

不同坡位柳杉人工林夏季土壤动物群落特征

肖玖金^{1,2}, 林宏贵³, 周鑫¹, 尤花¹, 李云¹, 张健²

(1. 四川农业大学 都江堰校区, 四川 都江堰 611830; 2. 四川农业大学 生态林业研究所, 四川 温江 611130; 3. 阿坝藏族羌族自治州 旅游经济研究所, 四川 汶川 623000)

摘要: 为研究柳杉 *Cryptomeria fortunei* 人工林不同坡位土壤动物群落结构特征, 采用手捡法和干湿漏斗法在四川盆周西缘山地 3 个不同坡位(海拔分别为 1 088 m, 987 m 和 830 m)的柳杉人工林设置样地(分别为样地 I, 样地 II 和样地 III)进行土壤动物群落调查。结果显示: 试验所采集到的土壤动物平均密度为 3.46×10^4 只·m⁻², 隶属于 5 门 13 纲 94 类, 其中, 土壤动物密度和类群数均以样地 III 最高, 分别为 6.53×10^4 只·m⁻² 和 66 类, 以样地 I 最低, 分别为 1.35×10^4 只·m⁻² 和 38 类, 土壤动物密度和类群数呈现出随坡位高度增加而减少的趋势; 从垂直分布来看, 各土层土壤动物密度均随着坡位的上升而减少, 各样地有大于 43% 的土壤动物个体分布在 0~5 cm 土层(凋落物层除外), 有大于 72% 的土壤动物类群分布在凋落物层; 除 Simpson 优势度指数(C)外, 土壤动物多样性指数均以样地 III 最高, 同时, 各样地间土壤动物群落 Sorenson 相似性系数较 Morisita-Horn 相似性系数波动更大, 表明坡位对柳杉人工林下土壤动物群落各类群的相对数量影响较类群数的影响大。图 3 表 5 参 20

关键词: 土壤生物学; 柳杉人工林; 坡位; 土壤动物; 群落结构

中图分类号: S714.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2016)02-0257-08

Soil fauna community structure in *Cryptomeria fortunei* artificial stands at different slope elevations in summer

XIAO Jiu Jin^{1,2}, LIN Honggui³, ZHOU Xin¹, YOU Hua¹, LI Yun¹, ZHANG Jian²

(1. Dujiangyan Campus, Sichuan Agricultural University, Dujiangyan 611830, Sichuan, China; 2. Institute of Ecological Forestry, Sichuan Agricultural University, Wenjiang 611130, Sichuan, China; 3. Institute of Aba Tourism Economy, Wenchuan 623000, Sichuan, China)

Abstract: Soil fauna, an important component of soil ecosystems, plays an important role in decomposition of biological remains, affects soil properties, and enhances material recycling and energy conversion in the soil. Understanding the impacts of slope elevation on soil fauna is essential to achieve sustainable *Cryptomeria fortunei* artificial stand management and biodiversity conservation; therefore, an investigation on soil fauna was carried out in *Cryptomeria fortunei* plantations. Three sample plots were set at three slope elevations (Plot I - 1 088 m, Plot II - 987 m, and Plot III - 830 m). Macrofauna samples ($n=3$) were picked up by hand in each sampled slope with the area of 50 cm × 50 cm (0.25 m²). After recording the types of soil fauna, the samples were put into a container with alcohol and transported to laboratory for detailed classification to family level. Mesofauna was collected by steel core ($r = 5$ cm, $v = 100$ cm³) and store in soil fauna sealing black bags. The collected samples then were transported to laboratory within 12 h and subsequently separated by Baermann method (for nematodes) and Tullgren method (for mesofauna) over a period of 48 h, respectively. All collected soil fauna were calculated and classified by microscope, and identified to the family level following *Pictorial Keys to Soil Animals of China*. Analysis was conducted using the following indexes: Sorenson, Morisita-Horn,

收稿日期: 2015-04-22; 修回日期: 2015-06-16
基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金资助项目(31400457); 四川省教育厅资助项目(13ZA0258); 四川省景观与游憩研究中心资助项目(JGYQ2015012)
作者简介: 肖玖金, 副教授, 博士, 从事土壤生态学研究。E-mail: j.xiao@sicau.edu.cn

