初期表现出对照样地凋落叶质量损失率高于火烧迹地,中期两者基本保持一致,后期则表现出对照样地凋落叶质量损失率低于火烧迹地,李飞等<sup>[24]</sup>的研究也表明,林火发生后,凋落物分解速率大于自然更新林。这一方面由于火烧干扰导致了火烧迹地生态系统环境的变化,造成凋落叶分解过程中土壤动物群落组成的差异<sup>[25]</sup>,同时,因为火烧直接或间接导致大量土壤动物和微生物死亡或逃离<sup>[26]</sup>,减缓了凋落叶的分解初期的速度,随着时间的推移,火烧迹地生态环境逐渐改善<sup>[27]</sup>,土壤生物等逐渐增加,火烧迹地凋落叶分解速率逐渐提升,到分解后期,土壤火烧迹地的土壤生物逐渐恢复,同时加上裸露地表温度较高,加大了土壤生物活性,从而促进凋落叶的快速分解。

### 3.2 火烧迹地对凋落叶分解过程中土壤动物群落的影响

凋落叶分解过程中土壤动物群落特征显示,两个样地凋落叶分解袋土壤动物的个体数和类群数月动态变化规律基本一致,均呈现初期低后期高的特征,这与相关研究结果一致<sup>[28]</sup>。同时,两个处理的土壤动物个体数和类群数差值总体表现出分解初期较大,后期逐渐缩小的特点,表明火烧迹地随着时间的推移,其生态系统内的土壤动物个体数和类群数均呈现逐渐恢复的趋势。其中,火烧迹地土壤动物个体数仅以9月和11月高于对照,而类群数在8—11月均高于对照,表明火烧迹地土壤动物类群数的恢复波动较个体数小,这与土壤动物个体数量受食物来源的限制较大有关<sup>[29]</sup>。本研究中,火烧迹地土壤动物群落恢复到火烧前的水平仅用了4~5个月,而史宝忠<sup>[30]</sup>对6年的火烧迹地研究显示,未火烧林地土壤动物群落个体数与类群数优于火烧迹地,表明不同地区火烧迹地土壤动物群落恢复到(超过)火烧前水平所需要的时间不同,张雪萍等<sup>[31]</sup>的研究认为,轻度火烧后1—3年大型土壤动物种类和数量很少,火烧后6-7年中小型土壤动物恢复迅速并逐渐稳定,并超过未受火烧的地区,而中、重度火烧后土壤动物种类和数量恢复到火烧前的水平约需16年时间。同时,本文主要从凋落物分解方面研究土壤动物对火烧干扰的响应,而目前的研究主要对土层中的土壤动物群落进行了统计,因此在火烧迹地土壤动物群落恢复时间的研究存在较大的差异。

多样性指数作为生态环境评价的重要指标,可以反映群落组成的复杂程度,其高低能反映群落的稳定性,常用来评价群落生态的组织水平,开展相关研究对于整个生态系统的研究有重要的意义<sup>[32]</sup>。本研究中,火烧迹地和对照的四个多样性指数呈现出一致的变化趋势,表现出随着凋落叶分解时间的延续,土壤动物均匀度指数、多样性指数和丰富度指数均呈上升趋势,而优势度指数则逐渐降低,表明随着凋落叶分解进程的推进,参与凋落叶分解的土壤动物数量和类群也在增加。同时,两者间又存在一定的差异,各指数值主要表现在以7月或8月前后为临界点。

### 3.3 凋落叶分解与土壤动物群落的相关分析

凋落叶分解与土壤动物群落的相关分析结果显示,月平均降水量对土壤动物群落个体数和类群数均存在显著的负相关关系,这主要是由于凋落物袋分布在地表,而过多的降水直接影响土壤动物的生存、繁殖条件,从而在一定程度上降低了土壤动物个体数和类群数的增长速度<sup>[33-34]</sup>,同时,过高的温度也对土壤动物群落的个体数量和类群数产生负面影响<sup>[35]</sup>,这主要是由于裸露地表在太阳光直射下,凋落叶表层温度迅速上升,大多数土壤动物为躲避高温而逃离,然而,在分解的中后期,由于高温高湿的环境条件下,参与分解的微生物迅速增加,加速了凋落叶的分解,同时,部分以真菌等为食的土壤动物,如跳虫等数量也得到一定的增长,因此,本试验中凋落叶分解后期,丰富的水热条件加速到了分解速度<sup>[36]</sup>。土壤动物个体数和类群数与凋落叶的分解率具有较强的相关性,同时,凋落叶经过土壤动物的破碎后,增加了微生物与凋落叶的接触面积,为微生物生长繁殖提供了营养。

## 4 结论

与对照相比,火烧干扰没有改变雷竹凋落叶分解过程中凋落叶质量损失率、土壤动物群落及多样性指数的变化规律,但随着时间的推进,干扰提高了凋落叶分解速率及土壤动物群落多样性。本试验仅对火烧干扰后凋落叶分解速度及土壤动物特征等方面进行了初步研究,而雷竹凋落叶分解是一个长期的过程,并且其分解还受到土壤微生物、土壤性质及环境条件等因素的影响,今后应重点结合土壤微生物及土壤环境条件等恢复过程,深入探索火烧迹地雷竹凋落叶分解过程和机理。

