

DOI: 10.5846/stxb201904290879

徐艺逸, 曹敏, 徐国瑞. 云南省三种典型气候带凋落物层弹尾类多样性分布格局. 生态学报, 2020, 40(14): 5008–5017.

Xu Y Y, Cao M, Xu G R. Diversity distribution patterns of Collembola in litter layers along three typical climate zones in Yunnan Province. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(14): 5008–5017.

云南省三种典型气候带凋落物层弹尾类多样性分布格局

徐艺逸^{1,2}, 曹敏¹, 徐国瑞^{1,*}

¹ 中国科学院西双版纳热带植物园热带森林生态学重点实验室, 勐腊 666303

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 弹尾类是土壤动物中常见的优势类群, 其作为土壤微食物网的重要组成部分, 参与凋落物分解、土壤团聚体形成等重要生态过程。以往对弹尾类分布格局的研究通常关注其不同海拔梯度或者不同生境类型下的分布情况, 但在不同气候带下弹尾类多样性沿纬度分布格局仍不清楚。为讨论不同气候带下弹尾类沿纬度的分布格局及其潜在的环境影响机制, 于 2017 年 10 月(雨季末期)在云南省同一经度(E 101°)分布的三种典型气候带设置海拔梯度样带: 热带雨林(西双版纳, 800 m、1000 m、1200 m、1400 m)、亚热带常绿阔叶林(哀牢山, 2000 m、2200 m、2400 m、2600 m)、亚高山针叶林(丽江玉龙雪山, 3200 m、3400 m、3600 m、3800 m), 采集凋落物层弹尾类并调查分析土壤温度、土壤含水量、凋落物厚度、土壤 pH、土壤容重及土壤孔隙度等环境因子。利用 Berlese-Tullgren 法收集土壤动物, 共获得弹尾类 19150 只, 隶属于 10 科 29 属, 其中符蛭属(39.9%, 等节蛭科)数量最多, 其余优势属为棘蛭属(21.7%, 棘蛭科)和球角蛭属(10.1%, 球角蛭科), 这 3 个属合计占总体的 71.7%。凋落物层弹尾类的密度在亚高山针叶林明显高于热带雨林和亚热带常绿阔叶林, 弹尾类的属数排序由多到少依次为热带雨林、亚高山针叶林、亚热带常绿阔叶林。通过最小二乘回归法对弹尾类多样性的海拔格局进行回归分析, 得出弹尾类的丰富度指数(Margalef's 指数、Menhinick's 指数)、多样性指数(Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数)和均匀度指数(Pielou 均匀度指数)沿热带雨林、亚热带常绿阔叶林、亚高山针叶林呈单调递减格局。通过全模型子集回归筛选最佳环境模型表明, 温度是影响弹尾类多样性沿不同气候带分布格局的主要环境因子。本研究为预测不同气候带下弹尾类多样性如何响应环境变化提供参考。

关键词: 土壤动物; 弹尾类; 多样性分布格局; 气候带; 温度

Diversity distribution patterns of Collembola in litter layers along three typical climate zones in Yunnan Province

XU Yiyi^{1,2}, CAO Min¹, XU Guorui^{1,*}

¹ CAS Key Laboratory of Tropical Forestry Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Mengla 666303, China

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: As an important part of the soil microfood-web, Collembola is a dominant group in soil fauna, which participates in litter decomposition and promotes the formation of soil aggregates. Previous studies have focused on the distribution pattern of Collembola at different altitudes or habitats, but the distribution pattern of Collembola diversity along latitudes in different climatic zones is still unclear. There are three typical climatic zones in Yunnan Province, which are tropical, subtropical and subalpine. They are all located in the eastern margin of the Qinghai-Tibet Plateau. In order to explore the latitudinal distribution pattern and potentially environmental impact mechanism of Collembola in different climatic zones,

基金项目: 国家自然科学基金项目(31700352); 中国科学院“西部之光”人才培养引进计划“西部青年学者”B 类项目; 中国科学院“135 项目”(2017XTBG-T01); 中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室开放课题(ISA2019203)

收稿日期: 2019-04-29; 网络出版日期: 2020-04-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xuguorui@xtbg.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

the elevational gradient transects were set up in three typical climatic zones of Yunnan Province in October 2017 (at the end of the rainy season), namely the tropical rainforest (800 m, 1000 m, 1200 m, 1400 m), subtropical evergreen broad-leaved forest (2000 m, 2200 m, 2400 m, 2600 m), and subalpine coniferous forest (3200 m, 3400 m, 3600 m, 3800 m). The longitude of all transects is almost the same (E 101 degrees), which minimizes the impact of longitude, topographic differences and geological history on the results of the study. We collected soil fauna in litter layer per unit area and investigated the environmental factors such as soil temperature, soil water content, litter amount, soil pH, soil bulk density and soil porosity. Soil animals were extracted by Berlese-Tullgren method. We put Collembola sample in 75% alcohol solution and identified Collembola to genus level. A total of 19150 Collembola individuals were obtained, belonging to 29 genera and 10 families. At family level, the number of Isotomidae was the largest (59.9%), followed by Onychiuridae (21.8%) and Onychiuridae (10.1%). These three families accounted for 91.8% of the total individuals. At genus level, the most abundant genus was *Folsomia* (39.9%, Isotomidae). The secondary dominant genus was *Onychiurus* (21.7%, Onychiuridae) and then *Hypogastrura* (10.1%, Hypogastruridae). These three genera accounted for 71.7% of the total individuals. The density of Collembola in litter layer was significantly higher in sub-alpine coniferous forest than that in tropical rainforest and subtropical evergreen broad-leaved forest. The genus number of Collembola decreased as the following order: tropical rainforest, sub-alpine coniferous forest, and subtropical evergreen broad-leaved forest. Based on the regression analysis of the elevational diversity patterns of Collembola by least squares regression method, the richness index (Margalef's index, Menhinick's index), diversity index (Shannon-Wiener index, Simpson index), and evenness index (Pielou evenness index) of Collembola decreased monotonously along the tropical rainforest, subtropical evergreen broad-leaved forest and sub-alpine coniferous forest. Taking each diversity index as the response variable, with temperature (mean soil temperature, maximum soil temperature and minimum soil temperature in rainy season), litter amount, soil pH, soil water content, soil bulk density, and soil porosity as explanatory variables, the best environmental model (minimum AIC value) was selected by subset regressions from full model. We concluded that temperature was the main environmental factor affecting the distribution pattern of Collembola diversity (positively correlated) along different climatic zones. This study enhances our understanding on how the litter Collembola will respond to future environmental changes among different climatic zones, especially in the context of global climate change.