Shannon-Wiener, Pielou, Simpson, and Density-groups. Results showed a total of 94 soil fauna orders belonging to 5 phyla and 13 classes with an average density of 3.46×10^4 individuals $\cdot m^{-2}$. The density and number of groups in Plot III at lower elevation are significant higher than that in the rest of two plots ($P < 0.05$), and there is no significant difference between the Plots I and II ($P > 0.05$). Compared to Plots I and II, the soil fauna density in litter layer and 10~15 cm soil layer of Plot III is significantly higher than that in Plots I and II ($P < 0.05$). The vertical study showed that more than 43% of the individuals was found in the 0~5 cm layer and more than 72% of the group number was found in the litter layer in each plot. Plot III had the highest soil fauna density for Phylum Nematoda, and Classes Insecta, Arachnida, and Diplura. The Sorenson and Morisita-Horn indexes showed that slope elevation had a stronger effect on soil fauna density than soil fauna group type. Also, the highest Shannon-Wiener, Pielou, and Density-groups indexes were found in Plot III at the lower elevation. Thus, slope elevation affected distribution and diversity of soil fauna in *Cryptomeria fortunei* plantations, and to reserve litter layer is the key to keep the soil fauna diversity. [Ch, 3 fig. 5 tab. 20 ref.]

Key words: soil biology; *Cryptomeria fortunei* plantations; slope; soil fauna; community structure

土壤动物作为森林生态系统中不可或缺的生物组分之一,不仅是森林土壤肥力的重要生物学指标,而且与森林土壤的形成、发育、演替以及森林生态系统的生物元素循环密切相关^[1],被认为是森林生态系统物质循环和能量流动的中心环节,是生态系统演化的重要驱动因子^[2]。坡位作为重要的地形因子,会影响土壤微环境、土壤理化性质、地上植被的生长以及地下碳输入等^[3],小尺度的坡位因子在一定程度上可重新分配土壤含水量、养分及温度^[4]。柳杉 *Cryptomeria fortunei* 作为川西地区重要的人工造林树种之一,因以其生长快,树干直,材质好而被广泛栽植,有关人工林栽植对土壤动物群落特征的研究已有报道^[5-8],但鲜见不同坡位下柳杉人工林土壤动物群落特征的研究,因此,本研究通过对不同坡位下柳杉人工林土壤动物群落特征进行研究,为柳杉人工林的可持续发展和管理提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区自然概况

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灵岩山($30^{\circ} 44' 54'' \sim 31^{\circ} 22' 09''$ N, $103^{\circ} 25' 42'' \sim 103^{\circ} 47' 00''$ E),属中亚热带温湿型气候,海拔为 852~1 075 m,为浅切割低山地貌类型。年平均气温为 15.2 $^{\circ}C$,年平均相对湿度 81%,年平均降水量 1 243.0 mm,年平均日照时数 1 024.2 h,无霜期 269.0 d。样地土壤为沙岩上发育的黄壤,质地为重壤质,pH 6.5~6.8。由于多雨,在淀积层与母质层之间有明显的潜育现象,土壤肥力中等,保肥保水性好^[7]。试验共选取 3 个不同坡位高度,其中,样地 I 海拔高度为 1 088 m,样地 II 海拔为 987 m,样地 III 海拔为 830 m,所选样地柳杉种植于 20 世纪 70 年代,是在灌丛地上进行更新形成的。各样地自然环境条件见表 1。

表 1 样地自然环境条件

Table 1 Environmental condition of three positions on slope

样地	坡度/($^{\circ}$)	坡向/($^{\circ}$)	土壤类型	地理位置	海拔/m	主要植被
I	21	SE25	山地黄壤	$31^{\circ}01'36''N, 103^{\circ}36'42''E$	1 088	钝叶桉 <i>Eurya obtusifolia</i> , 凤尾蕨 <i>Pteris multifida</i> , 老鸦糊 <i>Callicarpa giraldii</i> 等
II	15	SE65	山地黄壤	$31^{\circ}01'23''N, 103^{\circ}36'45''E$	987	短柄枹栎 <i>Quercus serrata</i> , 钝叶铃木, 凤尾蕨等
III	18	SE45	山地黄壤	$31^{\circ}00'53''N, 103^{\circ}36'45''E$	830	扁竹根 <i>Iris japonica</i> , 凤尾蕨, 薄叶鼠李 <i>Rhamnus leptophylla</i> , 蕊帽忍冬 <i>Lonicera pileata</i> 等

1.2 研究方法

于 2013 年 8 月中旬,在不同坡位选择具有代表性的柳杉人工林共设置 3 个样地。在各样地内,兼顾地形、坡位及坡度等因子,按“品”字形设置 3 个重复。野外大型手捡的面积为 50 cm \times 50 cm (0.25 m^2),分凋落物层、0~5 cm 层、5~10 cm 层、10~15 cm 层,将大型土壤动物放入盛有质量分数为 75% 的乙醇容器中杀死,带回实验室在解剖镜(PXS-1040)下分类和计数;同时,在各样点挖土壤剖面,分 0~5

cm 层、5~10 cm 层、10~15 cm 层用环刀($r=5\text{ cm}$, $v=100\text{ cm}^3$)由下往上顺次取土样,用尼龙网包裹好后及时带回实验室分别用 Tullgren 干漏斗和 Baermann 湿漏斗分离土样中的土壤动物。同时,在各样点收集 $10\text{ cm} \times 10\text{ cm}$ (0.01 m^2)面积的凋落物带回实验室进行分离,重复 3 次。

