

DOI:10.11913/PSJ.2095-0837.2022.20145

巩鑫怡, 纪康, 叶露萍, 郑勇, 王党军, 左娟. 中国中西部3处高山林灌交错区不同植被类型下大中型土壤动物群落特征[J]. 植物科学学报, 2022, 40(2): 145-154

Gong XY, Ji K, Ye LP, Zheng Y, Wang DJ, Zuo J. Community characteristics of macro-and meso-soil fauna in alpine forest-shrub ecotones in central and western China [J]. *Plant Science Journal*, 2022, 40(2): 145-154

中国中西部3处高山林灌交错区不同植被类型下 大中型土壤动物群落特征

巩鑫怡^{1,2,3,4}, 纪康^{3,4}, 叶露萍^{3,5}, 郑勇³, 王党军^{3,4}, 左娟^{3*}

(1. 西藏大学青藏高原生态与环境研究中心, 拉萨 850000; 2. 西藏大学理学院, 拉萨 850000; 3. 中国科学院武汉植物园, 水生植物与流域生态重点实验室, 武汉 430074; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室, 深圳 518040)

摘要: 高山林灌交错区是植被垂直带谱中的一个重要过渡区域, 为探究高山林线附近林灌交错区不同植被类型下大、中型土壤动物群落特征, 对贡嘎山、太白山和神农架等3处高海拔林灌交错区内的土壤动物群落进行了调查。共捕获大、中型土壤动物 1099 只, 隶属于 3 门 9 纲 26 目。结果显示: 不同植被类型针叶林与灌木林下, 土壤动物的总体密度差异不显著; 针叶林与灌木林中土壤动物在目水平上存在一些相似群落组成, 贡嘎山采样区的群落组成与太白山和神农架有较大差异。弹尾纲、昆虫纲、唇足纲和寡毛纲类群密度在 3 处林灌交错区差异显著; 3 处林灌交错区内, 只有神农架灌木林倍足纲的平均密度显著高于针叶林的密度, 另两处的各主要类群在植被类型间均没有差异。表明高山林灌交错区土壤动物的总体密度没有差异, 但群落组成有一定的差异。

关键词: 高山植被; 林灌交错区; 大中型土壤动物; 群落特征

中图分类号: Q958.15

文献标识码: A

文章编号: 2095-0837(2022)02-0145-10

Community characteristics of macro-and meso-soil fauna in alpine forest-shrub ecotones in central and western China

Gong Xin-Yi^{1,2,3,4}, Ji Kang^{3,4}, Ye Lu-Ping^{3,5}, Zheng Yong³, Wang Dang-Jun^{3,4}, Zuo Juan^{3*}

(1. *Research Center for Ecology and Environment of Qinghai-Tibetan Plateau, Tibet University, Lhasa 850000, China;*
2. *College of Science, Tibet University, Lhasa 850000, China;* 3. *Key Laboratory of Aquatic Botany and Watershed Ecology, Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430074, China;*
4. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;* 5. *Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources, Shenzhen 518040, China*)

Abstract: The alpine forest-shrub ecotone is an important transition region in the vegetation altitudinal spectrum. To investigate the characteristics of soil fauna communities under different vegetation types in alpine forest-shrub ecotones, the soil fauna communities in the Gongga, Taibai, and Shennongjia mountains were investigated. A total of 1099 soil fauna belonging to three phyla, nine classes, and 26 orders were captured. Results showed that under different vegetation types, total density of soil fauna did not differ significantly between the coniferous and shrub forests. Soil fauna in the coniferous and shrub forests showed certain similarities in

收稿日期: 2021-11-05, 修回日期: 2021-12-13。

基金项目: 中国科学院武汉植物园科研启动项目(Y9559701); 自然资源部城市国土资源监测与仿真重点实验室开放基金资助课题(KF-2020-05-012)。

This work was supported by grants from the Research Initiation Project of Wuhan Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences (Y9559701) and Open Fund of Key Laboratory of Urban Land Resources Monitoring and Simulation, Ministry of Natural Resources (KF-2020-05-012)。

作者简介: 巩鑫怡(1996-), 女, 硕士研究生, 研究方向为功能生态学(E-mail: 1615300043@qq.com)。

* 通讯作者(Author for correspondence. E-mail: zuojuan@wbcas.cn)。

community composition at the order level, but community composition at Gongga differed from that at Taibai and Shennongjia. The densities of Collembola, Insecta, Chilopoda, and Oligochaeta differed significantly among the three forest-shrub ecotones. Average density of Diplopoda in the Shennongjia shrub forest was significantly higher than that in the coniferous forest, but there were no differences between vegetation types in the other two sites for the other main groups. Thus, results showed that there were no differences in soil faunal density among the three ecotones, but there were certain differences in community composition.

Key words: Alpine vegetation; Forest-shrub ecotone; Macro-and meso-soil fauna; Community characteristics

高山林线附近高海拔林灌交错区是植被垂直带谱中的一个重要过渡区域。高海拔、低温等极端的气候条件, 使得其生物类群、群落结构与功能的变化异常明显^[1-3]。对气候变化的敏感性, 使得生物类群可以作为气候变化的良好指标^[4,5], 因此研究林线附近林灌交错区生物多样性变化可为全球气候变化研究提供重要信息。

土壤动物作为生物多样性的的重要组成部分, 可以反映环境的变化, 对植物群落维持、演替和物质能量循环都具有重要作用^[6-8]。同时, 土壤动物对植被类型的变化非常敏感。不同植被类型下, 凋落物种类和质量的差异会直接影响土壤动物群落的组成^[9-11], 且植物群落组成的复杂性和枯枝落叶的混合程度也可以增加土壤动物的多样性^[12-14]。因此, 不同植被类型下的土壤动物群落特征也可能存在差异^[15-17]。目前, 关于高山林线附近林灌交错区的研究更多地是关注地上植物群落的动态变化, 而对土壤动物群落的研究还很薄弱^[18-21]。尽管有研究表明高山林灌交错区的植被类型会影响土壤动物的群落结构和多样性程度^[22], 但不同区域高山林灌交错区的不同植被类型对土壤动物群落的影响是否存在一般性规律尚不清楚。

为此, 本研究在中国中部和西部较大的地理尺度范围内选择了 3 个自然保护区, 对林线附近高海拔林灌交错区进行了土壤动物群落特征的研究。林线附近林灌交错区上部为灌木林, 下部为乔木与灌木混合的针叶林。我们提出两个科学问题, 首先, 3 处高山林灌交错区不同植被类型下大中型土壤动物群落组成情况如何? 其次, 高山林灌交错区不同植被类型灌木林与针叶林下大中型土壤动物群落特征是否具有差异? 此外, 目前全球变暖导致了林线向更高的海拔水平上移^[23], 但这种变化对于土壤

