

土壤动物群落对楠木人工林凋落物和草本层去除的初期响应

苟丽琼¹, 肖玖金^{2,3}, 黄进平², 李英², 韦杨², 彭彩云^{3,4}, 罗曼丽^{3,4}

(1. 四川农业大学 理学院, 四川 雅安 625014; 2. 四川农业大学 旅游学院, 四川 都江堰 611830; 3. 四川农业大学 生态林业研究所, 四川 温江 611130; 4. 四川农业大学 林学院, 四川 温江 611130)

摘要: 为揭示去除林下凋落物和草本层(简称除凋和除草)对楠木 *Phoebe zhennan* 人工林土壤动物群落结构的影响, 以四川盆周西缘山地 60 年生楠木人工林为研究对象, 人工去除凋落物和草本层(RL)的方法, 以未处理样地(ck)为对照, 采用大型手捡和干、湿漏斗分离法, 分别在样地处理后 1 个月(RL₁)和 3 个月(RL₃)时对 0~5 cm, 5~10 cm, 10~15 cm 土层的土壤动物群落结构进行调查。结果显示: 实验共采集土壤动物 1 753 头, 分属 4 门 13 纲 32 目 99 科, 除凋除草降低了土壤动物密度和类群数。其中: ①与对照样地 ck₁ 相比, 样地 RL₁ 类群数极显著降低($P < 0.01$), 多样性指数、均匀度指数和优势度指数下降不显著($P > 0.05$), 丰富度指数(D)和密度类群指数(D_c)极显著降低($P < 0.01$)。②与对照样地 ck₃ 相比, 样地 RL₃ 土壤动物密度和类群数极显著低于对照($P < 0.01$), 土壤动物类群数极显著低于对照($P < 0.01$), 多样性指数、均匀度指数和优势度指数下降不显著($P > 0.05$), 丰富度指数(D)和密度类群指数(D_c)显著降低($P < 0.05$)。林下除凋除草会导致土壤动物平均密度、类群数以及多样性指数的降低, 进而影响整个森林生态系统功能的发挥。图 4 表 3 参 33

关键词: 森林土壤学; 楠木人工林; 凋落物草本层去除; 土壤动物群落

中图分类号: S714.8

文献标志码: A

文章编号: 2095-0756(2017)05-0895-12

Soil fauna community after removal of litter and herb layers in an artificial *Phoebe zhennan* plantation

GOU Liqiong¹, XIAO Jiujin^{2,3}, HUANG Jinping², LI Ying², WEI Yang², PENG Caiyun^{3,4}, LUO Manli^{3,4}

(1. College of Science, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, Sichuan, China; 2. Tourism College, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, Sichuan, China; 3. Institute of Ecological Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, Sichuan, China; 4. College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, Sichuan, China)

Abstract: As a main component of soil ecosystems, soil fauna play an important role in the process of soil element cycling, transformation, and migration; however, soil fauna diversity is closely related to ground cover which has a tremendous impact on soil moisture and temperature. To reveal responses of the soil fauna community to the loss of the litter and herb layers, soil fauna in a *Phoebe zhennan* plantation on the western Sichuan Basin border were studied after litter and herb layers were removed. In each sampled area, soil animals were collected by hand, recorded, and put into a container with alcohol. Then they were transported to a laboratory for detailed classification and identification. The meso- and microfauna samples were gleaned by the steel core and stored in special soil fauna sealing bags. Next, all samples were transported to a laboratory within 12 h and were subsequently separated by both the Tullgren and Baermann methods over 48 h. Mesofauna were observed by microscope after 4 h to avoid autolysis of Enchytraeidae. All collected soil fauna were counted and classified

收稿日期: 2016-09-05; 修回日期: 2016-11-19

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(31400457); 四川省景观与游憩研究中心资助项目(JGYQ2015012)

作者简介: 苟丽琼, 从事生物资源化学研究。E-mail: gliqiong@163.com。通信作者: 肖玖金, 副教授, 博士, 从事土壤生态学研究。E-mail: j.xiao@sicau.edu.cn

under a light microscope and were identified according to the reference of “Pictorial keys to the soil animals of China”. The experiments conducted in July and September, based on statistical analytical software SPSS and Excel, a density-group index (D_G) was made. Results showed a collection of 4 phyla from 13 classes with 32 orders having 99 families comprising a total of 1 753 individual soil fauna. Also, after removal of the litter and herb layers, decreases in the soil fauna groups from the two experiments and the D_G index in July were highly significant ($P < 0.01$). After a month with the litter and herb removals, compared with Control sites, the soil fauna average density decrease significantly ($P < 0.01$). Thus, the soil fauna community was deeply influenced by loss of the litter and herb layers, which revealed the relations between the underground biodiversity and the plant species. [Ch, 4 fig. 3 tab. 33 ref.]

Key words: forest soil science; *Phoebe zhennan* plantation; removal of litter and herbaceous layer; soil fauna community

楠木 *Phoebe zhennan* 材质优良、用途广泛^[1], 楠木人工林成为森林资源重要的组成部分, 在林业可持续发展中具有重要的地位, 除提供木材外, 还发挥着十分重要的生态功能^[2-5], 因此, 楠木人工林的培育和经营对提高森林蓄积量具有重要作用^[6]。土壤动物作为土壤生态系统重要的组成部分, 其种类多、数量大, 参与和推动着森林生态系统物质循环、信息传递和能量代谢等过程, 对森林生态系统中土壤的形成、发育以及肥力的提高具有十分的重要作用^[7-8]。目前, 对土壤动物的研究主要在动物学、生态学、土壤学 and 环境保护等领域^[8-10]。地被层是森林生态系统的重要组成部分之一, 对森林水文、生产力、生物地球化学循环等森林生态系统过程具有十分重要的影响^[11-12]。其中, 凋落物和草本层作为森林生态系统中物质交换的中枢, 与土壤动物的相互作用对土壤有机质的形成和养分的释放以及整个土壤生态系统有着十分重要的意义^[13-15]。受研究手段、复杂的生境以及林木自身生长等因素的制约, 目前, 对地被层与土壤动物群落特征的相互关系的研究甚少^[16-17]。土壤生态过程作为森林生态系统过程的重要组成部分, 对土壤生态过程的研究有助于深入揭示森林生态系统的各项生态服务功能, 从而为森林资源的经营保护和开发利用提供相关基础资料和理论依据^[18-21]。因此, 本研究选择四川盆周西缘山地楠木人工纯林为研究对象, 通过人工去除凋落物和草本层的林地控制试验方法调控植物多样性, 将未处理样地作为对照, 与去除凋落物和草本层的样地的土壤动物群落进行对比分析, 研究楠木人工林下土壤动物群落对林下地被层缺失的响应, 探讨楠木人工林下植物多样性下降对土壤动物群落特征的影响。