实验主要采用《中国土壤动物检索图鉴》^[9]、《中国亚热带土壤动物》^[10]、《昆虫分类检索》^[11]和《幼虫分类学》^[12]等进行分类鉴定,鉴定计数至目、科等较高的分类阶元。

1.3 数据分析与处理

1.3.1 数据分析 群落多样性分析采用 Shannon-Wiener 多样性指数(H'), Simpson 优势度指数(C), Pielou 均匀性指数(J)和密度-类群指数(I_{DC})来描述土壤动物群落的特征;分别选用 Sorensen 和 Morisita-Horn 相似性系数对样地间群落结构特征的相似程度进行定性和定量描述^[13-14]。

1.3.2 土壤动物类群数量等级划分 在各类群数量等级划分中,个体数占总数 10.0%以上者为优势类群,占总数 1.0%~10.0%者为常见类群,占总数 1.0%以下者为稀有类群。

1.3.3 数据的处理和分析 数据的处理和分析采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 进行。

2 结果与分析

2.1 土壤动物的类群及数量组成

本研究中所采集到的土壤动物平均密度为 $3.46 \times 10^4\text{ 只} \cdot \text{m}^{-2}$,隶属于 5 门 13 纲 94 类(表 2),各坡位土壤动物密度和类群数均随着坡位增高而递减(图 1)。大类群中,线虫纲 Nematoda 和昆虫纲 Insecta 为优势类群,其个体数分别占本次采集到土壤动物总数的 72.49%和 14.72%;蛛形纲 Arachnida 占 9.31%,弹尾纲 Collembola 占 1.19%,双尾纲 Diplura 占 1.14%,其余 8 个纲仅占 1.15%。其中,样地 I

表 2 不同坡位柳杉林土壤动物类群组成
Table 2 Composition of soil fauna community at the different altitudes in *Cryptomeria fortunei* artificial plantations

序号	类群	样地 I		样地 II		样地 III	
		密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	密度/(只·m ⁻²)	百分比/%
1	矮蒲螋科 Pygmephoridae	—	—	—	—	66.67	0.10
2	艾纳螺科 Enidae	—	—	1.33	0.01	—	—
3	奥甲螋科 Oppiidae	—	—	—	—	133.33	0.20
4	巴蜗牛科 Bradybaenidae	9.33	0.07	38.90	0.16	—	—
5	白蚁科 Termitidae	33.33	0.25	33.33	0.13	—	—
6	步甲科 Carabidae	267.97	1.98	33.33	0.13	36.00	0.06
7	蝉科 Cicadidae	4.00	0.03	5.33	0.02	68.00	0.10
8	赤螋科 Erythraeidae	—	—	—	—	4 666.67	7.14
9	刺蛾科 Eucleidae	—	—	—	—	33.33	0.05
10	大赤螋科 Angstidae	—	—	—	—	66.67	0.10
11	大翼甲螋科 Galumnidae	—	—	—	—	33.33	0.05
12	大蚓 Megadrile Oligochaetes	22.67	0.17	90.70	0.36	16.00	0.02
13	等翅目 Isoptera	—	—	—	—	2 000.00	3.06
14	地蜈蚣科 Geophilidae	—	—	—	—	1.33	0
15	地蛛科 Atypidae	1.33	0.01	—	—	—	—
16	粉蝶科 Pieridae	1.30	0.01	—	—	166.67	0.26
17	副铈蚱科 Parajapygidae	4.00	0.03	1.33	0.01	368.00	0.56
18	管蓟马科 Phlaeothripinae	—	—	—	—	133.33	0.20
19	管网蛛科 Filistatidae	8.00	0.06	—	—	—	—
20	光盔蛛科 Liocranidae	—	—	—	—	1.33	0
21	胡蜂科 Vespidae	—	—	—	—	66.67	0.10
22	花皮蛛科 Scytodidae	—	—	—	—	33.33	0.05
23	笄涡虫科 Bipaliidae	—	—	1.33	0.01	—	—
24	坚齿螺科 Camaenidae	—	—	2.67	0.01	—	—

表2 (续)