动物的影响尚不清楚。基于此, 本研究重点关注了林线及林线以上位置两种不同植被类型下土壤动物群落的差异, 以期为高山生物多样性保护以及摸清林线上移带来的后果提供一定的理论依据和基础数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

采样地点分别设于四川省甘孜藏族自治州贡嘎山、陕西省秦岭太白山、湖北省神农架自然保护区。贡嘎山位于青藏高原东部边缘地带, 地理坐标为 29°20' ~ 30°00' N, 101°30' ~ 102°10' E, 地处中国东部湿润季风区与青藏高原寒冷气候的过渡带, 气候温暖湿润, 年均气温 4°C, 年均降水量约 1900 mm^[24, 25]。在原始森林海拔 3600 m 以上为暗针叶林与高山灌丛分布区, 主要构成树种为峨眉冷杉 (*Abies fabri* (Mast.) Craib) 和毡毛栎叶杜鹃 (*Rhododendron phaeochrysum* Balf. f. et W. W. et Smith var. *levistratum*), 形成了森林分布边缘的林灌交错区。太白山位于陕西省宝鸡市秦岭山脉南麓, 地理坐标 33°49' ~ 34°08' N, 107°41' ~ 107°51' E, 地处中国亚热带和暖温带交汇处, 年均气温 13°C, 年降水量约 694 mm^[26]。研究表明太白红杉 (*Larix chinensis* Beissn) 是太白山地区的唯一林线树种^[18], 林线上缘灌木林的物种为头花杜鹃 (*Rhododendron capitatum* Maxim.) 和高山杜鹃 (*Rhododendron lapponicum* (L.) Wahl)。湖北神农架自然保护区为我国中部山地与东部丘陵低山区的过渡地带, 地理坐标 31°15' ~ 31°75' N, 109°56' ~ 110°58' E, 气候为中亚热带向北亚热带的过渡带, 年均气温 10.6°C, 年降水量约 1500 mm^[27, 28]。巴山冷杉 (*Abies fargesii*

Franch) 在海拔 2000 m 以上开始出现^[29]，在海拔 2700 m 左右与神农箭竹 (*Fargesia murielae* (Gamble) Yi) 共同形成了林灌交错区，林灌交错区上部为箭竹林。

1.2 研究方法

采样区域位于林线附近林灌交错区上部的纯灌木林和下部乔木灌木混合的针叶林(图 1)，在 3 个采样区域的两类植被类型中各取 10 个采样点，样点间距为 3~10 m，共计 60 个采样点。采样地以及采样点植被信息见表 1。

利用 GPS(集思宝 G120BD) 测量每一个样点的经纬度和海拔高度，记录植被类型。每个样点设置 30 cm × 30 cm 的样方，去除土壤上层覆盖的凋落物后，采集样方内 0~15 cm 的土壤层，用自封袋带回实验室，同时在距离每一个样方 10 cm 内，打 15 cm 的土钻带回实验室，土钻直径

5 cm。采用手拣法收集大型土壤节肢动物，用干漏斗法分离出中型土壤动物(湿生土壤动物未做)。所收集的土壤动物装入有 75%酒精的带盖塑料瓶中，标明对应编号。参考《中国土壤动物检索图鉴》^[30] 进行土壤动物的分类与鉴定。土壤动物一般鉴定到目水平，但倍足纲中某些类群由于是幼虫，很难鉴定到目，故鉴定到上一分类阶元纲水平。根据优势类群和大型节肢动物的重要程度^[31]，选取蛛形纲、弹尾纲、昆虫纲、倍足纲、唇足纲和寡毛纲这 6 大纲作为所收集土壤动物的主要类群。

1.3 数据分析

群落组成：个体数量占总数量 10%以上为优势类群；1% ~ 10%为常见类群；低于 1%为稀有类群^[32]。

群落多样性：用样方收集的土壤动物数量除以样方面积计算土壤动物密度(ind / m²)；用土钻中

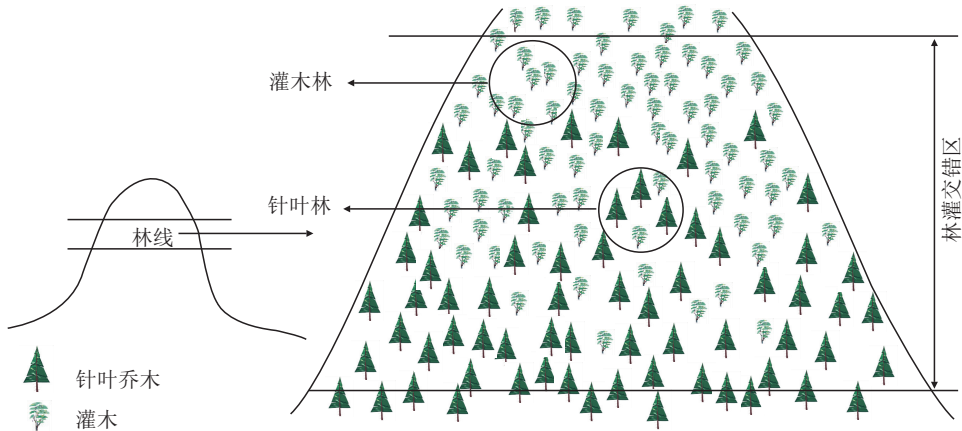


图 1 采样示意图

Fig. 1 Schematic of sampling

表 1 调查采样地点及植被信息

Table 1 Information on survey sampling locations and vegetation

采样区域 Sample area	采样点 Sample site	主要植物物种 Main plant species	海拔高度 / m Altitude	地理位置 Position
贡嘎山 Gongga Mountain (GG)	灌木林	毡毛栎叶杜鹃 <i>Rhododendron phaeochrysum</i> var. <i>levistratum</i>	3714.0	29.868°N, 102.018°E
	针叶林	毡毛栎叶杜鹃 <i>Rhododendron phaeochrysum</i> var. <i>levistratum</i> 峨眉冷杉 <i>Abies fabri</i>	3635.4	29.869°N, 102.020°E
太白山 Taibai Mountain (TB)	灌木林	头花杜鹃 <i>Rhododendron capitatum</i>	3425.7	33.995°N, 107.804°E
	针叶林	头花杜鹃 <i>Rhododendron capitatum</i> 太白红杉 <i>Larix chinensis</i>	3381.9	33.996°N, 107.803°E
农架 Shennongjia (SN)	灌木林	神农箭竹 <i>Fargesia murielae</i>	2728.3	31.874°N, 110.113°E
	针叶林	神农箭竹 <i>Fargesia murielae</i> 巴山冷杉 <i>Abies fargesii</i>	2610.7	31.264°N, 110.220°E