参考文献 (References)

- [1] Cortez J, Gillon D. Plant traits, litter quality and decomposition in a Mediterranean old-field succession[J]. *Plant & Soil*, 2007, 296 (1/2):19-34.
- [2] Li M, Wu P F, Wang Y. Vertical distributions of soil fauna communities on the eastern slope of Gongga Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2295-2307. [李萌, 吴鹏飞, 王永. 贡嘎山东坡典型植被类型土壤动物群落特征[J]. *生态学报*, 2015, 35(7): 2295-2307.]
- [3] Li H Y, Xin Y, Zhao Y S. Distribution characteristics of soil organic carbon of burned area under different restorations [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9):2747-2753. [李红运, 辛颖, 赵雨森. 火烧迹地不同恢复方式土壤有机碳分布特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(9):2747-2753.]
- [4] Wang D. Study on characteristics of plant communities at burned area of Daxing'an mountains[D]. Huhehot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. [王鼎. 大兴安岭兴安落叶松林火烧迹地植被群落特征研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.]
- [5] Si R G N. Studies on soil microbiological characteristics of Daxing'an mountains burned areas under different management mode[D]. Huhehot: Inner Mongolia Normal University, 2016. [斯日古楞. 大兴安岭火烧迹地不同经营方式土壤微生物特性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2016.]
- [6] Bu T, Zhang S K, Song X Z, et al. Effects of several environmental factors on litter decomposition[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2013, 30(5):740-747. [卜涛, 张水奎, 宋新章, 等. 几个环境因子对凋落物分解的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2013, 30(5):740-747.]
- [7] Shure D J, Gottschalk M R, Parsons K A. Litter decomposition processes in a floodplain forest[J]. *American Midland Naturalist*, 1986, 115(2): 314-327.
- [8] Smith S W, Woodin S J, Pakeman R J, et al. Root traits predict decomposition across a landscape-scale grazing experiment[J]. *New Phytologist*, 2014, 203(3):851-862.
- [9] Jia B R, Zhou G S, Liu Y Z, et al. Spatial pattern and environmental controls of annual litterfall production in natural forest ecosystems in China[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2016, 46(11): 1304-1311. [贾丙瑞, 周广胜, 刘永志, 等. 中国天然林凋落物量的空间分布及其影响因子分析[J]. *中国科学:生命科学*, 2016, 46(11):1304-1311.]
- [10] Liu Y W, Yang W Q, Wu F Z, et al. Soil organic layer enzyme activities in subalpine coniferous forests of Western Sichuan, China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, 26(5): 747-753. [刘育伟, 杨万勤, 吴福忠, 等. 川西亚高山针叶林土壤有机层酶活性[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 747-753.]
- [11] Li J M, Zhang Y Y, Li X, et al. Impact of precipitation intensity on the decomposition of floor litter and the fine roots of *Picea schrenkiana*[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2017, 37(3): 360-369. [李吉玫, 张毓涛, 李翔, 等. 降水强度变化对天山云杉地表凋落物和细根分解的影响[J]. *植物研究*, 2017, 37(3):360-369.]
- [12] Zuo W, He K N, Tian Z, et al. Surface litter stoichiometry for five forest types in alpine region, Qinghai, China[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(9) : 2271-2278. [左巍, 贺康宁, 田赟, 等. 青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(9): 2271-2278.]
- [13] Zeng F, Qiu Z J, Xu X Y. Review on forest litter decomposition[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(1): 239-243. [曾锋, 邱治军, 许秀玉. 森林凋落物分解研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(1):239-243.]
- [14] Shinohara Y, Onozawa Y, Chiwa M, et al. Spatial variations in throughfall in a Moso bamboo forest: Sampling design for the estimates of stand-scale throughfall[J]. *Hydrological Processes*, 2010, 24(3): 253-259.
- [15] Zhou G, Meng C, Jiang P, et al. Review of carbon fixation in bamboo forests in China[J]. *Botanical Review*, 2011, 77(3):262-270.
- [16] Wang Z H, Yin X Q, Zhang C M. Effects of soil fauna communities on decomposition of *Abies nephrolepis* litter in Changbai Mountains[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, 52(7): 59-67. [王振海, 殷秀琴, 张成蒙. 土壤动物在长白山臭冷杉凋落物分解中的作用[J]. *林业科学*, 2016, 52(7): 59-67.]
- [17] Yin WY. Chinese retrieval of soil animal[M]. Beijing: Science Press, 1998: 1-6. [尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1-6.]
- [18] Li H X, Sui J Z, Zhou S X. Insect classification and retrieval[M]. Beijing: Agriculture Press, 1987. [李鸿兴, 隋敬之, 周士秀. 昆虫分类检索[M]. 北京: 农业出版社, 1987.]
- [19] Liu H, Yuan X Z. Diversity of soil animals in Confucian graveyard of Qufu[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(5): 609-611. [刘红, 袁兴中. 曲阜孔林土壤动物多样性研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(5): 609-611.]
- [20] Liu Z G, Gao W J, Pan K W, et al. Discussion on the study methods and models of litter decomposition[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(6): 1993-2000. [刘增文, 高文俊, 潘开文, 等. 枯落物分解研究方法和模型讨论[J]. *生态学报*, 2006, 26(6): 1993-2000.]
- [21] Huang Z T, Zhang Y, Song Z L, et al. Decomposition rate and silicon dynamic of mulching residue under *Phyllostachys praecox* stands[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(23) : 7373-7381. [黄张婷, 张艳, 宋照亮, 等. 雷竹覆盖物分解速率及其硅含量的变化[J]. *生态学报*, 2013, 33(23) : 7373-7381.]
- [22] Wang W J, Yang W Q, Tan B, et al. The dynamics of soil fauna community during litter decomposition at different phenological stages in the subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(18): 5737-5750. [王文君, 杨万勤, 谭波, 等. 四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落