Table 2 Continued

序号	类群	样地 I		样地 II		样地 III	
		密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	密度/(只·m ⁻²)	百分比/%
25	金龟甲科 Scarabaeidae	1.30	0.01	1.33	0.01	—	—
26	巨蟹蛛科 Heteropodidae	—	—	4.00	0.02	106.67	0.16
27	康蚘科 Campodeidae	134.60	0.99	6.67	0.03	466.67	0.71
28	懒甲螨群 nothroid mites	—	—	—	—	1 366.67	2.09
29	狼蛛科 Lycosidae	—	—	5.33	0.02	—	—
30	类石蛛科 Segestriidae	—	—	—	—	1.33	0
31	蜚蛄科 Grylotalpidae	—	—	—	—	2.67	0
32	露尾甲科 Nitidulidae	1.33	0.01	—	—	—	—
33	卵形蛛科 Oonopidae	6.67	0.05	2.67	0.01	68.00	0.10
34	裸蛛甲螨群 Gymnodamaeoid mites	—	—	—	—	233.33	0.36
35	马蜂科 Polistidae	—	—	2.67	0.01	—	—
36	皿蛛科 Linyphiidae	34.60	0.26	—	—	—	—
37	膜蝽科 Hebridae	—	—	—	—	66.67	0.10
38	沫蝉科 Cercopidae	34.60	0.26	—	—	1.33	0
39	木蠹科 Kalotermitidae	—	—	—	—	66.67	0.10
40	拟步甲科 Tenebrionidae	—	—	—	—	66.67	0.10
41	拟平腹蛛科 Zodariidae	38.60	0.28	2.67	0.01	1.33	0
42	拟态蛛科 Mimetidae	—	—	1.33	0.01	—	—
43	瓢甲科 Cocconellidae	33.33	0.25	100.00	0.40	1.33	0
44	平腹蛛科 Gnaphosidae	—	—	1.33	0.01	1.33	0
45	奇蝽科 Enicocephalidae	—	—	1.33	0.01	—	—
46	球体蛛科 Theridiosomatidae	8.00	0.06	2.67	0.01	33.33	0.05
47	球蛛科 Theridiidae	33.30	0.25	—	—	—	—
48	弱蛛科 Leptonetidae	2.67	0.02	2.67	0.01	1.33	0
49	山蝽科 Spirobolidae	—	—	1.33	0.01	—	—
50	石蜈蚣目 Lithomorpha	1.33	0.01	73.30	0.29	166.67	0.26
51	鼠妇科 Porcellionidae	—	—	—	—	72.00	0.11
52	双翅目 Diptera	—	—	—	—	666.67	1.02
53	缩头甲科 Chelonariidae	—	—	—	—	33.33	0.05
54	苔甲科 Scydmaenidae	—	—	—	—	4.00	0.01
55	跳虫科 Poduridae	12.00	0.09	102.70	0.41	24.00	0.04
56	瓦娄蜗牛科 Valloniidae	33.33	0.25	4.00	0.02	—	—
57	网蝽科 Tingidae	—	—	—	—	33.33	0.05
58	网蚊科 Blepharoceridae	33.33	0.25	—	—	1.33	0
59	微离螨科 Microdispidae	—	—	—	—	666.67	1.02
60	伪叶甲科 Lagriidae	—	—	—	—	66.67	0.10
61	蚊科 Culicidae	6.67	0.05	101.30	0.40	—	—
62	蜈蚣目 Scolopendromorpha	—	—	1.33	0.01	—	—
63	舞虻科 Empididae	—	—	—	—	400.00	0.61
64	线虫 Nemata	10 666.70	78.70	23 333.30	93.20	41 333.33	63.27
65	逍遥蛛科 Philodromidae	—	—	82.70	0.33	—	—
66	小赫甲螨科 Hermanniellidae	—	—	—	—	200.00	0.31
67	线蚓科 Enchytraeidae	156.00	1.15	144.00	0.58	168.00	0.26
68	蟹蛛科 Thomisidae	—	—	5.33	0.02	2.67	0
69	烟管螺科 Clausiliidae	1.30	0.01	13.33	0.05	—	—
70	叶蝉科 Cicadellidae	—	—	—	—	1.33	0