收集的土壤动物数量除以土钻面积计算土壤动物密度(ind/m²),二者相加后即每个样点的土壤动物密度。按照目的分类阶元,计算群落的 Shannon-Wiener 多样性指数 H' 、Simpson 优势度指数 D 以及 Pielou 均匀度指数 E 来表示土壤动物多样性。计算公式如下:

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

$$D = \sum P_i^2 \quad (2)$$

$$E = H' / \ln S \quad (3)$$

式中, S 为研究系统中总的类群数, P_i 为第 i 个物种个体数在群落总个体数中所占的比例。

统计分析:对服从正态分布的数据,用 Two-way ANOVA 分析不同地点、不同植被类型和两者交互作用下大中小型土壤动物之间的差异显著性。对不服从正态分布的数据进行 $\log(x+1)$ 转换,若转换后仍不服从正态分布,则利用 Kruskal-Wallis test(H) 进行非参检验。若差异显著用 Tukey HSD 法(Two-way ANOVA)和 Dunn 法(Kruskal-Wallis test)进行多重比较。通过非度量多维尺度分析方法(NMDS)探究不同植被类型下土壤动物组成的相似关系,用胁迫系数(Stress)来度量 NMDS 的拟合优度。以上分析及作图均采用 Microsoft Excel 2010 和 R4.0.5(plyr、dplyr、ggplot2、vegan、PMCMR、PMCMRplus)软件完成。

2 结果与分析

2.1 大中小型土壤动物类群与数量构成

在 3 个采样区中共捕获大中小型土壤动物 1099 只,隶属于 3 门 9 纲 26 目,共同的优势类群为双翅目幼虫和蜉蝣目。其中,贡嘎山的优势类群为蜉蝣目、弹尾目和双翅目幼虫,分别占总密度的 35.27%、32.35%和 15.15%,常见类群为地蜈蚣目、蜚蠊目、鞘翅目成虫以及蚤蚋科,分别占总密度的 2.42%、1.96%、2.92%和 2.04%。太白山优势类群也为蜉蝣目、弹尾目、双翅目幼虫,分别占总密度的 29.11%、42.40%和 10.06%,常见类群为小蚓类、鞘翅目成虫、等翅目、直翅目及蚤蚋科,分别占总密度的 8.25%、4.15%、1.30%、1.30%和 1.50%。神农架优势种群为蜉蝣目、鞘翅目幼虫、双翅目幼虫,分别占总密度的 42.47%、

10.69%和 18.68%,常见类群为蜘蛛目、地蜈蚣目、鞘翅目成虫目、倍足纲、小蚓类、蚤蚋科,分别占总密度的 1.44%、1.84%、7.7%、4.37%、1.72%、7.59%和 3.33%(表 2)。蜉蝣目与弹尾目平均密度的比值(A/C)可在一定程度上反映不同环境土壤动物的分布特征^[33],3 处林灌交错区的 A/C 值依次为:神农架(9.72) > 贡嘎山(1.09) > 太白山(0.69)。

2.2 大中小型土壤动物群落密度分布

3 个采样区域大中小型土壤动物的密度依次为:贡嘎山(2601 ind/m²) > 太白山(1920 ind/m²) > 神农架(1740 ind/m²),区域间差异不显著(图 2)。针叶林中土壤动物密度平均值比灌木林中大,如贡嘎山、太白山和神农架采样区中针叶林中土壤动物密度平均值分别为 3067、2011 和 1991 ind/m²,而灌木林中土壤动物密度平均值分别为 2135、1842 和 1490 ind/m²,但两种植被类型间土壤动物密度差异不显著(图 2)。整体看来,高山林灌交错区及不同植被类型下大中小型土壤动物的总密度无显著差异。

比较 3 处林灌交错区主要土壤动物类群的平均密度发现,蛛形纲和倍足纲在 3 处林灌交错区之间没有差异;贡嘎山和太白山弹尾纲的平均密度均显著高于神农架($P < 0.05$; $P < 0.01$);贡嘎山昆虫纲的平均密度显著高于太白山($P < 0.05$);太白山唇足纲的平均密度显著低于贡嘎山($P < 0.01$);此外,贡嘎山寡毛纲平均密度显著低于太白山和神农架($P < 0.01$)(图 3)。在每处林灌交错区内,比较不同植被类型之间主要土壤动物的密度发现,仅在神农架区域灌木林中倍足纲的平均密度显著高于针叶林中的密度($P < 0.05$),其余区域均没有差异(图 3)。

弹尾纲、昆虫纲和唇足纲的平均密度在不同林灌交错区的灌木林及针叶林之间均没有差异。蛛形纲的平均密度在 3 处林灌交错区的灌木林之间差异显著($P < 0.01$),神农架显著高于太白山($P < 0.05$);倍足纲的平均密度在 3 个采样区的灌木林之间差异显著($P < 0.01$),神农架极显著高于贡嘎山和太白山($P < 0.01$);寡毛纲的平均密度在 3 个采样区的灌木林和针叶林之间均有显著差异($P < 0.01$),神农架和太白山的灌木林和针叶林均极显著高于贡嘎山($P < 0.01$)(图 3)。

表 2 不同高山林灌交错区大中型土壤动物类群和平均密度

Table 2 Groups and average densities of macro- and meso-soil fauna in different alpine forest-shrub ecotones