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结合部的都江堰市灵岩山, $30^{\circ} 44' 54'' \sim 31^{\circ} 22' 9'' N$, $103^{\circ} 25' 42'' \sim 103^{\circ} 47' E$, 是从青藏高原向成都平原的过渡地带, 海拔为 852~1 075 m, 为浅切割低山地貌类型, 由于同时受季风和地形的影响, 属中亚热带温湿型气候, 年平均气温为 15.2 $^{\circ} C$, 极端最高、最低气温分别为 38.0 $^{\circ} C$ 和 -10.0 $^{\circ} C$, 湿度大, 年平均相对湿度为 81%, 雨水充沛, 年平均降水量为 1 243 mm, 云雾多, 日照少, 年平均日照时数为 1 024.2 h, 无霜期为 269 d。地带性植被为亚热带常绿阔叶林。样地土壤为沙岩上发育的黄壤, 质地为重壤质, pH 6.5~6.8^[22]。

楠木人工林栽植于 20 世纪 50 年代, 是在洋槐 *Robinia pseudoacacia* 林采伐迹地上人工更新形成的, 初植密度为 3 333 株· hm^{-2} , 自然稀疏后, 曾进行过不定期的轻度择伐, 目前活立木为 833 株· hm^{-2} ^[22]。林下草本主要有铁线蕨 *Adiantum capillus-veneris*, 蜈蚣蕨 *Pteris vittata*, 野棉花 *Anemone vitifolia*, 青蒿 *Artemisia carvifolia*, 莎草 *Cyperus rotundus*, 麦冬 *Ophiopogon japonicus* 等, 盖度为 60%。凋落物层主要是楠木、各类灌木及草本的枯枝落叶。灌木主要有水麻 *Debregeasia orientalis*, 悬钩子 *Rubus* spp., 蚊母树 *Distylium racemosum*, 天目琼花 *Viburnum opulus* var. *calvescens*, 荆条 *Vitex negundo* var. *heterophylla*, 十大功劳 *Mahonia fortunei* 等, 盖度为 10%。样地基本概况: 海拔为 876 m, 林龄为 60 a, 密度为 833 株· hm^{-2} , 郁闭度为 70%, 楠木平均胸径为 18.0 cm, 平均树高为 15.6 m, 凋落物层平均厚度为 6.0 cm, 凋落物平均蓄积量为 3.30 t· hm^{-2} 。样地土壤含水量见表 1。

表 1 各处理土壤含水量

Table 1 Water condition of layers in each plot

土层/cm	土壤含水量/%			
	处理后 1 个月		处理后 3 个月	
	RL ₁	ck ₁	RL ₃	ck ₃
0~5	20.71	30.29	29.49	35.16
5~10	17.31	28.37	25.48	29.70
10~15	18.15	24.01	27.06	26.51

说明: RL₁ 和 RL₃ 分别表示凋落物和草本层去除后 1 个月和 3 个月, ck₁ 和 ck₃ 分别表示 1 个月和 3 个月时的对照样地。

1.2 野外取样及样品采集

于 2015 年 6 月初在楠木人工纯林内, 按照具有典型性、代表性的原则设置了 4 个面积均为 100 m² (10 m×10 m) 的样地, 样地间间距均大于 10 m, 其中 2 个为对照(保留凋落物和草本层), 2 个样地凋落物和草本层完全去除, 期间定期清除样地内的草本和凋落物。

分别于 2015 年 7 月初和 9 月初(分别为处理后 1 个月和 3 个月后)在各样地内按“品”字型布点, 选择 3 个 50 cm × 50 cm (0.25 m²) 的小样方, 分凋落物层(仅对照样地), 0~5, 5~10, 10~15 cm 土层进行土壤动物的手捡, 将所采集到的土壤动物放入盛有体积分数为 75% 的乙醇容器中杀死, 进行编号分类并计数, 带回实验室在解剖镜下分类鉴定。同时, 在各样点挖土壤剖面, 分 0~5, 5~10, 10~15 cm 共 3 层, 每层用环刀(直径为 5 cm, 体积为 100 cm³) 自下往上顺次取土样, 取土样 2 个·层⁻¹, 用尼龙网包好贴上标签装入黑色布袋, 带回实验室分别用 Tullgren 干漏斗和 Baermann 湿漏斗分离土样中的土壤动物。用尼龙网收集对照样地 10 cm × 10 cm (0.01 m²) 面积的凋落物, 包好贴上标签后, 装入黑色布袋带回实验室进行分离和鉴定^[23]。

1.3 土壤动物的分离鉴定及计数

在烘虫箱中对土壤动物进行分离, 烘虫箱温度控制在 35~40 °C, 分离时间为 48 h。分离出的土壤动物除湿生外, 均用盛有体积分数为 75% 的乙醇培养皿收集, 在解剖镜下观察计数; 湿生土壤动物的收集则用清水。凋落物与干生隔 12 h 观察 1 次, 湿生隔 4 h 观察 1 次, 观察间隔时间逐步增长, 对观察到的所有土壤动物进行分类并计数。

土壤动物的分类鉴定主要在双目解剖镜(Leica, EZ4HD)下进行, 采用《中国土壤动物检索图鉴》^[24]《中国亚热带土壤动物》^[25]《昆虫分类检索》^[26]和《幼虫分类学》^[27]进行分类鉴定, 鉴定至目、科等高级分类阶元。

1.4 数据分析与处理

1.4.1 多样性分析 采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H'), Margalef 丰富度指数(D), Pielou 均匀度指数(J), Simpson 优势度指数(C)和密度-类群指数(D_G)对土壤动物进行多样性分析^[28]。Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

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

式(1)中: $P_i = n_i/N$, n_i 为第 i 个类群的个体数; N 为所有类群的个体数。Margalef 丰富度指数(D):

$$D = (S-1)/\ln N \quad (2)$$

式(2)中: S 为类群数, N 为全部类群的个体总数。Pielou 均匀度指数(E):

$$J = H/\ln S \quad (3)$$

式(3)中: H 为 Shannon-Wiener 多样性指数, S 为类群数。Simpson 优势度指数(C):

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

式(4)中: n_i 为第 i 个类群的个体数; N 为所有类群的个体数。密度-类群指数(density-group index, D_G):

$$D_G = (g/G) \sum_{i=1}^g (D_i C_i / D_{\max} C) \quad (5)$$

式(5)中: D_i 为第 i 类群个体数; D_{\max} 为各群落中第 i 类群的最大个体数; g 为群落中的类群数; G 为各群落所包含的总类群数; C_i 即在 C 个群落中第 i 个类群出现的比率。

1.4.2 类群数量等级划分 个体密度占捕获总量密度的 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(+)^[28]。

1.4.3 数据的处理和分析 采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 完成, 采用 Origin 8.1 绘制图形。用独立样本 t 检验对不同样地间土壤动物群落组成进行检验, 显著性水平设定为 $P = 0.05$ 。对不服从正态分布的数据, 利用 $\log(\bar{x}+1)$ 转换, 如仍不服从正态分布, 则进行 Kruskal Wallis Test(H)非参数检验^[12]。