表 2 （续）
Table 2 Continued

序号	类群	样地 I		样地 II		样地 III	
		密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	密度/(只·m ⁻²)	百分比/%	密度/(只·m ⁻²)	百分比/%
71	叶蜂科 Tenthordinidae	—	—	1.33	0.01	—	—
72	叶甲科 Chrysomelidae	—	—	—	—	4.00	0.01
73	叶爪螨科 Penthaleidae	—	—	—	—	666.67	1.02
74	夜蛾科 Noctuidae	68.00	0.50	4.00	0.02	34.67	0.05
75	蚁甲科 Pselaphidae	—	—	—	—	33.33	0.05
76	蚁科 Formicidae	873.30	6.44	230.60	0.92	8 753.33	13.40
77	逸蛛科 Zoropsidae	—	—	—	—	5.33	0.01
78	隐翅甲科 Staphylinidae	66.70	0.49	400.00	1.60	—	—
79	隐颚螨科 Cryptognathidae	—	—	—	—	1 033.33	1.58
80	幽灵蛛科 Pholcodae	1.33	0.01	8.00	0.03	—	—
81	疣跳科 Neanuridae	113.30	0.84	6.67	0.03	102.67	0.16
82	原铗𧈧科 Projapygidae	—	—	1.33	0.01	200.00	0.31
83	圆颚蛛科 Corinnidae	2.67	0.02	—	—	—	—
84	圆跳科 Sminthuridae	800.00	5.90	66.67	0.27	—	—
85	缘蝽科 Coroidae	—	—	—	—	70.67	0.11
86	葬甲科 Silphidae	2.67	0.02	2.70	0.01	66.67	0.10
87	长角跳科 Entomobryidae	—	—	—	—	5.33	0.01
88	长角象甲科 Anthribidae	33.33	0.25	—	—	33.33	0.05
89	长头地蜈蚣科 Mecistocephalidae	—	—	1.33	0.01	—	—
90	真足螨科 Eupodidae	—	—	—	—	33.33	0.05
91	重舌科 Amphientomidae	—	—	—	—	1.33	0
92	蠋蚣科 Pauropodidae	—	—	100.00	0.40	—	—
93	综合纲 Symphla	1.33	0.01	5.33	0.02	66.67	0.10
94	钻头螺科 Subulinidae	—	—	1.33	0.01	1.33	0
合计		13 554.24		25 034.87		65 328.00	

说明：“—”表示无或未采集到。

柳杉人工林所采集到的土壤动物平均密度为 1.35×10^4 只·m⁻²，共 38 类，优势类群仅线虫纲 1 类，所占比例为 78.70%，常见类群有步甲科、小蚓类、蚁科和圆跳科 4 类，个体数所占比例分别为 1.98%，1.15%，6.44%和 5.90%，合计 15.47%，其余 33 类为稀有类群，所占比例合计为 5.83%。样地Ⅱ柳杉人工林所采集的土壤动物平均密度为 2.50×10^4 只·m⁻²，共 46 类，优势类群为线虫纲，其所占比例为 93.20%，常见类群 1 类，占比为 1.60%，其余 44 类为稀有类群，所占比例合计为 5.20%。样地Ⅲ柳杉人工林采集的土壤动物平均密度为 6.53×10^4 只·m⁻²，共 66 类，优势类群有 2 类，分别为线虫纲和蚁科，所占比例分别为 63.27%和 13.40%，合计为 76.67%，常见类群有赤螨科、等翅目、懒甲螨科、隐颚螨科、双翅目、叶爪螨科和微离螨科，共 7 类，所占比例分别为 7.14%，3.06%，2.09%，1.58%，1.02%，1.02%和 1.02%，合计为 16.94%，其余 57 类为稀有类群，所占比例总计为 6.39%。

2.2 土壤动物不同土层垂直分布特征

不同坡位柳杉林土壤动物密度剖面分布特征显示(图 2)：除凋落物层外，各土层土壤动物密度均随着坡位上升而减少。各坡位柳杉人工林样地均以 0~5 cm 土层土壤动物密度最高(受条件限制，凋落物层

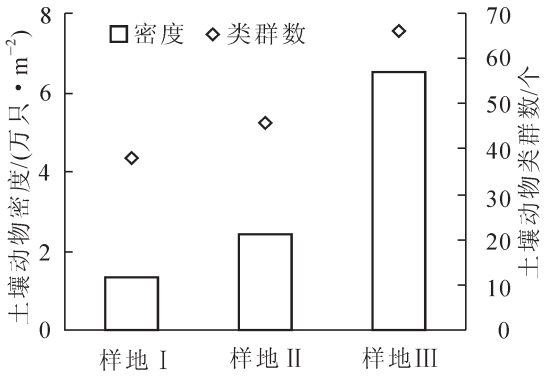


图 1 不同坡位柳杉林土壤动物数量和类群数
Figure 1 Number of soil fauna community and group at the different slopes in *Cryptomeria fortunei* plantations

未进行湿漏斗分离), 其中, 样地 I, 样地 II 和样地 III 分别有 65.05%, 63.21% 和 43.66% 的土壤动物分布在 0~5 cm; 样地 I 和样地 II 均以 10~15 cm 土层密度最低, 样地 III 以 5~10 cm 土层最低。差异性检验结果表明: 凋落物层和 10~15 cm 土层土壤动物密度均以样地 III 显著高于样地 I 和样地 II ($P<0.05$)。不同坡位高度土壤动物类群数剖面分布特征表明(图 3): 各坡位土壤动物类群数均随着土层加深而下降, 其中, 凋落物层和 5~10 cm 土层土壤动物类群数均以样地 III 最高, 0~5 cm 土层和 10~15 cm 土层土壤动物类群数均以样地 II 最高; 其中, 样地 I 有 81.58% 的土壤动物类群在枯落物层有分布, 样地 II 和样地 III 分别为 78.26% 和 72.73%。