Key Words: soil fauna; Collembola; diversity distribution patterns; climate zone; temperature

土壤动物作为重要分解者,在生态系统的物质循环与营养供应中起着重要作用。弹尾类作为土壤动物中优势类群,数量巨大、分布广泛、食性多样,在土壤食物网占有关键位置^[1-2]。同时,弹尾类通过对植物木质部的取食和对凋落物的破碎作用参与分解作用,促进微生物继续分解凋落物^[3]。弹尾类通过直接或间接的方式影响土壤团聚体的形成,进而对生物地球化学过程、水分渗透、气体交换以及抵抗侵蚀损失等方面产生重要影响^[2]。在全球变化背景下,对不同气候带下弹尾类多样性沿海拔分布格局的研究有助于进一步理解土壤动物多样性如何响应气候变化。

之前的研究表明弹尾类多样性在亚热带高于寒温带,影响其多样性分布的环境因子为温度^[4];亚热带弹尾类多样性随海拔升高而升高,且与土壤 pH 呈负相关^[5],在温带的研究也得到相同的结果^[6];也有研究表明,在亚热带弹尾类的丰富度和数量随海拔呈单调上升格局且与土壤有机质含量正相关^[7];而在热带弹尾类多度随海拔升高而降低,其主要与温度呈正相关^[8]。在不同气候带的研究中弹尾类的多样性沿海拔分布格局差异较大,主要影响其分布格局的环境因素也不尽相同。这些研究多数具有气候带的局限性,经度差异较大,无法去除经度差异带来的影响。

可以看出,以往研究很少关注弹尾类多样性跨气候带的分布格局,尤其是在同一经度不同纬度梯度下。云南省分布着热带、亚热带和亚高山三种典型气候带,是全球生物多样性研究的热点地区,为研究不同气候带

下弹尾类多样性沿海拔分布格局创造了地理优势。本研究在云南省内同一经度(E 101°) 的热带雨林(西双版纳补蚌 800—1400 m) ,亚热带常绿阔叶林(哀牢山 ,2000—2600 m) 和亚高山针叶林(玉龙雪山 ,3200—3800 m) 展开 ,样地均处于青藏高原的东缘且经度较为一致 ,最大程度减少了经度、地形差异和地质历史对研究结果造成的影响。通过调查与分析弹尾类多样性沿气候带的分布格局与环境因子 ,回答如下科学问题: (1) 弹尾类多样性是否沿热带、亚热带、亚高山气候带呈递减格局? (2) 影响弹尾类多样性沿不同气候带分布格局的环境因素是什么? 针对以上科学问题 ,我们做出如下科学假设: (1) 弹尾类多样性沿热带、亚热带、亚高山气候带降低; (2) 温度是影响不同气候带下弹尾类多样性分布格局的主要环境因子。

1 研究地区与方法

1.1 研究地概况

本研究在云南省 3 个典型气候带开展 ,分别为热带(西双版纳补蚌地区 21°08′—22°36′N ,99°56′—101°50′E)、亚热带(哀牢山千家寨地区 23°36′—24°56′N ,100°44′—101°14′E) 和亚高山(丽江玉龙雪山 27°10′—27°40′N ,100°10′—100°20′E) 。在每个气候带设置 4 个海拔样带 ,海拔样带间的垂直高差 200 m ,不同气候带间的高差为 600 m 。具体而言包括热带(800 m、1000 m、1200 m、1400 m)、亚热带(2000 m、2200 m、2400 m、2600 m)、亚高山(3200 m、3400 m、3600 m、3800 m) ,每个海拔带上选择 4 个 20 m × 20 m 的样地进行土壤动物取样。

表 1 研究地概况
Table 1 Study sites survey

研究地区 Study site	气候带 Climate zone	植被类型 Vegetation type	年降水量/mm Mean annual precipitation	年均温/℃ Mean annual temperature	林冠郁闭度/% Canopy closure	林冠高度/m Canopy height	参考文献 References
玉龙雪山 Yulong Mountain	亚高山	针叶林	935	12.79	85—90	30—40	[9—12]
哀牢山 Ailao Mountain	亚热带	中山湿性常绿 阔叶林	1931	11	89—95	25—30	[12—15]
西双版纳 Xishuangbanna	热带	热带季节 雨林、季风常 绿阔叶林等	1493	21.8	80—85	45—60	[12 , 16]