2 结果与分析

2.1 土壤动物类群及数量组成

样地土壤动物群落组成情况见表 2。

表 2 土壤动物群落组成统计

Table 2 Soil fauna community in *Phoebe zhennan* artificial plantation

类群	RL ₁		ck ₁		RL ₃		ck ₃		合计		优势度
	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	
螯蝓科 Chelisochidae	—	—	1.33	0.00	—	—	—	—	1.33	0.00	+
八孔蚶科 Octostigmatidae	—	—	133.33	0.31	—	—	—	—	133.64	0.15	+
巴蜗牛科 Bradybae	1.33	0.01	—	—	0.67	0.01	—	—	2.02	0.00	+
鼻蠹科 Rhinotermitidae	127.32	0.90	84.88	0.20	—	—	—	—	213.30	0.25	+
步甲科(幼)Carabidae(larva)	—	—	417.33	0.97	—	—	—	—	418.30	0.48	+
步甲蝼科 Carabodidae	—	—	33.33	0.08	—	—	33.33	0.14	66.88	0.08	+
草蠹科 Hodotermitidae	—	—	—	—	2.00	0.03	1.33	0.01	3.37	0.00	+
潮虫科 Oniscidae	0.67	0.00	4.67	0.01	—	—	—	—	5.36	0.01	+
赤蝼科 Erythraeidae	127.32	0.90	16.67	0.04	—	—	67.33	0.29	212.55	0.24	+
刺盲蛛科 Podoctidae	—	—	—	—	84.88	1.34	—	—	86.22	0.10	+
粗脉毛蚊(幼)Pachyneuridae(larva)	—	—	50.00	0.12	—	—	—	—	50.12	0.06	+
大赤蝼科 Anytidae	—	—	1.33	0.00	—	—	—	—	1.33	0.00	+
大蚓类 Megadrile oligochaetes	8.00	0.06	1.33	0.00	9.33	0.15	21.33	0.09	40.29	0.05	+
等节蛭科 Isotomidae	—	—	127.32	0.30	—	—	—	—	127.62	0.15	+
地蜈蚣科 Geophilidae	2.67	0.02	6.00	0.01	86.22	1.36	88.88	0.38	185.55	0.21	+
地蛛科 Atypidae	—	—	0.67	0.00	—	—	—	—	0.67	0.00	+
盾蝼科 Scutaridae	127.32	0.90	836.62	1.95	—	—	169.77	0.73	1137.29	1.31	++
蜚蠊科 Blattidae	—	—	33.33	0.08	—	—	84.88	0.37	118.66	0.14	+
肥蝼科 Anisolabididae	—	—	—	—	—	—	35.33	0.15	35.48	0.04	+
跗线蝼科 Tarsonemidae	—	—	487.98	1.14	—	—	84.88	0.37	574.36	0.66	+
副铗蚶科 Parajapygidae	—	—	—	—	0.67	0.01	5.33	0.02	6.03	0.01	+
管蓟马科 Phlaeothripida	—	—	127.32	0.30	—	—	169.77	0.73	298.12	0.34	+
果瓣螺科 Carychiidae	0.67	0.00	—	—	0.67	0.01	—	—	1.36	0.00	+
红蝼科(幼)Pyrrhocoridae(larva)	—	—	0.67	0.00	—	—	—	—	0.67	0.00	+
虹蛹螺科 Pupillidae	0.67	0.00	—	—	0.67	0.01	16.67	0.07	18.10	0.02	+
厚绥蝼科 Pachylae	—	—	—	—	—	—	33.33	0.14	33.47	0.04	+
花蝼科 Anthocoridae	—	—	—	—	0.67	0.01	—	—	0.68	0.00	+
花萤科 Cantharidae	—	—	450.00	1.05	—	—	—	—	451.05	0.52	+
华蛭科 Sinentomidae	—	—	133.33	0.31	—	—	—	—	133.64	0.15	+
环口螺科 Cyclophoridae	—	—	—	—	1.33	0.02	—	—	1.35	0.00	+
棘蛭科 Onychiuridae	636.62	4.50	381.97	0.89	84.88	1.34	169.77	0.73	1280.70	1.47	++

表 2 (续)

Table 2 Continued

类群	RL ₁		ck ₁		RL ₃		ck ₃		合计		优势度
	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	
铗蚋科 Japygidae	—	—	—	—	—	—	50.67	0.22	50.89	0.06	+
剑虻科(幼)Therevidae(larva)	—	—	—	—	—	—	16.67	0.07	16.74	0.02	+
角板盲蛛科 Ceratolasmatidae	—	—	83.33	0.19	—	—	—	—	83.52	0.10	+
节板蛛科 Liphistiidae	—	—	—	—	—	—	2.00	0.01	2.01	0.00	+
卷叶蛛科 Dictynidae	1.33	0.01	0.67	0.00	—	—	—	—	2.01	0.00	+
康蚋科 Campodeidae	—	—	—	—	—	—	1.33	0.01	1.34	0.00	+
叩甲科 Elateridae	1.33	0.01	—	—	—	—	—	—	1.34	0.00	+
懒甲螨科 Nothridae	—	—	50.00	0.12	—	—	—	—	50.12	0.06	+
狼栉蛛科 Zoridae	—	—	—	—	—	—	16.67	0.07	16.74	0.02	+
厉螨科 Laelapidae	—	—	—	—	—	—	84.88	0.37	85.25	0.10	+
鳞嗜科 Lepidopsocidae	—	—	84.88	0.20	—	—	169.77	0.73	255.58	0.29	+
鳞蛸科 Tomoceridae	127.32	0.90	—	—	—	—	—	—	128.22	0.15	+
瘤潮虫科 Tylidae	—	—	16.67	0.04	—	—	—	—	16.71	0.02	+
蝼蛄科(幼)Gryllotalpidae(larva)	—	—	—	—	—	—	0.67	0.00	0.67	0.00	+
蝼蛄科 Gryllotalpidae	—	—	3.33	0.01	—	—	—	—	3.34	0.00	+
毛角蟠科 Schizopteridae	509.3	3.60	127.32	0.30	—	—	—	—	640.52	0.74	+
毛马陆科 Polyxenidae	127.32	0.90	212.21	0.49	—	—	—	—	340.92	0.39	+
毛蠓科(幼)Psychodidae(larva)	—	—	—	—	—	—	17.33	0.08	17.41	0.02	+
毛蠓科 Psychodidae	—	—	—	—	—	—	16.67	0.07	16.74	0.02	+
毛蚊科(幼)Bibionidae(larva)	127.32	0.90	33.33	0.08	—	—	—	—	161.63	0.19	+
绵螋科 Spongiphoridae	—	—	0.67	0.00	—	—	—	—	0.67	0.00	+
木蠹科 Kalotermitidae	509.3	3.60	551.52	1.28	1.33	0.02	0.67	0.00	1067.73	1.23	++
拟壁钱科 Oecobiidae	1.33	0.01	4.00	0.01	0.67	0.01	—	—	6.03	0.01	+
拟球甲科(幼)Orthoperidae(larva)	—	—	0.67	0.00	—	—	—	—	0.67	0.00	+
盘甲科 Discodromidae	—	—	—	—	84.88	1.34	33.33	0.14	119.69	0.14	+
瓢甲科(幼)Coccinellidae(larva)	—	—	116.67	0.27	—	—	—	—	116.94	0.13	+
球体蛛科 Theridiosomatidae	—	—	—	—	—	—	0.67	0.00	0.67	0.00	+
球蛛科 Theridiidae	—	—	166.67	0.39	—	—	0.67	0.00	167.73	0.19	+
螻蛄科 Forficulidae	—	—	0.67	0.00	—	—	—	—	0.67	0.00	+
若甲螨科 Oripodoidea	—	—	50.00	0.12	—	—	—	—	50.12	0.06	+
生圆马陆科 Sphaeropoeidae	—	—	—	—	0.67	0.01	—	—	0.68	0.00	+
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	—	—	0.67	0.00	0.67	0.01	—	—	1.35	0.00	+
鼠妇科 Porcellionidae	128.66	0.91	88.00	0.20	—	—	56.00	0.24	274.02	0.32	+
水龟甲科 Hydrophilidae	—	—	—	—	0.67	0.01	—	—	0.68	0.00	+
蓑蛾科 Psychidae	—	—	33.33	0.08	—	—	—	—	33.41	0.04	+
苔甲科(幼)Scydmaenidae(larva)	—	—	0.67	0.00	—	—	—	—	0.67	0.00	+
苔甲科 Scydmaenidae	—	—	—	—	—	—	0.67	0.00	0.67	0.00	+
蛸虫科 Podocidae	11.33	0.08	331.33	0.77	174.43	2.75	321.98	1.39	844.07	0.97	+
蛸蛛科 Salticidae	—	—	50.00	0.12	—	—	—	—	50.12	0.06	+
瓦娄蜗牛科 Valloniidae	—	—	—	—	0.67	0.01	—	—	0.68	0.00	+
微离螨科 Microdispidae	—	—	134.88	0.31	—	—	—	—	135.19	0.16	+
尾足螨科 Uropodidae	—	—	—	—	84.88	1.34	433.33	1.88	521.43	0.60	+
蜈蚣目 Scolopendromorpha	—	—	0.67	0.00	0.67	0.01	—	—	1.35	0.00	+
吸螨科 Bdellidae	0.67	0.00	3.33	0.01	—	—	—	—	4.01	0.00	+