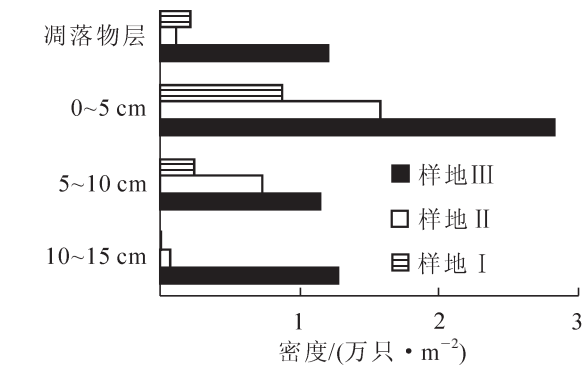


图 2 不同坡位柳杉林土壤动物密度垂直分布
Figure 2 Average density of soil fauna in each layer

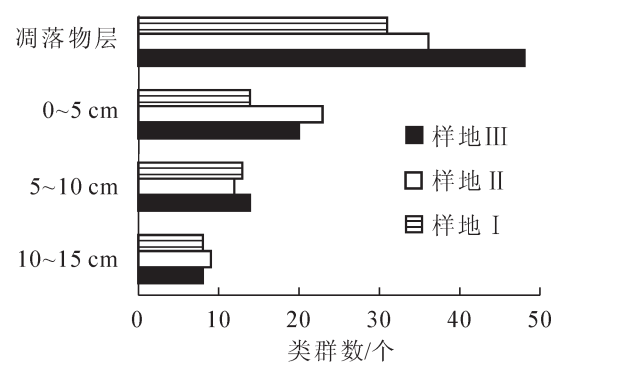


图 3 不同坡位柳杉林土壤动物类群数垂直分布
Figure 3 Group number of soil fauna in each layer

2.3 土壤动物主要类群密度特征

将所采集到的土壤动物分为线虫纲、昆虫纲、蛛形纲、弹尾纲、双尾纲和其余纲共 6 大类(表 3), 可以看出, 除弹尾纲外, 其余 5 个纲均以样地 III 高于样地 I 和样地 II。显著性分析表明, 线虫纲以样地 III 显著高于样地 I ($P<0.05$), 昆虫纲和双尾纲以样地 III 显著高于样地 I 和样地 II ($P<0.05$)。

2.4 土壤动物群落相似性

各样地间土壤动物群落相似性分析结果显示(表 4): 各样地间土壤动物群落 Sorenson 相似性系数较 Morisita-Horn 相似性系数波动更大, 表明不同坡位对柳杉林下土壤动物群落各类群的相对数量影响较大。样地 III 与样地 I 和样地 II 的 Sorenson 相似性系数均低于 0.50, 表明该柳杉人工林土壤动物群落物种组成存在较大的坡位差异。其中, 样地 I 与样地 II 的 Sorenson 相似性系数为 0.67, 计算值为 0.50~0.75, 表明样地 I 和样地 II 之间为中等相似。样地 III 与样地 I 和样地 II 的 Sorenson 相似性系数均为 0.43, 为 0.25~0.50, 表明两者的相似性为中等不相似。各样地间的 Morisita-Horn 相似性系数均大于 0.90, 表明坡位高度差异对柳杉人工林土壤动物群落各类群的相对数量影响较小。

2.5 土壤动物群落多样性特征

土壤动物群落多样性指数显示(表 5): Shannon-Wiener 多样性指数(H'), Pielou 均匀性指数(J)和密度-类群指数(I_{DC})均以样地 III 最高。显著性检验表明: 样地 III 的 I_{DC} 指数均显著高于样地 I 和样地 II ($P<0.05$), Simpson 优势度指数(C)排序为样地 II > 样地 I > 样地 III。样地 II 具有较大的群落优势度。

表 3 主要类群密度特征

纲	平均密度/(只·m ⁻²)		
	样地 I	样地 II	样地 III
线虫纲	10 666.70 a	23 333.30 ab	41 333.33 b
昆虫纲	1 461.17 a	917.27 a	12 913.33 b
蛛形纲	137.17 a	118.70 a	9 422.66 b
弹尾纲	925.30 a	176.03 b	132.00 b
双尾纲	138.60 a	9.33 a	1 034.67 b
其他纲	225.30 a	480.23 a	492.00 a
合计	13 328.94	24 554.63	64 836.00