种类 Group	地点 Site					
	GG		TB		SN	
	密度/ind/m ² Density	占比/ % Ratio	密度/ind/m ² Density	占比/ % Ratio	密度/ind/m ² Density	占比/ % Ratio
螨目 Acarina	917 ^a	35.27 ⁺⁺⁺	561 ^a	29.11 ⁺⁺⁺	739 ^a	42.47 ⁺⁺⁺
蜘蛛目 Araneae	0 ^a	0.00	1 ^a	0.05 ⁺	25 ^a	1.44 ⁺⁺
石蜈蚣目 Lithobiomorpha	1 ^a	0.04 ⁺	1 ^a	0.05 ⁺	0 ^a	0.00
地蜈蚣目 Geophilomorpha	63 ^a	2.42 ⁺⁺	1 ^b	0.05 ⁺	32 ^a	1.84 ⁺⁺
弹尾目 Collembola	841 ^a	32.35 ⁺⁺⁺	817 ^a	42.40 ⁺⁺⁺	76 ^b	4.37 ⁺⁺
倍足纲 Diplopoda	1 ^a	0.04 ⁺	4 ^a	0.21 ⁺	30 ^a	1.72 ⁺⁺
柄眼目 Stylommatophora	1 ^a	0.04 ⁺	1 ^a	0.05 ⁺	1 ^a	0.06 ⁺
正蚓目 Lumbricida	0 ^a	0.00	0 ^a	0.00	1 ^a	0.06 ⁺
小蚓类 Miceodrilae oligochaetes	0 ^b	0.00	159 ^a	8.25 ⁺⁺	132 ^a	7.59 ⁺⁺
蜚蠊目 Blattoptera	51 ^a	1.96 ⁺⁺	0 ^a	0.00	0 ^a	0.00
鞘翅目幼虫 Coleoptera larvae	1 ^b	0.04 ⁺	3 ^b	0.16 ⁺	186 ^a	10.69 ⁺⁺⁺
鞘翅目成虫 Coleoptera adults	76 ^b	2.92 ⁺⁺	80 ^{ab}	4.15 ⁺⁺	134 ^a	7.70 ⁺⁺
双翅目幼虫 Diptera larvae	394 ^a	15.15 ⁺⁺⁺	194 ^b	10.06 ⁺⁺⁺	325 ^{ab}	18.68 ⁺⁺⁺
双翅目成虫 Diptera adults	127 ^a	4.89 ⁺⁺	25 ^b	1.30 ⁺⁺	0 ^b	0.00
等翅目 Isoptera	0 ^a	0.00	25 ^a	1.30 ⁺⁺	0 ^a	0.00
膜翅目 Hymenoptera	25 ^a	0.96 ⁺	0 ^a	0.00	0 ^a	0.00
鳞翅目幼虫 Lepidoptera larvae	0 ^a	0.00	1 ^a	0.05 ⁺	1 ^a	0.06 ⁺
直翅目 Orthoptera	25 ^a	0.96 ⁺	25 ^a	1.30 ⁺⁺	0 ^a	0.00
啮目 Psocoptera	25 ^a	0.96 ⁺	0 ^a	0.00	0 ^a	0.00
幺蚰科 Scutigerelellidae	53 ^a	2.04 ⁺⁺	29 ^a	1.50 ⁺⁺	58 ^a	3.33 ⁺⁺
总密度 Total density	2600		1927		1740	

注：+++为优势类群(≥10%)；++为常见类群(1%~10%)；+为稀有类群(≤1%)。同行不同小写字母表示采样区之间在 P < 0.05 水平上差异显著。

Notes: +++ indicates Dominant Group (≥10%); ++ indicates Common Group (1%–10%); + indicates Rare Group (≤1%). Different lowercase letters indicate significant differences at P < 0.05 level.

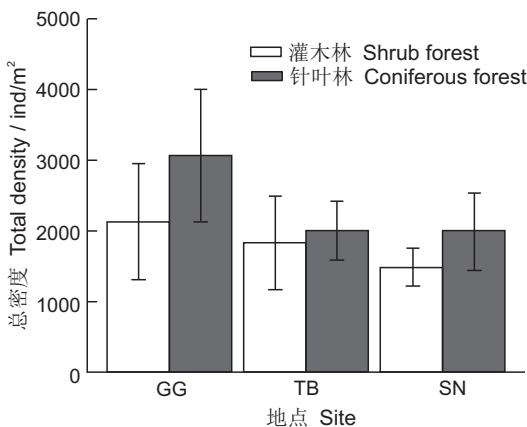


图 2 所有类群的平均密度

Fig. 2 Average density of all groups

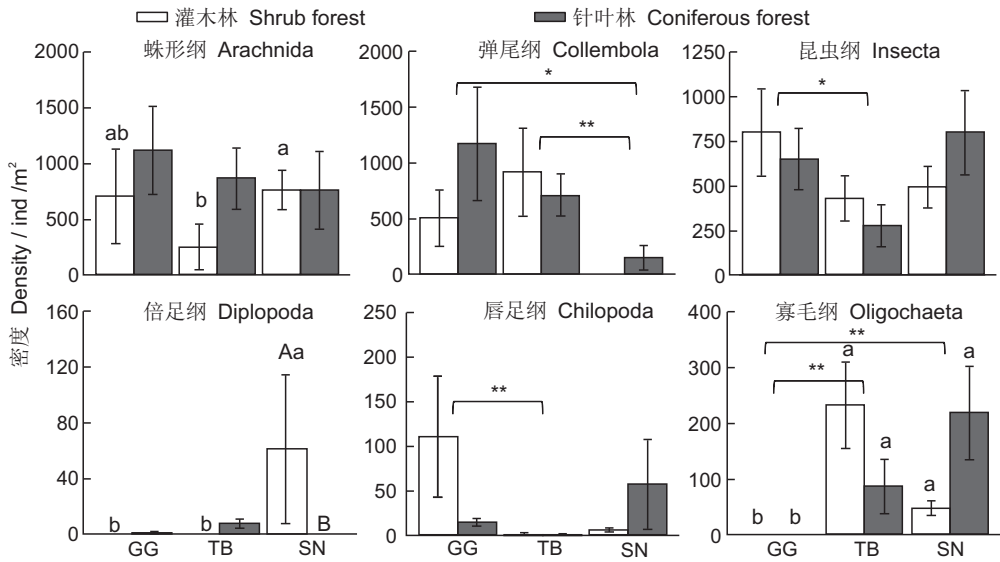
2.3 大中型土壤动物多样性分析

不同地点林灌交错区的大中型土壤动物多样性指数差异不明显。Shannon-Wiener 多样性系数指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数在

不同地点和植被类型之间均无差异(图 4: A、B、C)。但 3 处林灌交错区土壤动物的丰富度差异显著,神农架土壤动物的丰富度显著高于贡嘎山(P < 0.05)(图 4: D)。不同地点不同植被类型之间的土壤动物丰富度也存在显著差异(P < 0.01),神农架灌木林中土壤动物丰富度显著高于针叶林(P < 0.05),且神农架灌木林土壤动物丰富度显著高于贡嘎山和太白山灌木林(P < 0.01)(图 4: D)。

2.4 大中型土壤动物群落组成的相似关系

基于 Bray-Curtis 相似性系数的 NMDS 分析,其 Stress^[34] 值均为 0.2 左右,表明分析结果有效。如图 5 所示,3 处林灌交错区的群落组成有很大差异,太白山和神农架林灌交错区的土壤动物主要位于 NMDS 左侧且存在较大的重合部分,表明这两处的土壤动物群落在目水平上存在很多相似类群。贡嘎山的土壤动物主要位于 NMDS 右侧,各采样点的分布比较集中,表明贡嘎山土壤动物相似性系



不同大写字母表示相同地点, 不同植被类型间的差异; 不同小写字母表示不同采样区相同植被类型之间的差异; 显著性水平为 * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ 。下同。
Different capital letters indicate differences between different vegetation types in same location; different lowercase letters indicate differences between sampling areas. * indicates $P < 0.05$, and ** indicates $P < 0.01$. Same below.