表2 (续)

Table 2 Continued

类群	RL ₁		ck ₁		RL ₃		ck ₃		合计		优势度
	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	平均密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	
线虫纲 Nematoda	8 360.94	59.08	29 878.69	69.58	4 074.37	64.34	14 956.00	64.74	57 527.75	66.18	+++
线蚓科 Enchytraeidae	2 716.24	19.19	3 395.31	7.91	1 358.12	21.45	4 091.03	17.71	11 626.96	13.38	+++
象甲科(幼)Curculionidae(larva)	—	—	2.67	0.01	—	—	—	—	2.68	0.00	+
逍遥蛛科 Philodromidae	—	—	1.33	0.00	—	—	—	—	1.33	0.00	+
小蕈甲科 Mycetophagidae	0.67	0.00	—	—	—	—	—	—	0.67	0.00	+
小蚓类 Microdrile oligochaetes	18.00	0.13	13.33	0.03	6.00	0.09	32.00	0.14	69.72	0.08	+
蟹蛛科 Thomisidae	—	—	0.67	0.00	—	—	2.00	0.01	2.68	0.00	+
烟管螺科 Clausiliidae	2.00	0.01	—	—	—	—	—	—	2.01	0.00	+
阎甲科(幼)Histeridae(larva)	—	—	—	—	—	—	0.67	0.00	0.67	0.00	+
阎甲科 Histeridae	—	—	0.67	0.00	0.67	0.01	—	—	1.35	0.00	+
么蚰科 Scutigrellidae	—	—	254.65	0.59	—	—	84.88	0.37	340.49	0.39	+
叶甲科 Chrysomelidae	—	—	50.67	0.12	—	—	—	—	50.79	0.06	+
夜蛾科 Noctuidae	—	—	16.67	0.04	—	—	—	—	16.71	0.02	+
蚁科 Formicidae	345.31	2.44	2 139.9	4.98	270.65	4.27	1 421.51	6.15	4 195.22	4.83	++
隐翅甲科 Staphilinidae	—	—	127.32	0.30	—	—	—	—	127.62	0.15	+
缨甲科(幼)Ptiliidae(larva)	—	—	—	—	0.67	0.01	—	—	0.68	0.00	+
蝇科(幼)Muscidae(larva)	—	—	—	—	—	—	50.00	0.22	50.22	0.06	+
蚰蜒目 Scutigera coleoptrata	—	—	0.67	0.00	—	—	169.77	0.73	171.18	0.20	+
圆蚰科 Sminthuridae	4.67	0.03	—	—	—	—	0.67	0.00	5.38	0.01	+
长角毛蚊科(幼)Hesperinidae(larva)	—	—	254.65	0.59	—	—	84.88	0.37	340.49	0.39	+
长角蚰科 Entomobryidae	—	—	607.33	1.41	—	—	—	—	608.74	0.70	+
长角长蚰科 Orchesellidae	127.32	0.90	—	—	—	—	—	—	128.22	0.15	+
长奇盲蛛科 Phalangidae	—	—	254.65	0.59	—	—	—	—	255.24	0.29	+
螳螂科 Ctenizidae	—	—	33.33	0.08	—	—	0.67	0.00	34.08	0.04	+
舟蛾科(幼)Notodontidae(larva)	—	—	—	—	0.67	0.01	—	—	0.68	0.00	+
珠甲螨科 Damaeidae	—	—	381.97	0.89	—	—	—	—	382.86	0.44	+
蛛蟋科 Phalangopsidae	—	—	0.67	0.00	—	—	—	—	0.67	0.00	+
准菌蚊科(幼)Ditomyiidae(larva)	—	—	50.00	0.12	—	—	—	—	50.12	0.06	+
平均密度(头·m ⁻²)	14 153.0		42 940.1		6 332.7		23 100.0		86 925.7		
总类群数/个	29		67		28		43		99		