热带样地处于低山沟谷及低丘上 ,主要的森林类型为热带季节雨林、热带季雨林和热带山地常绿阔叶林等。原始林的林冠高达 50—60 m ,由望天树(*Parashorea chinensis*) 占优势 ,中下层乔木主要包括毛猴欢喜(*Sloanea tomentosa*)、绒毛番龙眼(*Pometia pinnata*)、假海桐(*Pittosporopsis kerrii*)、云树(*Garcinia cowa*)、蚊花(*Mezzettiopsis creaghii*)、染木(*Saprosma ternata*) 等 ,次生林主要由壳斗科(*Fagaceae*) 植物组成^[16]。亚热带样地分布于滇中高原南、北两侧的几条大山脉的中山地带 ,植被类型主要为中山湿性常绿阔叶林 ,优势植物包括壳斗科(*Fagaceae*)、木兰科(*Magnoliaceae*)、樟科(*Lauraceae*)、山茶科(*Theaceae*) 等^[15]。亚高山样地位于横断山脉地区 ,由下而上分别为云南松(*Pinus yunnanensis*) 林、丽江云杉(*Picea likiangensis*) 林、大果红杉(*Larix potaninii* var. *australis*) 林和冷杉(*Abies fabri*) 林^[10—11]。热带 1200m 及 1400m 的样地在 20 世纪 60 年代曾被间伐 ,其他样地较少受人类干扰^[12]。

1.2 土壤动物采集与鉴定

2017 年 10—11 月(雨季末期) 在云南省 3 个典型气候带下的 48 个海拔样地内取样 ,每个样地随机选择 3 个 0.6 m × 0.6 m 的小样方 ,抓取凋落物层于布袋中 ,做好标签 ,三处合并为一个混合样。在实验室中用 Berlese-Tullgren 法(干漏斗法) 烘 48 h 后获得土壤动物。将分离的土壤动物保存在 75% 酒精中 ,在解剖镜下依照《中国土壤动物检索图鉴》、《中国亚热带土壤动物》、《中国土壤动物》等书籍资料和 <http://www.collembola.org/> 等分类网站进行弹尾类的分类鉴定(属) 并计数^[17—19]。

1.3 环境数据采集

采集的环境数据包括(1) 温度: 在样地内布置的土壤温度自动记录设备(iButton 纽扣式温度计), 获得每小时的样地土壤温度。(2) 水分: 随机选择 3 个小样方, 分别用环刀取 100 cm³ 的土壤放入铝盒, 使用烘箱烘干法(105℃) 测定土壤含水量。(3) pH: 使用 pH 测量仪测定。(4) 凋落物产量: 测量凋落物厚度。(5) 土壤容重(容重法) 和土壤孔隙度。

1.4 数据统计分析

类群数量等级划分: 个体数量占总捕获量的 10% 以上者为优势类群; 1%—10% 者为常见类群; 1% 以下者为稀有类群^[18]。

弹尾类密度:

$$D = N/S$$

其中 N 为采样点弹尾类所有的个体数之和, S 为所取凋落物的体积。

弹尾类丰富度采用以下两个指数计算:

$$(1) \text{Margalef's index}(D)^{[20]}: D = (S - 1) / \ln n$$

$$(2) \text{Menhinick's index}(D)^{[21]}: D = 1 - \sum p_i$$

多样性采用以下两个指数计算:

$$(1) \text{Shannon-Wiener index}(H')^{[22]}: H' = - \sum_{i=1}^S (p_i \ln p_i)$$

$$(2) \text{Simpson index}(D)^{[23]}: D = S / \sqrt{n}$$

均匀度计算指数:

$$\text{Pielou evenness index}(J_{sw})^{[24]}: J_{sw} = - \sum p_i \ln p_i / \ln S$$

$$p_i = n_i / n$$

其中 S 为采样点弹尾类共有属数目; n 为采样点弹尾类所有的个体数之和; n_i 为采样点弹尾类属 i 的个体数; p_i 为第 i 属的比例多度。

多样性指数使用 R 软件中的“vegan”包计算。

环境因子的筛选: 使用最小二乘回归法对弹尾类多样性的海拔格局进行回归分析, 通过比较一次与二次项回归的模型 AIC 值与 P 值判定海拔分布格局。以多样性为响应变量, 以温度(雨季土壤平均温度、最高温度、最低温度)、凋落物产量、pH、土壤含水量、土壤容重以及土壤孔隙度为解释变量, 通过全模型子集回归筛选最佳环境模型(AIC 值最小)。同时分析 $\Delta AIC < 2$ 的模型总数与出现在这些模型中的参数频次, 进行模型平均分析。使用 R 软件进行环境因子分析, 主要使用“MuMIn”、“car”和“QuantPsyc”包等。使用 Sigmaplot 12.0 软件绘制弹尾类多样性海拔分布格局。

2 结果与分析

2.1 不同气候带弹尾类组成概况

本研究采集到凋落物中的弹尾类共 19150 只, 隶属于 10 科 29 属。在科的分类水平上看, 如图 1 所示, 等节蟠科数量最多(59.9%), 其次为棘蟠科(21.8%) 和球角蟠科(10.1%), 这 3 个科合计占总体的 91.8%。在属的分类水平上看, 如图 1 所示, 其中符蟠属(39.9%, 等节蟠科) 数量最多, 其余优势属为棘蟠属(21.7%, 棘蟠科) 和球角蟠属(10.1%, 球角蟠科), 这 3 个属合计占总体的 71.7%。

就弹尾类密度而言, 如图 2 所示, 热带雨林和亚热带常绿阔叶林捕获的弹尾类密度相差不多, 在亚高山针叶林有明显增加。就弹尾类的属数多少而言, 如图 2 所示, 由多到少依次为热带雨林、亚高山针叶林、亚热带常绿阔叶林。

2.2 弹尾类多样性随海拔的分布格局

如图 3 所示, 土壤弹尾类的 Margalef's 指数($R^2 = 0.2996$, $P < 0.0001$)、Menhinick's 指数($R^2 = 0.5140$, $P <$