说明: 同行数据后的不同小写字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著。

表 4 不同坡位柳杉林土壤动物群落相似性

样地	样地 I	样地 II	样地 III
样地 I		0.98	0.96
样地 II	0.67		0.91
样地 III	0.43	0.43	

说明: 对角线之上为 Morisita-Horn 相似性系数, 对角线之下为 Sorenson 相似性系数。

3 讨论

坡位能对土壤含水量、养分及温度等生态因子进行再分配，3 类土壤生态因子通常随着坡位的下降而逐渐增加^[15-16]。对柳杉人工林不同坡位土壤动物群落特征研究结果显示：土壤动物密度和类群数均随着坡位高度上升而减少，相关研究也有类似的研究结果^[4]，其中，样地Ⅲ土壤动物密度

显著高于样地Ⅰ和样地Ⅱ，这主要是由于线虫密度在 3 个坡位土壤动物密度中均占有较大比例(样地Ⅰ到样地Ⅲ分别为 78.7%，93.2%和 63.3%)，其密度的变化是导致各坡位土壤动物密度的差异的主要原因。本研究结果显示，样地Ⅱ和样地Ⅲ的线虫密度分别是样地Ⅰ的 2.2 倍和 3.9 倍，表明较高的土壤含水量、养分含量及温度能为线虫的繁殖提供良好条件。受实验条件限制，各坡位凋落物层次土壤动物仅进行了干生漏斗分离，因而未将占线虫等湿生土壤动物统计到凋落物层，造成该层土壤动物群落特征出现较高类群数和较低密度的现象。相似性分析表明，无论是 Morisita-Horn 相似性系数，还是 Sorenson 相似性系数，均以样地Ⅰ和样地Ⅱ间的最高，表明样地Ⅰ和样地Ⅱ间土壤动物群落特征具有较高的相似性。土壤动物多样性指数中，Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀性指数(J)均以样地Ⅲ最高，样地Ⅱ最低，说明样地Ⅲ物种生态系统的结构更加稳定，有利于其内的土壤动物生存，也有利于该生态系统的良好维持^[17]；而 Simpson 优势度指数(C)以样地Ⅱ最高，样地Ⅲ最低，这主要与样地Ⅱ的土壤动物个体数的 93.2%为线虫，土壤动物个体数主要集中在个别类群上，而样地Ⅰ和样地Ⅲ则较为分散，个体数比例最高的仍为线虫，其比例分别为 78.7%和 63.27%，说明群落中个体数越集中在少数类群上，群落的优势度指数就越大；反之，越分散，群落的优势度指数就越小^[18]。

本研究中，样地Ⅰ的弹尾纲密度显著高于样地Ⅱ和样地Ⅲ，这与土壤跳虫适应在低温湿润环境和有机质含量丰富的环境下生存有关^[19]，而以蜱螨目为主的蛛形纲则表现出相反的分布趋势，即高坡位密度小于低坡位，同时，其类群数也呈现随坡位升高而减少的趋势。各样地间的 Jaccard 相似性指数研究表明，蛛形纲中样地Ⅰ和样地Ⅱ最高，共有度为 0.313，样地Ⅰ和样地Ⅲ最低，共有度为 0.138，表明各样地间蛛形纲共有度以相邻的群落间最高，这与相关研究结果一致^[20]。昆虫纲各样地间的共有度以样地Ⅰ和样地Ⅱ最高，共有度为 0.556，以样地Ⅱ和样地Ⅲ最低，共有度为 0.167。

总体来看，本研究区不同坡位柳杉人工林土壤动物群落结构特征对坡位的变化有较强响应，但不同类群土壤动物对坡位变化的响应有一定差异，这与不同土壤动物生活习性的差异有关。

4 参考文献

[1] YANG Wanqin, WANG Kaiyun, SONG Guangyi, *et al.* Preliminary study on biological characteristics of degraded soil ecosystem in dry hot valley of the Jinsha River [J]. *Pedosphere*, 2002, **12**(4): 365 – 372.

[2] 吴鹏飞, 杨大星. 若尔盖高寒草甸退化对中小型土壤动物群落的影响[J]. 生态学报, 2011, **31**(13): 3745 – 3757. WU Pengfei, YANG Daxing. Effect of habitat degradation on soil meso-and microfaunal communities in the Zoigê Alpine Meadow, Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(13): 3745 – 3757.

[3] 张地, 张育新, 曲来叶, 等. 坡位对东灵山辽东栎林土壤微生物量的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(20): 6412 – 6421. ZHANG Di, ZHANG Yuxin, QU Laiye, *et al.* Effects of slope position on soil microbial biomass of *Quercus liaotungensis* forest in Dongling Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32**(20): 6412 – 6421.