说明：“—”表示无或未采集到，“+++”为优势类群，“++”为常见类群，“+”为稀有类群。

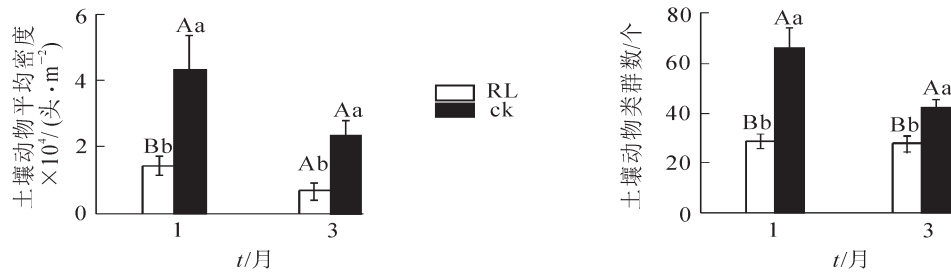
共采集到大中型土壤动物 1 753 头，分属 4 门 13 纲 32 目 99 类。优势类群为线虫纲和线蚓科，分别占总密度的 66.18% 和 13.38%；常见类群为蚁科、棘蚰科、盾蚰科和木虱科，分别占总密度的 4.83%、1.47%、1.31%、1.23%；毛角蚰科和长角蚰科等构成稀有类群，其密度占总密度的 11.60%。其中，样地 RL₁ 共采集到土壤动物 284 头，分属 3 门 9 纲 26 目 29 类，平均密度为 1.42×10⁴ 头·m⁻²；样地 ck₁ 共采集土壤动物 565 头，分属 4 门 12 纲 28 目 67 类，平均密度为 4.29×10⁴ 头·m⁻²。样地 RL₃ 共采集到土壤动物 108 头，分属 3 门 7 纲 22 目 28 类，平均密度为 0.63×10⁴ 头·m⁻²；样地 ck₃ 共采集到土壤动物 796 头，分属 4 门 13 纲 31 目 43 类，平均密度为 2.31×10⁴ 头·m⁻²。样地 RL₁ 中，优势类群为线虫纲、线蚓科，分别占总密度的 59.08%、19.19%；常见类群为棘蚰科、木虱科、毛角蚰科、蚁科，分别占总密度的 4.50%、3.60%、3.60%、2.44%；样地 ck₁ 的优势类群为线虫纲，占总密度的 69.58%；常见类群为线蚓科、蚁科、盾蚰科、长角蚰科、木虱科、跗线蚰科，分别占总密度的 7.91%、4.98%、1.95%、1.41%、1.28%、1.14% 和 1.15%。去除凋落物和草本层后，样地 RL₃ 优势类群为线虫纲、线蚓科，分别占总密度

的64.34%和21.45%; 常见类群为蚁科、蛭虫科、地蜈蚣科、尾足螨科、棘蛭科、盘甲科和刺盲蛛科, 分别占总密度的4.27%, 2.75%, 1.36%, 1.34%, 1.34%, 1.34%和1.34%; 对照样地ck₃优势类群为线虫纲、线蚓科, 分别占总密度的64.74%和17.71%; 常见类群为蚁科、尾足螨科和蛭虫科, 分别占总密度的6.15%, 1.88%, 1.39%。

2.2 除凋除草对土壤动物群落结构的影响

由图1可见: 在除凋除草后1个月(RL₁)和3个月(RL₃), 土壤动物密度和类群数均较同期对照(ck)低, 同时, 由于RL₃正处于秋季, 土壤动物密度和类群数均低于除凋除草后1个月的夏季。

t 检验结果表明: 1个月后, 与ck相比, RL能极显著降低土壤动物个体密度($t=4.276$, $P=0.006$)和类群数($t=4.698$, $P=0.002$); 3个月后, 与ck相比, RL能显著降低土壤动物个体密度($t=3.140$, $P=0.015$)和极显著降低类群数($t=3.662$, $P=0.004$)。同时, RL₁和RL₃($t=2.583$, $P=0.027$)间, ck₁和ck₃($t=3.440$, $P=0.011$)间土壤动物密度均存在显著差异, 而土壤动物类群数则差异不显著($t=0.299$, $P=0.771$; $t=0.586$, $P=0.571$)。



不同小写字母表示差异显著($P<0.05$), 不同大写字母表示差异极显著($P<0.01$)

图1 各生境土壤动物密度类群变化(平均值±标准误)

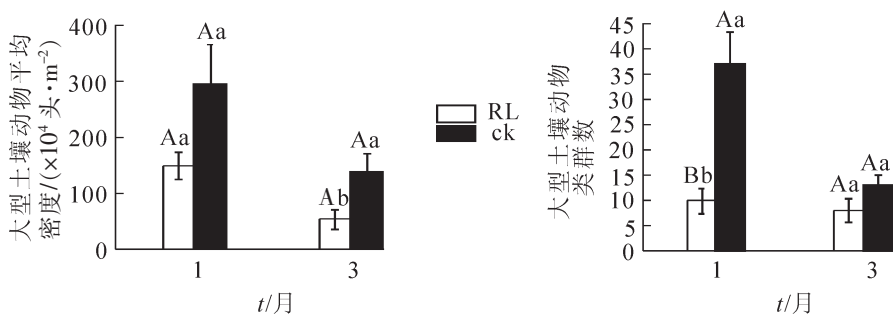
Figure 1 Distribution change of soil fauna in each horizontal habitat($\bar{x} \pm E_s$)

2.3 除凋除草对不同体型土壤动物群落的影响

根据尹文英等^[24]对土壤动物体型的划分, 体长为2.0~20.0 mm的为大型土壤动物, 体长小于2.0 mm的为中小型土壤动物。从图2和图3可以看出: 除凋除草(RL)均减少了大型和中小型土壤动物的密度和类群数。*t* 检验结果表明, RL₁对大型土壤动物密度没有显著影响($t=1.960$, $P=0.096$), 但极显著减少了中小型土壤动物密度($t=4.283$, $P=0.006$), 同时, 极显著减少了大型($t=4.046$, $P=0.006$)和中小型($t=5.612$, $P=0.001$)土壤动物类群数; RL₃后显著减少了大型($t=1.960$, $P=0.096$)和中小型土壤动物密度($t=3.121$, $P=0.015$), 同时, 大型土壤动物类群数变化没有达到显著水平($t=1.603$, $P=0.141$), 但显著减少了中小型土壤动物类群数($t=2.798$, $P=0.028$)。对比分析RL和ck在1个月和3个月时的土壤动物群落特征, 结果显示: RL₁和RL₃($t=3.162$, $P=0.010$)间大型土壤动物密度存在极显著差异, ck₁和ck₃($t=2.034$, $P=0.069$)无显著差异, 大型土壤动物类群数RL₁和RL₃($t=0.557$, $P=0.590$)间无显著差异, ck₁和ck₃($t=3.670$, $P=0.011$)间有显著差异; 同时, 中小型土壤动物密度RL₁和RL₃($t=2.570$, $P=0.028$)间, ck₁和ck₃($t=3.438$, $P=0.011$)间存在显著差异, 中小型土壤动物类群数RL₁和RL₃($t=3.057$, $P=0.012$)间, ck₁和ck₃($t=4.801$, $P=0.010$)间存在显著差异。