图 3 主要类群的平均密度
Fig. 3 Average density of major groups

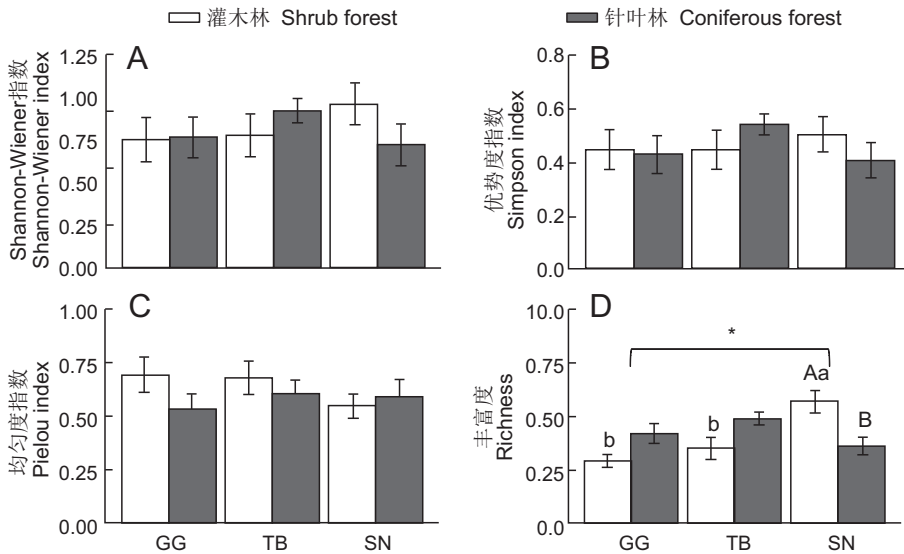


图 4 土壤动物群落多样性指数
Fig. 4 Diversity of soil fauna communities

数比太白山和神农架各采样点相对较高。该处与太白山和神农架的重叠部分较小, 表明贡嘎山在目水平上的群落组成与太白山和神农架相比具有较大差异(图 5)。

林灌交错区不同植被类型下的土壤动物群落组成存在差异。贡嘎山灌木林和针叶林的土壤动物都位于 NMDS 的中间位置, 且基本重合, 表明这两种植被类型下的土壤动物群落在目水平上存在较高

相似性。太白山灌木林位于 NMDS 的左侧, 针叶林位于右侧, 两者存在部分重叠, 说明灌木林与针叶林在目水平上存在某些相似类群, 且其差异比贡嘎山两种植被类型之间的差异大。神农架灌木林与针叶林之间的群落组成有显著差异, 针叶林位于 NMDS 的左侧, 灌木林位于右侧, 也存在部分重叠, 说明二者在目水平上也存在一些相似类群(图 5)。这些结果说明, 虽然林灌交错区的不同植被

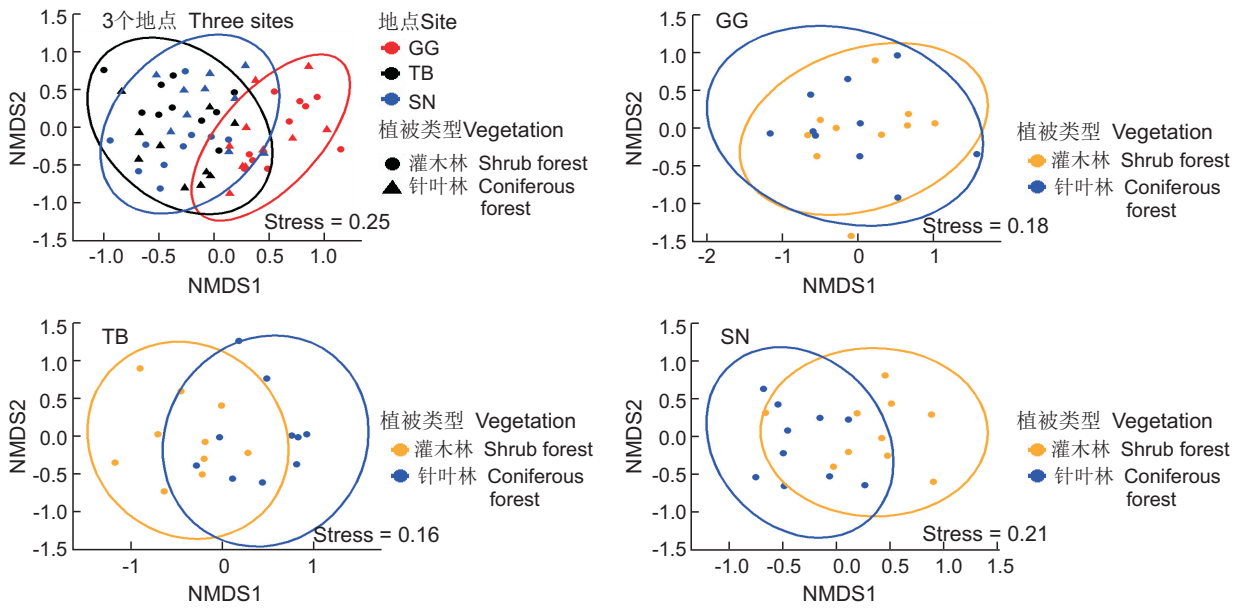


图5 土壤动物的二维非度量多维尺度分析图

Fig. 5 Two-dimensional non-metric multidimensional scale analysis (NMDS) of soil fauna communities