- 结构的关系[J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5737-5750.]
- [23] Wang X L, Yin X Q, Song B, et al. Main species litter decomposition and function of soil fauna in *Leymus chinensis* grassland[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(6): 143-149. [王星丽, 殷秀琴, 宋博, 等. 羊草草原主要凋落物分解及土壤动物的作用[J]. 草业学报, 2011, 20(6): 143-149.]
- [24] Li F, Hu T X, Zhao B Q, et al. Study on the dynamic changes of litter decomposition in burned areas in Great Xing'an Mountains. Forest Engineering, 2018, 34(5): 31-38. [李飞, 胡同欣, 赵彬清, 等. 大兴安岭火烧迹地凋落物分解动态变化研究[J]. 森林工程, 2018, 34(5):31-38.]
- [25] Zhang S H, Zhang X P. Soil animal community diversity in the burned areas of the Great Xing'an mountains, China[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2009, 15(5): 672-676. [张淑花, 张雪萍. 大兴安岭火烧迹地土壤动物的群落多样性[J]. 应用与环境生物学报, 2009, 15(5): 672-676.]
- [25] Zhang S H, Zhang X P. Guilds of Soil macro-animals in burned forest areas in Daxing'an Mountains[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(8): 70-72. [张淑花, 张雪萍. 大兴安岭森林火烧迹地大型土壤动物功能类群[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(8): 70-72.]
- [26] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, et al. A review of effects of fire on soil organic carbon in forests[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(9): 2800-2809. [郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 火烧对森林土壤有机碳的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(9): 2800-2809.]
- [28] Li X F, Han S J, Zhang Y. Indirect effects of precipitation on litter decomposition of *Quercus mongolica*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(2): 31-36. [李雪峰, 韩士杰, 张岩. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 31-36.]
- [29] Gongalsky K B, Persson T. Recovery of soil macrofauna after wildfires in boreal forests[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57(3):182-191.
- [30] Shi B Z. Study on soil fauna communities in burned and unburned woodland in Laodingshan[J]. Journal of Changzhi University, 2017,34(5):54-59. [史宝忠. 老顶山火烧迹地与未火烧林地土壤动物群落的比较研究[J]. 长治学院学报, 2017, 34(5):54-59.]
- [31] Zhang X P, Zhang S H, Li J K. Eco-geographical analysis of soil animals in burned forest areas in Greater Hinggan Mountains[J]. Geographical Research, 2006, 25(2): 327-334. [张雪萍, 张淑花, 李景科. 大兴安岭火烧迹地土壤动物生态地理分析[J]. 地理研究, 2006, 25(2):327-334.]
- [32] Li W, Cui L J, Zhao X S, et al. Community structure and diversity of soil animals in the Lake Taihu lakeshore wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(4) : 944-955. [李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 等. 太湖岸带湿地土壤动物群落结构与多样性[J]. 生态学报, 2015, 35(4): 944-955.]
- [33] Staley J T, Hodgson C J, Mortimer S R, et al. Effects of summer rainfall manipulations on the abundance and vertical distribution of herbivorous soil macro-invertebrates[J]. European Journal of Soil Biology, 2007, 43(3): 189-198.
- [34] Wang Z H, Yin X Q, Jiang Y F. Structure and diversity of soil fauna communities in the tundra of the Changbai Mountains, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(3): 755-765. [王振海, 殷秀琴, 蒋云峰. 长白山苔原带土壤动物群落结构及多样性[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 755-765.]
- [35] Butenko K O, Gongalsky K B, Korobushkin D I, et al. Forest fires alter the trophic structure of soil nematode communities [J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 109: 107-117.
- [36] Vitousek P M, Turner D R, Parton W J, et al. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawai'i: Patterns, mechanisms, and models[J]. Ecology, 1994, 75(2):418-429.

(责任编辑: 卢萍)