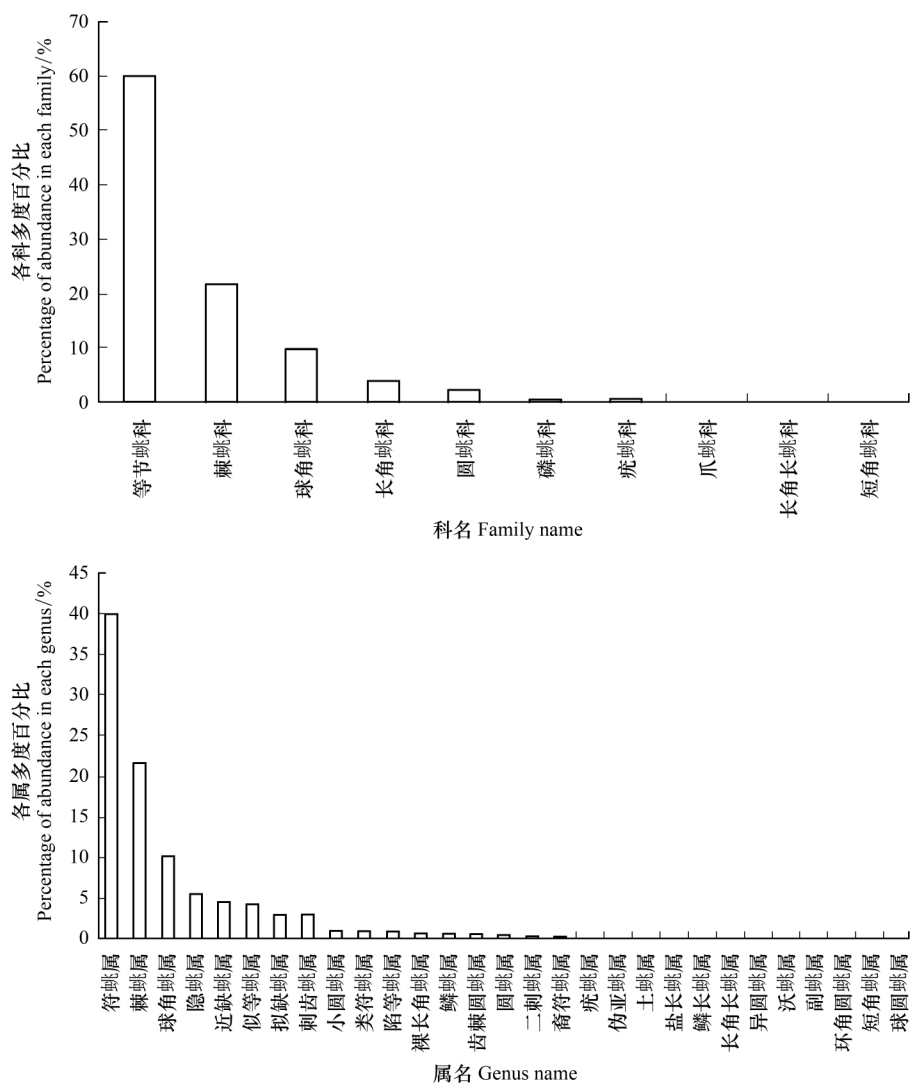


图1 不同科(属)弹尾类占总体的百分比
Fig.1 Percentage of Collembola in different families (genera)

0.0001)、Shannon-Wiener 多样性指数($R^2=0.5268$ $P<0.0001$)、Simpson 多样性指数($R^2=0.1738$ $P<0.01$)和 Pielou 均匀度指数($R^2=0.1034$ $P<0.05$) 随海拔及纬度上升呈现单调递减格局,整体呈现为热带雨林最高、亚热带常绿阔叶林居中、亚高山针叶林最低。

2.3 不同气候带下与弹尾类生物多样性分布格局相关的环境因子

以多样性为响应变量,以温度、凋落物产量、pH、土壤含水量、土壤容重以及土壤孔隙度为解释变量,通过全模型子集回归筛选最佳环境模型(AIC 值最小)可以看出(表 2),弹尾类 Margalef's 指数与凋落厚度负相关(Coefficient = -0.1381 $P=0.0210$),与雨季极高温度正相关(Coefficient = 0.1143 $P=0.0007$),与土壤容重微弱负相关(Coefficient = -1.1021 $P=0.0971$),与土壤含水量微弱正相关(Coefficient = 1.4415 $P=0.0877$);弹尾类 Menhinick's 指数与土壤容重负相关(Coefficient = -2.0223 $P=0.0000$),与凋落物厚度负相关(Coefficient = -0.0925 $P=0.0026$),与土壤孔隙度负相关(Coefficient = -0.0213 $P=0.0228$),与雨季平均温度正相关(Coefficient = 0.0875 $P=0.0000$);弹尾类 Shannon-Wiener 多样性指数与雨季极低温度正相关(Coefficient = 0.0326 $P=0.0002$),与雨季平均温度呈正相关($P=0.0358$);弹尾类 Pielou 均匀度指数与雨季极低温度正相关(Coefficient = 0.0061 $P=0.0484$)。