类型下的类群与密度分布无显著差异,但在群落组成方面具有一定的差异。

3 讨论

土壤动物群落的密度和组成受地理位置、森林植被类型等的影响^[35]。本研究选取的3处林灌交错区均位于高海拔地区,主要植被类型均为针叶林和灌木林。整体看来,3处林灌交错区采样点的不同植被类型下土壤动物的平均密度和多样性指数均不存在显著差异,但群落组成具有一定差异。这表明植被类型对土壤动物密度的影响较小。目前,关于植被类型对土壤动物密度的影响结论并不一致。如靳亚丽等^[36]对上海大金山岛不同植被类型下土壤动物群落多样性的研究表明,灌木林中土壤动物的密度、类群数、多样性系数均大于乔木林。李伟等^[37]在对太湖湖岸带湿地土壤动物群落结构的研究中发现,不同植被类型对土壤动物的丰度和多样性的影响不同。而 Gastine 等^[38]在德国的研究表明植被类型对线虫和蚯蚓的密度与多样性均无显著影响。Marian 等^[39]研究发现,安第斯山地区凋落物和土壤中的弹尾目及中型土壤动物的密度均不受植被类型的影响。本研究也表明不同植被类型下土壤动物的总体密度没有显著差异,其原因可能包括3个方面。首先,植物的生物量和初级生产力对土壤动物的密度具有最为直接的影响^[40,41],根

系生物量的变化可能会导致土壤动物群落的改变^[38],而根据我们的另一项调查结果,本研究取样区域的地下根系生物量在不同植被类型之间没有显著差异(未发表资料),因此,土壤动物密度无差异也可以理解。其次,针叶林中土壤动物的密度比灌木林高,但差异并不显著,这可能是由于林灌交错区针叶林的凋落物种类比灌木林更为丰富所致;然而与针叶林的硬质凋落物相比,灌木林的软质凋落物对土壤动物来说更易取食,故综合来看,不同植被类型下土壤动物的总体密度并无显著差异。另外,相邻群落间土壤动物的数量和类群更为相似^[42],如黄旭^[22]在林线交错区对不同植被类型下土壤动物群落的研究表明,虽然6个连续的植被类型之间的密度和类群存在差异,但相邻灌木林和针叶林的类群密度指数却并无差异。本研究中,灌木林和针叶林均位于林线附近的过渡区域,位置相邻,生境相似,可能也是造成土壤动物密度差异不显著的原因之一。而神农架灌木林比针叶林中土壤动物的丰富度高,可能是由于该林灌交错区是巴山冷杉受到人为砍伐、火烧而衰退形成,箭竹开花以后大面积死亡,使得灌木林呈现小块状零散分布^[43,44],导致神农架灌木林的生境比针叶林更为复杂。已有研究表明,微生境多样性越复杂,土壤中节肢动物丰富度和多样性越高^[45]。

值得注意的是,虽然不同地点和不同植被类型

的总体土壤动物在密度上基本相似,但NMDS分析显示其群落组成是有差异的。太白山和神农架群落组成具有一定相似性,而贡嘎山与这两处的群落组成差异较大。3处林灌交错区的优势类群均包括蜱螨目,贡嘎山和太白山还有弹尾目,该目在神农架也是常见类群,这与全球森林土壤动物优势类群是节肢动物的研究结果一致^[46],也与黄旭^[22]的报道相似,验证了跳虫和螨类可在一定程度上反映土壤动物在不同地区、不同生态系统中的分布特征。3处林灌交错区常见类群也较相似,均包含线虫科和鞘翅目,部分主要类群密度的差异以及稀有种类的不同,则可能是不同地点本身气候环境的差异所导致。相比于太白山和神农架,贡嘎山针叶林和灌木林土壤动物群落在目水平上具有更高的相似性,这可能是由于贡嘎山位于青藏高原地带,地理上具有一定的独特性^[47]。太白山和神农架的主要类群中,只有神农架灌木林中的倍足纲平均密度显著高于针叶林,这可能是由于马陆的取食偏好造成的^[48,49]。针叶林和灌木林资源养分的差异可能影响马陆取食的适口性^[50]。

4 结论

本文通过对贡嘎山、太白山和神农架3处林灌交错区不同植被类型下土壤动物群落特征的研究发现,不同植被类型下土壤动物的总体密度没有显著差异,但群落组成具有一定的差异。位于林线附近的林灌交错区对全球变化的反应格外敏感,虽然土壤动物在总体数量上没有差异,但群落组成的不同也可以在一定程度上反映环境的变化。

致谢:感谢毛准博士、刘峰老师、田秋香老师在实验设计中提供宝贵建议;感谢刘峰老师、田秋香老师、赵小祥、李东在野外调查采样中给予的帮助;感谢中国科学院贡嘎山高山生态系统观测试验站为本研究中部分采样提供的实验条件。

参考文献:

- [1] 毓丛,贺红土,谷晓楠,徐文茹,刘凯,等.高山林线形成机理研究进展[J].应用生态学报,2016,27(9):3035-3041. Yu C, He HS, Gu XN, Xu WR, Liu K, et al. Progresses of alpine treeline formation mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(9): 3035-3041.
- [2] Liu Y, Geng X, Tenzintarchen, Wei D, Dai D, et al. Divergence in ecosystem carbon fluxes and soil nitrogen characteristics across alpine steppe, alpine meadow and alpine swamp ecosystems in a biome transition zone[J]. *Sci Total Environ*, 2020, 748: 142453.
- [3] Sigdel SR, Wang Y, Camarero JJ, Zhu H, Liang E, et al. Moisture-mediated responsiveness of treeline shifts to global warming in the Himalayas[J]. *Global Change Biol*, 2018, 24(11): 5549-5559.
- [4] Seastedt TR, Oldfather MF. Climate change, ecosystem processes and biological diversity responses in high elevation communities[J]. *Climate*, 2021, 9(5): 1-16.
- [5] 邓长春,和润莲,蒋先敏,刘洋,陈亚梅,等.高山林线交错带高山杜鹃的凋落物分解[J].生态学报,2015,35(6): 1769-1778. Deng CC, He RL, Jiang XM, Liu Y, Chen YM, et al. Litter decomposition of *Rhododendron lapponicum* in alpine timberline ecotone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(6): 1769-1778.
- [6] 苏越,邹天媛,张雪萍.我国土壤动物环境指示功能研究进展[J].国土与自然环境研究,2011,6:64-67. Su Y, Wu TY, Zhang XP. Research advances in the indicative function soil fauna to environment in China[J]. *Territory & Natural Resources Study*, 2011, 6: 64-67.
- [7] 叶岳,姜玉霞,陈华.大型土壤动物功能类群对小生境环境因子的响应[J].江苏农业科学,2019,47(3):253-257. Ye Y, Jiang YX, Chen H. Responses of functional groups of large soil fauna to niche environmental factors[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(3): 253-257.
- [8] De Deyn GB, Raaijmakers CE, Zoomer HR, Berg MP, de Ruiter PC, et al. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity[J]. *Nature*, 2003, 422(6933): 711-713.
- [9] Korboulewsky N, Perez G, Chauvat M. How tree diversity affects soil fauna diversity: a review[J]. *Soil Biol Biochem*, 2016, 94: 94-106.
- [10] 张秀娟,勾影波,杨晨利.东洞庭湖环湖丘岗区土壤动物群落多样性研究[J].湖南理工学院学报(自然科学版),2008,21(1):10-14. Zhang XJ, Gou YB, Yang LC. Soil animal community diversity in the hilly areas around east Dongting lake[J]. *Journal of Hunan Institute of Science and Technology (Natural Sciences)*, 2008, 21(1): 10-14.
- [11] Yang X, Shao M, Li T, Gan M, Chen M. Community characteristics and distribution patterns of soil fauna after vegetation restoration in the northern Loess Plateau[J]. *Ecol Indic*, 2021, 122: 107236.
- [12] Cavard X, Macdonald SE, Bergeron Y, Chen HYH. Importance of mixedwoods for biodiversity conservation: evidence for understory plants, songbirds, soil fauna, and ectomycorrhizae in northern forests[J]. *Environ Rev*, 2011, 19(1): 142-161.
- [13] Hättenschwiler S, Tiunov AV, Scheu S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. *Annu*