[4] 赵瑜, 钟宇, 张健, 等. 不同坡位下巨桉人工林土壤动物群落特征[J]. 应用生态学报, 2010, **21**(9): 2367 – 2374. ZHAO Yu, ZHONG Yu, ZHANG Jian, *et al.* Community structure of soil fauna in *Eucalyptus grandis* plantations at different slope locations [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2010, **21**(9): 2367 – 2374.

[5] 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.

- [6] 黄玉梅, 张健, 杨万勤. 巨桉人工林土壤动物群落结构群落特征[J]. 生态学报, 2006, 26(8): 2502 – 2509.

HUANG Yumei, ZHANG Jian, YANG Waiqin, *et al.* The characteristics of soil animal community structure in *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, 26(8): 2502 – 2509.

- [7] 黄玉梅, 张健, 杨万勤. 巨桉人工林中小型土壤动物类群分布规律[J]. 应用生态学报, 2006, 17(12): 2327 – 2331.

HUANG Yumei, ZHANG Jian, YANG Waiqin. Distribution pattern of meso-micro soil fauna in *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2006, 17(12): 2327 – 2331.

- [8] 廖崇惠, 陈茂乾. 热带人工林土壤动物群落的次生演替和发展过程探讨[J]. 应用生态学报, 1990, 1(1): 53 – 59.

LIAO Chonghui, CHEN Maoqian. Secondary succession of soil animal community and its development process in tropical artificial forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1990, 1(1): 53 – 59.

- [9] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

- [10] 尹文英. 中国亚热带土壤动物[M]. 北京: 科学出版社, 1992.

- [11] 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.

- [12] 钟觉民. 幼虫分类学[M]. 北京: 农业出版社, 1990.

- [13] 何先进, 吴鹏飞, 崔丽巍, 等. 坡度对农田土壤动物群落结构及多样性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3701 – 3713.

HE Xianjin, WU Pengfei, CUI Liwei, *et al.* Effects of slope gradient on the community structures and diversities of soil fauna [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(12): 3701 – 3713.

- [14] 张洪芝, 吴鹏飞, 杨大星, 等. 青藏东缘若尔盖高寒草甸中小型土壤动物群落特征及季节变化[J]. 生态学报, 2011, 31(15): 4385 – 4397.

ZHANG Hongzhi, WU Pengfei, YANG Daxing, *et al.* Dynamics of soil meso-and microfauna communities in Zoigê alpine meadows on the eastern edge of Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, 31(15): 4385 – 4397.

- [15] 高雪松, 邓良基, 张世熔. 不同利用方式与坡位土壤物理性质及养分特征分析[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 53 – 56.

GAO Xuesong, DENG Liangji, ZHANG Shirong. Soil physical properties and nutrient properties under different utilization styles and slope position [J]. *J Soil Water Conserv*, 2005, 19(2): 53 – 56.

- [16] 祁建, 马克明, 张育新. 北京东灵山不同坡位辽东栎 *Quercus liaotungensis* 叶属性的比较[J]. 生态学报, 2008, 28(1): 122 – 128.

QI Jian, MA Keming, ZHANG Yuxin. Comparison on leaf traits of *Quercus liaotungensis* Koidz. on different slope positions in Dongling Mountain of Beijing [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, 28(1): 122 – 128.

- [17] 吾玛尔·阿布力孜, 阿布都如苏力·吐孙, 吴松林. 乌鲁木齐雅玛里克山土壤动物群落结构及其多样性研究[J]. 生命科学研究, 2013, 17(1): 47 – 56.

ABLIZ Omar, TURSUN Abdurusul, WU Songlin. Investigation on the community structure and diversity of soil fauna at the different altitudes of Yamalik Mountain in Urumqi [J]. *Life Sci Res*, 2013, 17(1): 47 – 56.

- [18] 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 kiwi fruit plantation at different slope locations [J]. *J Zhejiang Univ Agric & Life Sci*, 2013, 39(4): 421 – 427.

- [19] 王宗英, 朱永恒, 路有成, 等. 九华山土壤跳虫的生态分布[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1142 – 1147.

WANG Zongying, ZHU Yongheng, LU Youcheng, *et al.* The ecological distribution of soil collembola in Jiuhua Mountain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2001, 21(7): 1142 – 1147.

- [20] 张恒明, 谷会岩, 王庆礼, 等. 辽宁老秃顶子北坡森林土壤蜱螨共有度的海拔梯度变化 [J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(5): 51 – 53.

ZHANG Hengming, GU Huiyan, WANG Qingli, *et al.* Co-occurrence of soil acarina faunal communities changing with altitude on the northern slope of Laotudingzi Nature Reserve, Liaoning Province [J]. *J Northeast For Univ*, 2009, 37(5): 51 – 53.