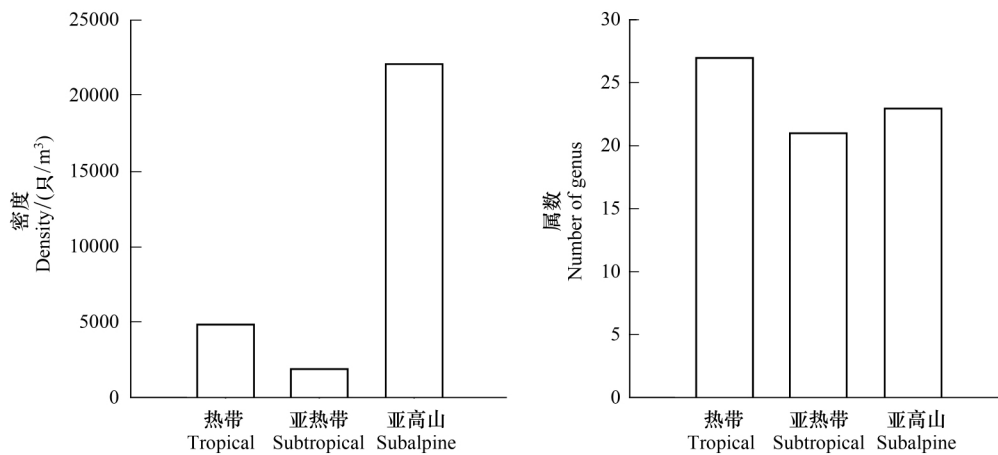


图2 不同气候带弹尾类的密度与属数

Fig.2 Density and genus numbers of Collembola in different climatic zones

表2 影响弹尾类多样性分布格局的环境因子

Table 2 Environmental variables related to the diversity distribution patterns of Collembola in different climates

响应变量 Response variable	调整 R^2 Adj. R^2	最佳模型中的 环境变量 Environmental variables in best models	模型平均估计 Model- averaged estimate	标准误 Std. Error	P 值 Pr(> z)	变量相对 重要值 Relative variable importance	该变量出现的 最佳模型数量 N containing models	最佳模型个数 Number of best models
玛格列夫指数 Margalef	0.5836	Litter amount [#]	-0.1381	0.0588	0.0210	*	1	7
		T-maxR [#]	0.1143	0.0331	0.0007	***	0.91	
		Soil bulk density [#]	-1.1021	0.6480	0.0971	.	0.43	
		Soil water content	1.4415	0.8249	0.0877	.	0.4	
		T-minR	0.0691	0.0533	0.2018		0.28	
门希尼克指数 Menhinick	0.6444	Soil porosity	-0.0184	0.0159	0.2608		0.12	2
		Soil bulk density [#]	-2.0223	0.4719	0.0000	***	1	
		Litter amount [#]	-0.0925	0.0298	0.0026	**	1	
		Soil porosity [#]	-0.0213	0.0091	0.0228	*	1	
		T-rain [#]	0.0875	0.0115	0.0000	***	1	
香农-维纳指数 Shannon-Wiener	0.2968	Soil water content	-0.4941	0.6022	0.4255		0.27	5
		T-minR [#]	0.0326	0.0085	0.0002	***	0.6	
		T-rain	0.0358	0.0080	0.0000	***	0.27	
		Litter amount	-0.0357	0.0189	0.0662	.	0.13	
		T-maxR	0.0371	0.0087	0.0000	***	0.13	
辛普森指数 Simpson	0.1697	Soil water content	0.2448	0.3912	0.5425		0.13	4
		Bulk density	-0.1514	0.2464	0.5500		0.13	
		T-minR [#]	0.0122	0.0138	0.3830		0.72	
		T-rain	-0.0039	0.0224	0.8620		0.46	
		pH	0.0132	0.0209	0.5390		0.15	
皮埃卢指数 Pielou evenness	0.07213	T-rain	0.0100	0.0084	0.2392		0.54	7
		Soil bulk density	-0.1470	0.1222	0.2388		0.44	
		T-minR [#]	0.0061	0.0030	0.0484	*	0.33	
		T-maxR	-0.0020	0.0116	0.8644		0.22	
		Soil water content	-0.2755	0.2266	0.2371		0.09	

#: 进入 AIC 值最小模型的解释变量; N containing models: 该解释变量出现在最佳模型 ($\Delta AIC < 2$) 的数量; Number of best models: 最佳模型的总个数 ($\Delta AIC < 2$); Litter amount: 凋落物厚度; T-maxR: 雨季土壤最高温度; T-minR: 雨季土壤最低温度; T-rain: 雨季土壤平均温度; Soil bulk density: 土壤容重; Soil water content: 土壤含水量; Soil porosity: 土壤孔隙度; pH: 土壤酸碱度; Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