2.4 除凋除草对土壤动物垂直分布的影响

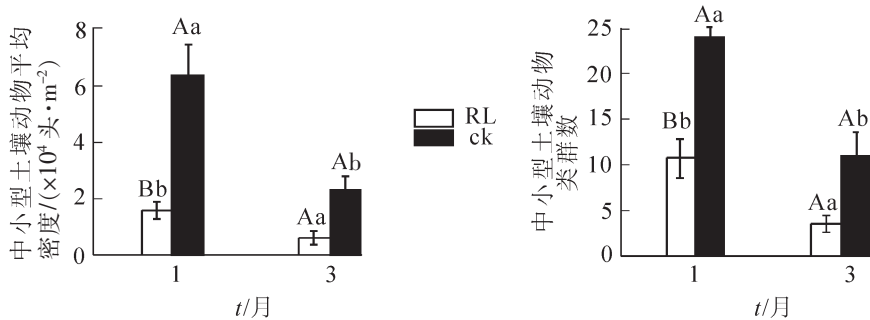
从图4可以看出: 除凋除草样地(RL)和对照(ck)样地土壤动物密度均随着土层的加深而减少的趋势, 同时, 与ck相比, RL降低了各土层土壤动物密度。*t* 检验结果表明: RL₁与ck₁土壤动物密度在0~5 cm土层($t=3.383$, $P=0.013$)和5~10 cm层存在显著差异, 在10~15 cm土层存在极显著差异; RL₃与ck₃土壤动物密度在5~10 cm层($t=2.824$, $P=0.027$)和10~15 cm($t=2.570$, $P=0.036$)土层存在显著差异, 在0~5 cm土层无显著差异。对比分析RL和ck在1个月和3个月时的土壤动物群落特征, 结果显示: RL₁和RL₃在0~5 cm土层存在显著差异($t=2.625$, $P=0.025$), ck₁和ck₃在0~5 cm土层存在显著差异($t=3.456$, $P=0.010$), 其余土层均未达到显著水平($P>0.05$)。



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著

图2 各生境大型土壤动物水平分布变化(平均值 \pm 标准误)

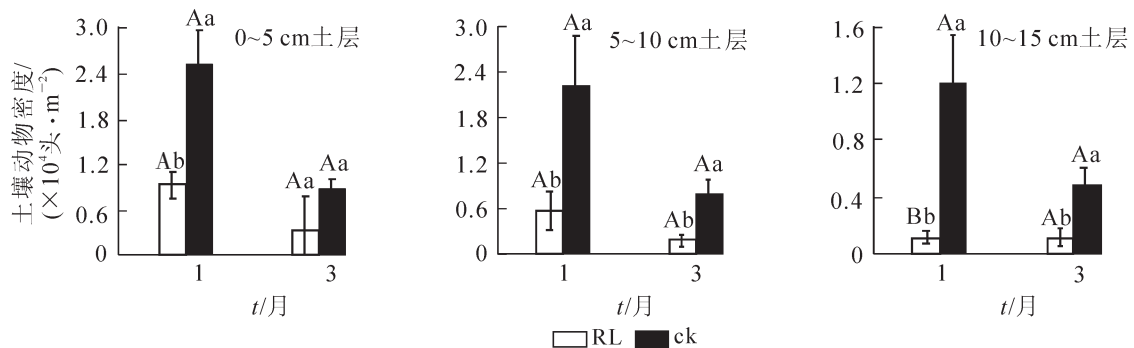
Figure 2 Change of different levels distribution of large soil fauna in each habitat ($\bar{x} \pm E_s$)



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)

图3 各生境中小型土壤动物水平分布变化(平均值 \pm 标准误)

Figure 3 Change of different levels distribution of meso-microfauna in each habitat ($\bar{x} \pm E_s$)



相同土层不同小写字母表示表示差异显著($P < 0.05$), 相同土层不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)

图4 各生境土壤动物垂直分布变化(平均值 \pm 标准误)

Figure 4 Each habitat change the vertical distribution of soil fauna ($\bar{x} \pm E_s$)

2.5 除凋除草对土壤动物群落多样性的影响

从表3可以看出:与对照(ck)相比较,除凋除草(RL)1个月和3个月,RL均降低了楠木林土壤动物的多样性、均匀度、丰富度和密度-类群等指数,增大了优势度指数。同时,除优势度指数外,RL₁土壤动物各指数较RL₃时高。 t 检验结果表明:RL₁与ck₁间土壤动物丰富度指数差异达极显著水平($t=4.276, P=0.004$),其余指数均未达显著水平($P > 0.05$);RL₃与ck₃间土壤动物丰富度指数($t=2.779, P=0.022$)和密度-类群指数差异均达显著水平,其余指数均未达显著水平($P > 0.05$)。

对比分析RL和ck在1个月和3个月时的土壤动物多样性指数,结果显示:RL₁和RL₃间各土壤动物多样性指数均未达到显著水平($P > 0.05$);ck₁和ck₃间土壤动物多样性指数($t=3.769, P=0.004$),均匀度指数($t=2.517, P=0.031$)和优势度指数($t=3.284, P=0.008$)达极显著水平,丰富度指数达显著水平($t=2.169, P=0.055$)。各样地间密度-类群指数差异不大。

表 3 各生境土壤动物群落的多样性特征(平均值±标准误)

指数	RL ₁	ck ₁	RL ₃	ck ₃
<i>H'</i>	1.10 ± 0.24 Aa	1.49 ± 0.10 Aa	0.66 ± 0.17 Aa	0.99 ± 0.21 Aa
<i>J</i>	0.46 ± 0.09 Aa	0.48 ± 0.03 Aa	0.33 ± 0.08 Aa	0.36 ± 0.04 Aa
<i>C</i>	0.49 ± 0.11 Aa	0.35 ± 0.03 Aa	0.65 ± 0.08 Aa	0.52 ± 0.05 Aa
<i>D</i>	0.97 ± 0.11 Bb	2.10 ± 0.24 Aa	0.88 ± 0.19 Ab	1.51 ± 0.13 Aa
<i>D_c</i>	1.31 ± 0.38 Aa	2.68 ± 0.52 Aa	0.77 ± 0.38 Ab	2.01 ± 0.25 Aa

说明: *H'* 为 Shannon-Wiener 多样性指数, *J* 为 Pielou 均匀度指数, *C* 为 Simpson 优势度指数, *D_c* 为密度-类群指数, *D* 为 Margalef 丰富度指数。同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 不同大写字母表示差异极显著($P < 0.01$)。

3 讨论

林下草本及凋落物层在森林生态系统养分循环中起着重要作用, 能有效防止水土流失, 是森林生态系统自肥的主要补给者, 在维持土壤肥力、促进森林生态系统正常物质循环和养分平衡方面起着重要作用, 地表层植被的去除会对土壤动物密度、类群数、生物多样性及土壤动物功能团构成产生不利影响^[16]。对楠木人工林除凋除草后土壤动物群落特征研究发现, 除凋除草减低了土壤动物的个体密度及类群数, 除凋除草 1 个月和 3 月后, 对照样地土壤动物密度分别是除凋除草样地的 3.03 倍和 3.64 倍, 这主要是由于除凋除草去除了林地地表覆盖物, 地表昼夜温差加大^[29], 林地裸露, 明显降低了表层土壤水分含量, 导致与土壤水分关系密切的线虫等湿生土壤动物急剧减少, 而线虫在楠木人工林生态系统中为优势类群, 在各样地的个体密度所占比例均超过 59%, 其中, 除凋除草 1 个月和 3 月后, 对照样地线虫密度分别是除凋除草样地的 3.57 倍和 3.67 倍, 因此, 线虫个体密度的变化是导致楠木人工林除凋除草后土壤动物个体密度变化的主要因素。另一方面, 除凋除草减少了植物根系的分泌, 土壤微生物及土壤动物群落组成也会因此发生变化^[16], 作为螨类、弹尾和线虫的主要食物来源的大部分真菌、细菌和藻类死亡, 从而导致这类土壤动物个体数量和类群数的减少^[30]。