- Rev Ecol Evol Syst*, 2005, 36: 191–218.
- [14] Perry KI, Herms DA. Response of the forest floor invertebrate community to canopy gap formation caused by early stages of emerald ash borer-induced ash mortality[J]. *For Ecol Manage*, 2016, 375: 259–267.
- [15] Bradford MA, Jones TH, Bardgett RD, Black HIJ, Boag B, *et al*. Impacts of soil faunal community composition on model grassland ecosystems [J]. *Science*, 2002, 298 (5593): 615–618.
- [16] Lu P, Dai N, Sun X, Zhang G, Xu D, *et al*. Composition and structure of soil fauna community in the Dexing Copper Mine tailings pool after revegetation [J]. *Turkish J Zool*, 2018, 42(3): 307–315.
- [17] 杨赵, 杨效东. 哀牢山不同类型亚热带森林地表凋落物及土壤节肢动物群落特征[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 3011–3020.
- Yang Z, Yang XD. Characteristics of floor litter and soil arthropod community in different types of subtropical forest in Ailao Mountain of Yunnan, Southwest China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(11): 3011–3020.
- [18] 韩其晟. 太白山林线树种太白红杉外生菌根群落研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 16–18.
- [19] Ding J, Zhang Y, Deng Y, Cong J, Lu H, *et al*. Integrated metagenomics and network analysis of soil microbial community of the forest timberline[J]. *Sci Rep*, 2015, 5: 7994.
- [20] Harsch MA, Hulme PE, McGlone MS, Duncan RP. Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming[J]. *Ecol Lett*, 2009, 12(10): 1040–1049.
- [21] Lingua E, Cherubini P, Motta R, Nola P. Spatial structure along an altitudinal gradient in the Italian central Alps suggests competition and facilitation among coniferous species[J]. *J Veg Sci*, 2008, 19(3): 425–436.
- [22] 黄旭. 川西高山林草交错区土壤动物多样性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2010: 16–34.
- [23] Panigrahy S, Anitha D, Kimothi MM, Singh SP. Timberline change detection using topographic map and satellite imagery: a critique[J]. *Trop Ecol*, 2010, 51(1): 87–91.
- [24] 舒树森, 朱万泽, 冉飞, 孙守琴, 张元媛. 贡嘎山峨眉冷杉成熟林碳利用效率季节动态及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2020, 44(11): 1127–1137.
- Shu SM, Zhu WZ, Ran F, Sun SQ, Zhang YY. Season dynamics of carbon use efficiency and its influencing factors in the old-growth *Abies fabri* forest in Gongga Mountain, western Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2020, 44(11): 1127–1137.
- [25] 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.
- Li M, Wu PF, Wang Y. Vertical distributions of soil fauna communities on the eastern slope of Gongga Mountain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2295–2307.
- [26] 陈昊轩, 刘欣蕊, 孙天雨, 王瑞丽, 张颖新. 太白山栎属树种叶片生态化学计量特征沿海拔梯度的变化规律[J]. *生态学报*, 2021, 41(11): 4503–4512.
- Chen HX, Liu RX, Sun TY, Wang RL, Zhang SX. Variation in leaf C : N : P stoichiometry of *Quercus* species along the altitudinal gradient in Taibai Mountain, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(11): 4503–4512.
- [27] 盛玉钰, 丛静, 卢慧, 杨开华, 杨林森, 等. 神农架国家森林公园林线过渡带土壤真菌多样性[J]. *生态学报*, 2018, 38(15): 5322–5330.
- Sheng YY, Cong J, Lu H, Yang KH, Yang LS, *et al*. Soil fungal diversity of the timberline ecotone in Shennongjia National Park [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(15): 5322–5330.
- [28] 胡琛, 贺云龙, 黄金莲, 雷静品, 崔鸿侠, 等. 神农架4种典型针叶人工林土壤酶活性及其生态化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2020, 33(4): 143–150.
- Hu C, He YL, Huang JL, Lei JP, Cui HX, *et al*. Soil enzyme activity and its ecological stoichiometry in four typical coniferous planted forests in Shennongjia National Nature Reserve, China [J]. *Forest Research*, 2020, 33(4): 143–150.
- [29] 崔鸿侠, 潘磊, 庞宏东, 黄志霖, 曾立雄, 等. 神农架巴山冷杉林凋落物量养分归还及分解特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(1): 194–198.
- Cui HX, Fan L, Pang HD, Huang ZL, Zeng LX, *et al*. Characteristics of litter Production dynamic and decomposition process of *Abies fargesii* forest in Shennongjia, Hubei Province [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2017, 41(1): 194–198.
- [30] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 1–756.
- [31] Basset Y, Cizek L, Cuénoud P, Didham RK, Guilhaumon F, *et al*. Arthropod diversity in a tropical forest [J]. *Science*, 2012, 338(6113): 1481–1484.
- [32] 李志伟, 童晓立, 张维球, 谢国忠, 戴克元. 广东石门台自然保护区森林土壤无脊椎动物群落多样性[J]. *华南农业大学学报(自然科学版)*, 2004, 25(1): 80–84.
- Li ZW, Tong XL, Zhang WQ, Xie GZ, Dai KY. Diversity of soil invertebrate assemblages in the forest of Shimentai Nature Reserve, Guangdong Province [J]. *Journal of South China Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2004, 25(1): 80–84.
- [33] 杨宝玲, 张文文, 范换, 王邵军, 阮宏华, 等. 苏北沿海地区不同土地利用类型下土壤动物群落结构特征[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(6): 120–126.
- Yang BL, Zhang WW, Fan H, Wang SJ, Ruan HH, *et al*. Community structure of soil fauna under different land use types in the coastal area of northern Jiangsu Province [J].