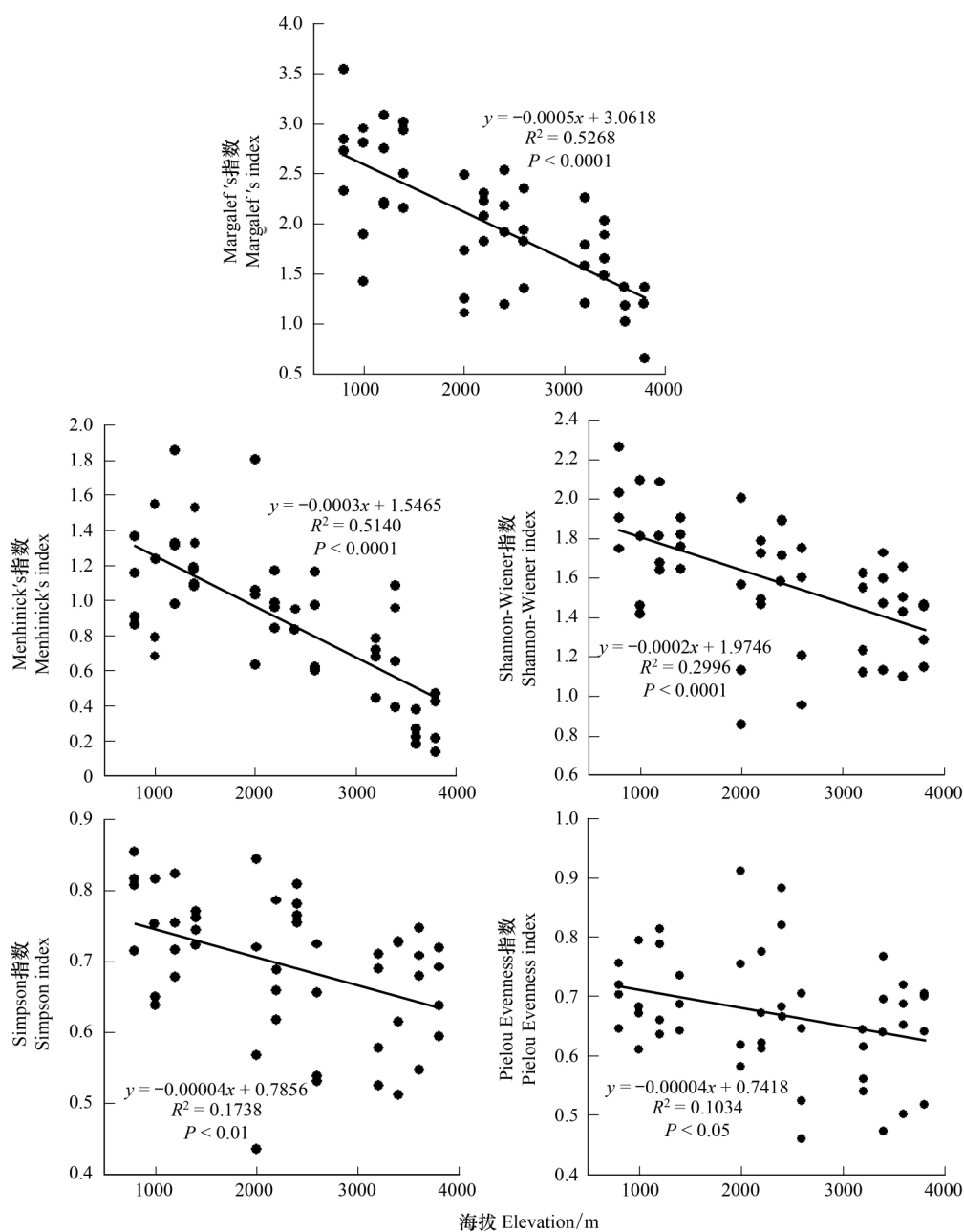


图3 弹尾类多样性沿海拔分布格局

Fig.3 Collembola diversity distribution patterns along elevation in different climatic zones

3 讨论

3 个典型气候带下弹尾类属的数量排序为: 热带雨林 > 亚高山针叶林 > 亚热带常绿阔叶林, 但 3 个气候带属数相差很小且绝对优势类群均为符蛭属(等节蛭科), 表明弹尾类组成在属级分类单位上具有一定的跨气候带稳定性, 这与前人的研究结果基本一致^[5, 7, 25]。3 个典型气候带下弹尾类密度排序为: 亚高山针叶林 > 热带雨林 > 亚热带常绿阔叶林, 热带雨林和亚热带常绿阔叶林凋落物层弹尾类的密度相差较小, 亚高山针叶林则明显高于另外两个气候带, 这主要是由于符蛭属(占亚高山总体捕获量 46.67%) 和棘蛭属(占亚高山针叶林整体捕获量 28.26%) 的个体数量急剧增加引起的。符蛭属在所有气候带均为绝对优势属, 但在亚高山针

叶林的数量与占比更高; 棘蜉属在热带雨林和亚热带常绿阔叶林仅占 1.11% 和 2.07% ,但在亚高山针叶林骤增至 28.26% ,使得弹尾类的密度在亚高山针叶林达到最高。在日本亚高山针叶林凋落物层开展的相关研究也发现符蜉属(33.5%) 与棘蜉属(15.9%) 在弹尾目捕获的总数量占据绝对优势地位^[26]。据此推测,亚高山针叶林的凋落物层提供的生境可能更有利于符蜉属和棘蜉属内的种群生长,未来需要更多的对比研究以探索各典型气候带不同植被类型下凋落物层弹尾类的优势种与稀有种的多度分布格局。

结果显示弹尾类的多样性呈现热带雨林最高、亚热带常绿阔叶林居中、亚高山针叶林最低的分布格局,这与该地区幼苗物种丰富度^[27]和蛾类物种丰富度沿海拔分布格局相同^[28]。可能是由于这 3 个气候带最显著的差异为温度,而影响弹尾类、蛾类和幼苗多样性分布格局的主要环境因子也为温度,温度的变化规律相同使得物种丰富度形成了相似的海拔分布格局。本研究得到的弹尾类多样性在亚热带高于亚高山的结果与在澳大利亚莱明顿国家公园得到的弹尾类多样性在亚热带高于寒温带^[4]的结果相一致,而得到的弹尾类多样性沿海拔呈单调下降格局的结果与贡嘎山东坡^[5]和法国的马克拉普拉涅(Macot La Plagne)^[6]得到的结果相反。这可能是由于在澳大利亚和法国的实验中,不同海拔的弹尾类的群落组成与土壤的酸碱度相关性较强,弹尾类的密度和多样性与土壤的 pH 呈负相关,而本实验弹尾类多样性沿海拔分布格局与温度相关性最强,与土壤酸碱性的相关性则很微弱。