弹尾目 Collembola 和 蟬蟎目 Acarina 在绝大多数生态系统中具有较高的个体和类群, 与除凋除草后 1 个月和 3 个月后的样地相比, 对照样地中弹尾目的个体密度分别较之高 545 头·m⁻² 和 232 头·m⁻², 蟬蟎目的个体密度分别较之高 1 736 头·m⁻² 和 822 头·m⁻², 同时, 蟬蟎目的类群数相应较其高 6 个和 7 个, 这主要与对照样地被地表凋落物及草本层覆盖为其提供庇护场所和食物来源, 因此具有更高的土壤动物个体密度和群落数, 其中, 以弹尾目和蟬蟎目为主的土壤动物主要栖息在凋落物层有关。

土壤动物生物多样性对于整个生态系统的研究有重要的意义, 是生态环境评价的重要指标, 其高低能反映群落的稳定性。本研究中, 与对照样地相比, 除凋除草降低了土壤动物的多样性、均匀度、丰富度和密度-类群等指数, 增大了优势度指数, 其中, 除凋除草 1 个月后, 有 78.27% 的土壤动物为优势类群, 而对照样地优势类群仅 69.58%, 除凋除草 3 个月, 有 85.79% 的土壤动物为优势类群, 而对照样地优势类群 82.45%, 主要以线虫纲及线蚓科为主。表明除凋除草后, 土壤动物多样性指数和均匀度降低, 意味着在生态系统中, 将有更短的食物链和更少的共生现象, 可能对负反馈有更弱的控制能力, 从而降低群落结构的稳定性。生境的复杂性与处于不同生态位的土壤动物多样性直接相关, 生境越简单, 土壤动物多样性指数和均匀度指数越低, 越容易产生优势种群, 而群落多样性指数又反映了土壤动物群落的稳定性, 说明土壤动物群落对凋落物和草本层的丧失响应明显。

土壤动物可划分为腐食性、植食性和捕食性 3 个功能类群。一般来说, 土壤环境条件较优越, 腐食性动物个体数量及其生物量所占比例也比较大^[31]。因腐食性动物对凋落物的分解, 土壤团粒结构的形成, 微生物的数量以及整个生态系统物质循环和能量流动的作用, 对土壤质地状况乃至整个土壤生态系统有指示作用^[32-33], 具有衡量土壤生态系统功能强弱与土壤肥力水平高低的生物指标潜力。本研究结果显示, 相对于对照样地, 除凋除草使腐食性同功能种团密度及类群数显著下降, 表明腐食性同功能种团对凋落物和草本层的丧失响应明显, 而腐食性动物的减少可能对土壤肥力及土壤生态系统的良性循环产生不利影响。

本研究中,楠木人工林除凋除草引发了土壤动物群落的初期响应,这种响应将随着时间的进一步推移,在一定程度上最终导致人工林生态系统物质循环功能退化,从而进一步影响到其他生态功能。因此,保护楠木人工林内凋落物和地表草本植物,有利于提高土壤动物多样性和丰富度,促进土壤养分元素的循环,通过地上和地下生物的互动,从而使整个楠木人工林生态系统达到可持续发展。本研究显示,除凋除草对楠木人工林下土壤动物个体密度、类群数及多样性指数等均产生了显著影响,表明楠木人工林草本层和凋落物层为栖息在其系统内的土壤动物提供了必要场所和食物源,是保持系统内土壤动物多样性和稳定性的重要保障。本实验仅研究了土壤动物群落对除凋除草的初步响应,今后应对除凋除草后土壤动物群落变化特征进行监测,加强对除凋除草后林下土壤理化性质、微生物等指标的研究。

4 参考文献

- [1] 杜娟, 卢昌泰. 楠木人工林的研究现状与展望[J]. 安徽农业科学, 2009, **37**(33): 16610 – 16612.
DU Juan, LU Changtai. Study actuality and expectation on *Phoebe zhennan* plantation [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2009, **37**(33): 16610 – 16612.
- [2] 李冬林, 金雅琴, 向其柏. 我国楠木属植物资源的地理分布、研究现状和开发利用前景[J]. 福建林业科技, 2004, **31**(1): 5– 9.
LI Donglin, JIN Yaqin, XIANG Qibai. The geographical distribution, research status and developmental utilization prospect of *Phoebe nees* plant resource of our country [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2004, **31**(1): 5 – 9.
- [3] 卢扬煦, 唐成平, 严丽平, 等. 楠木人工林林下植物物种多样性研究[J]. 浙江林业科技, 2012, **32**(1): 11 – 15.
LU Yangxu, TANG Chengping, YAN Liping, *et al.* Study on undergrowth vegetation species diversity of *Phoebe zhennan* plantation [J]. *J Zhejiang For Sci Technol*, 2012, **32**(1): 11 – 15.
- [4] 孟庆繁. 人工林生物多样性研究的现状及展望[J]. 世界林业研究, 1998, **11**(2): 26 – 31.
MENG Qingfan. Current status and prospect of the study on biodiversity of plantation forests [J]. *World For Res*, 1998, **11**(2): 26 – 31.
- [5] 郝建锋, 王德艺, 李艳, 等. 人为干扰对川西金凤山楠木次生林群落结构和物种多样性的影响[J]. 生态学报, 2014, **34**(23): 6930 – 6942.
HAO Jianfeng, WANG Deyi, LI Yan, *et al.* Effects of human disturbance on species diversity of *Phoebe zhennan* communities in Jinfengshan Mountain in western Sichuan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2014, **34**(23): 6930 – 6942.
- [6] 马明东, 江洪, 刘跃建. 楠木人工林生态系统生物量、碳含量、碳贮量及其分布[J]. 林业科学, 2008, **44**(3): 34 – 39.
MA Mingdong, JIANG Hong, LIU Yuejian. Biomass, carbon content, carbon storage and their vertical distribution of *Phoebe bournei* artificial stand [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, **44**(3): 34 – 39.
- [7] YIN Xiuqin, SONG Bo, DONG Weihua, *et al.* A review on the eco-geography of soil fauna in China [J]. *J Geogr Sci*, 2010, **20**(3): 333 – 346.
- [8] 张志丹, 董炜华, 魏健, 等. 土壤动物学研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, **28**(29): 242 – 246.
ZHANG Zhidan, DONG Weihua, WEI Jian, *et al.* Research progresses of soil fauna [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2012, **28**(29): 242 – 246.
- [9] 黄玉梅. 土壤动物群落多样性研究进展[J]. 西部林业科学, 2004, **33**(3): 63 – 68.
HUANG Yumei. Research progress on community diversity of soil invertebrate [J]. *J West China For Sci*, 2004, **33**(3): 63 – 68.
- [10] DECAËNS T, JIMÉNEZ J J, GIOIA C, *et al.* The values of soil animals for conservation biology [J]. *Eur J Soil Biol*, 2006, **42**(supp 1): S23 – S38.
- [11] FACELLI J M, PICKETT S T A. Plant litter: its dynamics and effects on plant community structure [J]. *Bot Rev*, 1991, **57**(1): 1 – 32.
- [12] 赵波, 肖玖金, 周开伦, 等. 野青茅枯落物分解过程中土壤动物群落特征[J]. 应用与环境生物学报, 2015, **21**(5): 940 – 947.
ZHAO Bo, XIAO Jiujin, ZHOU Kailun, *et al.* Characteristics of soil fauna community in the decomposition of