- Journal of Nanjing Forestry University* (Natural Sciences Edition), 2017, 41(6): 120–126.
- [34] 胡艺, 李秋华, 李钥, 何应, 韩孟书, 等. 基于 NMDS 和 RDA 方法分析贵州百花水库后生浮游动物群落结构动态[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1510–1518.
Hu Y, Li QH, Li Y, He Y, Han MS, *et al.* Analysis of structure and dynamics of metazooplankton community in Baihua Reservoir of Guizhou Province based on NMDS and RDA[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(9): 1510–1518.
- [35] 殷秀琴, 蒋云峰, 陶岩, 安静超, 辛未冬. 长白山红松阔叶混交林土壤动物生态分布[J]. 地理科学, 2011, 31(8): 935–940.
Yin XQ, Jiang YF, Tao Y, An JC, Xin WD. Ecogeographical distribution of soil fauna in *Pinus koraiensis* mixed broad-leaved forest of Changbai Mountains[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(8): 935–940.
- [36] 靳亚丽, 李必成, 耿龙, 卜云. 上海大金山岛不同植被类型下土壤动物群落多样性[J]. 生物多样性, 2017, 25(3): 304–311.
Jin YL, Li BC, Geng L, Bu Y. Soil fauna community in different natural vegetation types of Dajinshan Island, Shanghai[J]. *Biodiversity Science*, 2017, 25(3): 304–311.
- [37] 李伟, 崔丽娟, 赵欣胜, 张曼胤, 高常军, 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.
Li W, Cui LJ, Zhao XS, Zhang MY, Gao CJ, *et al.* Community structure and diversity of soil animals in the Lake Taihu lakeshore wetland [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 5(4): 944–955.
- [38] Gastine A, Scherer-Lorenzen M, Leadley PW. No consistent effects of plant diversity on root biomass, soil biota and soil abiotic conditions in temperate grassland communities[J]. *Appl Soil Ecol*, 2003, 24(1): 101–111.
- [39] Marian F, Ramírez Castillo P, Iñiguez Armijos C, Günter S, Maraun M, *et al.* Conversion of Andean montane forests into plantations: effects on soil characteristics, microorganisms, and microarthropods [J]. *Biotropica*, 2020, 52(6): 1142–1154.
- [40] Chen B, Wise DH. Bottom-up limitation of predaceous arthropods in a detritus-based terrestrial food web [J]. *Ecology*, 1999, 80(3): 761–772.
- [41] Hooper DU, Bignell DE, Brown VK, Brussaard L, Dangerfield JM, *et al.* Interactions between aboveground and belowground biodiversity in terrestrial ecosystems: patterns, mechanisms, and feedbacks [J]. *Bioscience*, 2000, 50(12): 1049–1061.
- [42] 肖能文, 刘向辉, 戈峰, 欧阳志云. 高黎贡山自然保护区大型土壤动物群落特征[J]. 生态学报, 2009, 29(7): 3576–3584.
Xiao NW, Liu XH, Geng F, Ouyang ZY. Research on soil faunal community composition and structure in the Gaoligong Mountains National Nature Reserve [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(7): 3576–3584.
- [43] 刘家琰, 徐文婷, 谢宗强, 申国珍, 樊大勇, 等. 基于 SPOT-VEGETATION 数据的神农架林区 1998–2013 年植被覆盖度格局变化[J]. 生态学报, 2018, 38(11): 3961–3969.
Liu JY, Xiu WT, Xie ZQ, Shen GZ, Fan DY, *et al.* Dynamics and analysis of vegetation fraction changes in Shennongjia Forest District during 1998 to 2013 by using SPOT-VEGETATION NDVI data [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(11): 3961–3969.
- [44] 田自强, 陈玥, 赵常明, 谢宗强, 陈伟烈. 中国神农架地区的植被制图及植物群落物种多样性[J]. 生态学报, 2004, 24(8): 1611–1621.
Tian ZQ, Chen Y, Zhao CM, Xie ZQ, Chen WL. Mapping of vegetation and analysis on its biodiversity in Shennongjia region, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1611–1621.
- [45] Hansen RA, Coleman DC. Litter complexity and composition are determinants of the diversity and species composition of oribatid mites (Acari: Oribatida) in litterbags [J]. *Appl Soil Ecol*, 1998, 9(1–3): 17–23.
- [46] Wu T, Ayres E, Bardgett RD, Wall DH, Garey JR. Molecular study of worldwide distribution and diversity of soil animals [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108(43): 17720–17725.
- [47] 周育臻, 吴鹏飞. 贡嘎山东坡森林小型土壤节肢动物群落多样性与时空分布[J]. 生态学报, 2020, 39(2): 586–599.
Zhou YZ, Wu PF. Diversity and spatiotemporal distribution of soil microarthropod communities in forests on the eastern slope of Gongga Mountain [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(2): 586–599.
- [48] Buch AC, Sisinnio CLS, Correia MEF, Silva-Filho EV. Food preference and ecotoxicological tests with millipedes in litter contaminated with mercury [J]. *Sci Total Environ*, 2018, 633: 1173–1182.
- [49] Ashwini KM, Sridhar KR. Leaf litter preference and conversion by a saprophagous tropical pill millipede, *Arthropoda magna* Attems [J]. *Pedobiologia*, 2005, 49(4): 307–316.
- [50] Ott D, Digel C, Klarner B, Maraun M, Pollierer M, *et al.* Litter elemental stoichiometry and biomass densities of forest soil invertebrates [J]. *Oikos*, 2014, 123(10): 1212–1223.

(责任编辑: 李惠英)