在本研究中,通过全模型子集回归筛选最佳环境模型得出,影响弹尾类的 Margalef's 丰富度指数、Menhinick's 丰富度指数、Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数和 Pielou 均匀度指数的环境因子中,均有雨季土壤极高温、雨季土壤极低温和雨季土壤平均温度中的一个,且均为正相关。温度是驱动土壤动物群落结构与多样性的重要环境因子。就直接影响而言,温度作为土壤动物生存的必须环境因子,可通过影响土壤动物体内酶的活性影响其生长发育,而且在一定范围内提高土壤动物的活性^[29]。间接影响而言,温度可以通过影响地上植物凋落物的种类、质量和数量来影响土壤动物的多样性分布格局^[30]。温度可以影响土壤动物对凋落物的分解,使土壤动物对分解的贡献率随海拔升高而逐渐降低^[31]。本研究中亚高山的植被类型为针叶林,产生的凋落物种类较单一,使得弹尾类的丰富度指数(Margalef's 指数、Menhinick's 指数) 在 3 个气候带中最低。而优势物种数量巨大,这使得弹尾类的多样性指数(Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数) 和均匀度指数(Pielou 均匀度指数) 也达到了最低。本研究的结果进一步证实了温度与弹尾类多样性呈正相关关系。

本研究主要关注雨季末期不同气候带土壤弹尾类多样性沿海拔分布格局,雨季的湿度和温度都较为适宜弹尾类的生存,环境胁迫较少,而在旱季随着水热条件的改变,其分布格局可能有所不同,有待进一步研究。由于捕获的弹尾类数量较多,通过形态分析将弹尾类鉴定到种的难度巨大,本研究在属一级分类水平探讨了弹尾类多样性在不同气候带下的分布格局。土壤动物多样性巨大且分类信息大量缺失,土壤动物分布格局研究多基于较高的分类单元(科、属或形态种) 开展^[32],如在属级分类精度上的线虫多样性研究^[33],以及在科级水平上开展的多类群土壤动物多样性研究^[34-36]。最近的研究表明,大多数同属土壤动物在土壤食物网中的营养级位置相同^[37],而在科一级分类水平的信息可更好地反映弹尾类的生境选择偏好^[38]。未来的研究需要结合分子生物学手段与传统的形态鉴定方法,在更高的分类精度上探索弹尾类及其他土壤动物类群的物种多样性分布格局及其潜在的环境影响机制。

4 结论

在云南省热带、亚热带和亚高山这 3 个典型气候带下的森林凋落物层中,弹尾类绝对优势类群均为符蜉属。从总捕获量上看,符蜉属占 39.9%(等节蜉科),其余优势属为棘蜉属(21.7% ,棘蜉科) 和球角蜉属(10.1% ,球角蜉科)。弹尾类的丰富度指数(Margalef's 指数、Menhinick's 指数)、多样性指数(Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 多样性指数) 和均匀度指数(Pielou 均匀度指数) 均沿热带雨林、亚热带常绿阔叶林、亚高山针叶林气候带呈单调递减格局。温度是影响弹尾类多样性沿不同气候带分布格局的主要环境因子。

参考文献(References):

- [1] Christiansen K A. Springtails. Kansas: Emporia State University, 2003.
- [2] 陈建秀, 麻智春, 严海娟, 张峰. 跳虫在土壤生态系统中的作用. 生物多样性, 2007, 15(2): 154-161.
- [3] Yang X D, Yang Z, Warren M W, Chen J. Mechanical fragmentation enhances the contribution of Collembola to leaf litter decomposition. European Journal of Soil Biology, 2012, 53: 23-31.
- [4] Greenslade P, Kitching R L. Potential effects of climatic warming on the distribution of Collembola along an altitudinal transect in Lamington National Park, Queensland, Australia. Memoirs of the Queensland Museum, 2011, 55(2): 333-347.
- [5] 王群, 武崎, 刘兴良, 张荣芝, 吴鹏飞. 海拔高度大尺度变化对土壤跳虫群落的影响. 西南农业学报, 2016, 29(8): 1936-1942.
- [6] Loranger G, Bandyopadhyaya I, Razaka B, Ponge J F. Does soil acidity explain altitudinal sequences in collembolan communities? Soil Biology and Biochemistry, 2001, 33(3): 381-393.
- [7] 王宗英, 朱永恒, 路有成, 聂献忠, 陈建秀, 孟文新, 黄诚. 九华山土壤跳虫的生态分布. 生态学报, 2001, 21(7): 1142-1147.
- [8] Sadaka N, Ponge J F. Soil animal communities in holm oak forests: influence of horizon, altitude and year. European Journal of Soil Biology, 2003, 39(4): 197-207.
- [9] 薛润光, 杨少华. 丽江玉龙雪山自然保护区珍稀濒危植物资源的初步研究. 林业调查规划, 2006, 31(1): 50-53.
- [10] 冯建孟, 王襄平, 徐成东, 杨元合, 方精云. 玉龙雪山植物物种多样性和群落结构沿海拔梯度的分布格局. 山地学报, 2006, 24(1): 110-116.
- [11] 《云南植被》编写组. 云南植被. 北京: 科学出版社, 1987.
- [12] Song L, Ma W Z, Yao Y L, Liu W Y, Li S, Chen K, Lu H Z, Cao M, Sun Z H, Tan Z H, Nakamura A. Bole bryophyte diversity and distribution patterns along three altitudinal gradients in Yunnan, China. Journal of Vegetation Science, 2015, 26(3): 576-587.
- [13] Liu W Y, Fox J E D, Xu Z F. Leaf litter decomposition of canopy trees, bamboo and moss in a montane moist evergreen broad-leaved forest on Ailao Mountain, Yunnan, south-west China. Ecological Research, 2000, 15(4): 435-447.
- [14] 杨国平, 郑征, 张一平, 刘玉洪, 巩合德, 鲁志云. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林群落生态学特征. 东北林业大学学报, 2010, 38(9): 16-19.
- [15] 李洁琼, 宋晓阳, 曹敏. 云南哀牢山和玉龙雪山森林树种幼苗对海拔梯度的响应及其季节性差异. 应用生态学报, 2016, 27(11): 3403-3412.
- [16] 兰国玉, 胡跃华, 曹敏, 朱华, 王洪, 周仕顺, 邓晓保, 崔景云, 黄建国, 刘林云, 许海龙, 宋军平, 何有才. 西双版纳热带森林动态监测样地——树种组成与空间分布格局. 植物生态学报, 2008, 32(2): 287-298.
- [17] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [18] 尹文英. 中国亚热带土壤动物. 北京: 科学出版社, 1992.
- [19] 尹文英. 中国土壤动物. 北京: 科学出版社, 2000.
- [20] Margalef R. Perspectives in Ecological Theory. Chicago: University of Chicago Press, 1968.
- [21] Menhinick E F. A comparison of some species - individuals diversity indices applied to samples of field insects. Ecology, 1964, 45(4): 859-861.
- [22] Shannon C E, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana: The University of Illinois Press, 1949.
- [23] Simpson E H. Measurement of diversity. Nature, 1949, 163(4148): 688-688.
- [24] Pielou E C. The measurement of diversity in different types of biological collections. Journal of Theoretical Biology, 1966, 13: 131-144.
- [25] 何振, 赵琴, 李迪强, 李密. 八大公山土壤跳虫群落结构与多样性的季节动态. 林业科学研究, 2018, 31(3): 68-77.
- [26] Nijima K. Collembola of the subalpine coniferous forest of Kita-Yatsugatake volcano. Kontyû, 1966, 34(3): 244-247.
- [27] 宋晓阳. 云南典型森林林下幼苗的时空动态特征研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2017.
- [28] Ashton L A, Nakamura A, Burwell C J, Tang Y, Cao M, Whitaker T, Sun Z, Huang H, Kitching R L. Elevational sensitivity in an Asian 'hotspot': Moth diversity across elevational gradients in tropical, sub-tropical and sub-alpine China. Scientific Reports, 2016, 6: 26513.
- [29] 陈泮勤. 地球系统碳循环. 北京: 科学出版社, 2004.
- [30] 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. 生态学报, 2009, 29(6): 2938-2944.
- [31] 王邵军. 武夷山不同海拔土壤动物对凋落物分解的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2009.
- [32] Decaëns T. Macroecological patterns in soil communities. Global Ecology and Biogeography, 2010, 19(3): 287-302.
- [33] Viketof M, Sohlenius B, Boström S, Palmborg C, Bengtsson J, Berg M P, Huss-Danell K. Temporal dynamics of soil nematode communities in a grassland plant diversity experiment, Soil Biology and Biochemistry, 2011, 43(5): 1063-1070.
- [34] Doblas-Miranda E, Wardle D A, Peltzer D A, Yeates G W. Changes in the community structure and diversity of soil invertebrates across the Franz