- Deyeuxia arundinacea* litters [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2015, **21**(5): 940 – 947.
- [13] 殷秀琴, 张桂荣. 森林凋落物与大型土壤动物相关关系的研究[J]. 应用生态学报, 1993, **4**(2): 167 – 173.
YIN Xiuqin, ZHANG Guirong. Correlation between forest litter and soil macroanimals [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1993, **4**(2): 167 – 173.
- [14] 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.
BU Tao, ZHANG Shuikui, SONG Xinzhang, *et al.* Effects of several environmental factors on litter decomposition [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2013, **30**(5): 740 – 747.
- [15] 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 Yinghua, SUN Jiabao, ZHANG Fudao. Characteristics of soil fauna community in forest floor at different climate zone, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29**(6): 2938 – 2944.
- [16] 黄玉梅, 杨万勤, 张健, 等. 川西亚高山针叶林土壤动物群落对模拟林下植物丧失的响应[J]. 生态学报, 2010, **30**(8): 2018 – 2025.
HUANG Yumei, YANG Wanqin, ZHANG Jian, *et al.* Response of soil faunal community to simulated understory plant loss in the subalpine coniferous plantation of western Sichuan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30**(8): 2018 – 2025.
- [17] HASEGAWA M, ITO M T, YOSHIDA T, *et al.* The effects of reduced-impact logging practices on soil animal communities in the Deramakot Forest Reserve in Borneo [J]. *Appl Soil Ecol*, 2014, **83**: 13 – 21.
- [18] 王移, 卫伟, 杨兴中, 等. 我国土壤动物与土壤环境要素相互关系研究进展[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(9): 2441 – 2448.
WANG Yi, WEI Wei, YANG Xingzhong, *et al.* Interrelationships between soil fauna and soil environmental factors in China: research advance [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(9): 2441 – 2448.
- [19] 余运威, 应叶青, 任丽萍, 等. 浙江临安竹林土壤动物群落结构特征及多样性[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29**(4): 581 – 587.
YU Yunwei, YING Yeqing, REN Liping, *et al.* Community structure and biodiversity of soil animals in bamboo stands of Lin'an, Zhejiang [J]. *J Zhejiang A & F Univ*, 2012, **29**(4): 581 – 587.
- [20] 史玉菲, 苏越, 张雪萍. 我国土壤动物功能作用的研究进展[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2011, **27**(3): 84 – 88.
SHI Yufei, SU Yue, ZHANG Xueping. Research advance in the functional role of soil fauna in China [J]. *Nat Sci J Harbin Norm Univ*, 2011, **27**(3): 84 – 88.
- [21] 刘长海, 刘世鹏, 李延清, 等. 陕北枣林土壤动物与土壤因子关系研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2012, **42**(3): 429 – 433.
LIU Changhai, LIU Shipeng, LI Yanqing, *et al.* Soil fauna and soil factors of jujube forest in northern region of Shaanxi Province [J]. *J Northwest Univ Nat Sci Ed*, 2012, **42**(3): 429 – 433.
- [22] 肖玖金, 马海燕, 张晓庆, 等. 四川盆周西缘山地典型人工林下苔藓和凋落物的持水特性[J]. 东北林业大学学报, 2014, **42**(9): 62 – 65.
XIAO Jiujin, MA Haiyan, ZHANG Xiaoqing, *et al.* Water holding capacities of bryophyte and litter layer under typical artificial stands of western Sichuan basin border [J]. *J Northeast For Univ*, 2014, **42**(9): 62 – 65.
- [23] 肖玖金, 黄晓丽, 卢昌泰, 等. 坡位对猕猴桃园土壤动物群落结构的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2013, **39**(4): 421 – 427.
XIAO Jiujin, HUANG Xiaoli, LU Changtai, *et al.* Community structure of soil fauna in kiwifruit plantation at different slope locations [J]. *J Zhejiang Univ Agric Life Sci*, 2013, **39**(4): 421 – 427.
- [24] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [25] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [26] 李鸿兴, 隋敬之, 周士秀, 等. 昆虫分类检索[M]. 北京: 农业出版社, 1987.
- [27] 钟觉民. 幼虫分类学[M]. 北京: 农业出版社, 1990.
- [28] 黄玉梅. 巨桉人工林土壤动物生态初步研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006.
HUANG Yumei. *Preliminary Study on Ecological Characteristics of Soil Fauna in Eucalyptus grandis Plantation* [D].

Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2006.

- [29] 谷加存, 王政权, 韩有志, 等. 采伐干扰对帽儿山地区天然次生林土壤表层温度空间异质性的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(12): 2248 – 2254.
GU Jiacun, WANG Zhengquan, HAN Youzhi, *et al.* Effects of cutting intensity on spatial heterogeneity of topsoil temperature in secondary forest in Maoershan region of Heilongjiang Province [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, **17**(12): 2248 – 2254.
- [30] 肖玖金, 张健, 杨万勤, 等. 巨桉(*Eucalyptus grandis*)人工林土壤动物群落对采伐干扰的初期响应[J]. 生态学报, 2008, **28**(9): 4531 – 4539.
XIAO Jiujin, ZHANG Jian, YANG Wanqin, *et al.* Short-term response of soil fauna community to harvesting disturbance in *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(9): 4531 – 4539.
- [31] 黄丽荣, 张雪萍. 大兴安岭北部森林生态系统土壤动物的功能类群及其生态分布[J]. 土壤通报, 2008, **39**(5): 1017 – 1022.
HUANG Lirong, ZHANG Xueping. Soil animal guilds and ecological distribution in forest ecosystems of the Northern Da Hinggan Mountains [J]. *Chin J Soil Sci*, 2008, **39**(5): 1017 – 1022.
- [32] 黄玉梅, 杨万勤, 张健. 川西亚高山云杉叶凋落物质量损失过程及土壤生物的作用[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(4): 676 – 683.
HUANG Yumei, YANG Wanqin, ZHANG Jian. Process of leaf litter mass loss and the contributions of soil organisms in *Picea aspoerata* plantations of Western Sichuan [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2015, **24**(4): 676 – 683.
- [33] 卢昌泰, 李云, 肖玖金, 等. 四川盆周西缘山地 3 种人工林土壤动物群落特征[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19**(4): 618 – 622.
LU Changtai, LI Yun, XIAO Jiujin, *et al.* Characteristics of soil fauna community of three plantations in the western Sichuan basin border of China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19**(4): 618 – 622.