Josef Glacier chronosequence. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(5): 1069–1081.

- [35] Xu, G. R., Lin, Y. H., Zhang, S., Zhang, Y. X., Li, G. X., Ma, K. M. Shifting mechanisms of elevational diversity and biomass patterns in soil invertebrates at treeline. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 113, 80 – 88.
- [36] Xu, G. R., Zhang, S., Zhang, Y. X., Ma, K. M. Environmental correlates underlying elevational richness, abundance, and biomass patterns of multi-feeding guilds in litter invertebrates across the treeline. *Science of The Total Environment*, 2018, 633, 529–538.
- [37] Potapov A. M., Scheu S., Tiunov A. V. Trophic consistency of supraspecific taxa in below-ground invertebrate communities: Comparison across lineages and taxonomic ranks. *Functional Ecology*, 2019, 33(6): 1172–1183.
- [38] Ponge J. F., Salmon S. Spatial and taxonomic correlates of species and species trait assemblages in soil invertebrate communities. *Pedobiologia*, 2013, 56(3): 129–136.

附表 1 中文名和拉丁名对照表

Subsidiary Table 1 Chinese and Latin names

科名 Family	科拉丁名 Family Latin Name	属名 Genera	属拉丁名 Genera Latin Name
长角蛱科	Entomobryidae	刺齿蛱属	<i>Homidia</i>
		鳞长蛱属	<i>Lepidocyrtus</i>
		裸长角蛱属	<i>Sinella</i>
球角蛱科	Hypogastruridae	球角蛱属	<i>Hypogastrura</i>
等节蛱科	Isotomidae	隐蛱属	<i>Cryptopygus</i>
		符蛱属	<i>Folsomia</i>
		裔符蛱属	<i>Folsomides</i>
		类符蛱属	<i>Folsomina</i>
		似等蛱属	<i>Isotomodes</i>
		陷等蛱属	<i>Isotomurus</i>
		近缺蛱属	<i>Paranurophorus</i>
		拟缺蛱属	<i>Pseudanurophorus</i>
		二刺蛱属	<i>Uzelia</i>
短角蛱科	Neelidae	短角蛱属	<i>Neelus</i>
疣蛱科	Neanuridae	疣蛱属	<i>Neanura</i>
		副蛱属	<i>Paranura</i>
		伪亚蛱属	<i>Pseudachorutes</i>
		沃蛱属	<i>Womersleya</i>
棘蛱科	Onychiuridae	棘蛱属	<i>Onychiurus</i>
		土蛱属	<i>Tullbergia</i>
长角长蛱科	Orchesellidae	长角长蛱属	<i>Orchesellides</i>
爪蛱科	Paronellidae	盐长蛱属	<i>Salina</i>
圆蛱科	Sminthuridae	齿棘圆蛱属	<i>Arrhopalites</i>
		异圆蛱属	<i>Heterosminthurus</i>
		小圆蛱属	<i>Sminthurinus</i>
		圆蛱属	<i>Sminthurus</i>
		球圆蛱属	<i>Sphaeridia</i>
		环角圆蛱属	<i>Ptenothrix</i>
鳞蛱科	Tomoceridae	鳞蛱属	<i>Tomocerus</i>