

# 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<sup>\*</sup>

杨 赵<sup>1,2</sup> 杨效东<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>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, 昆明 650223; <sup>2</sup>云南大学生态学与地植物学研究所, 昆明 650091)

**摘 要** 分别于 2005 年 4 月(干热季)、6 月(雨季)和 12 月(干冷季), 采用样线法对哀牢山中山湿性常绿阔叶林、山顶苔藓矮林和滇山杨次生林地表凋落物及其中的土壤节肢动物群落进行了调查。结果表明: 凋落物现存总量、C 储量和 C/N 在干、湿季均表现为苔藓矮林>滇山杨林>常绿阔叶林, N 储量差异不大。蜱螨目和弹尾目是 3 林地凋落物层节肢动物群落的优势类群, 双翅目幼虫、鞘翅目、蚁类和同翅目为常见类群, 3 林地凋落物层土壤节肢动物群落相似性系数极高。3 林地凋落物层土壤节肢动物群落密度(ind·m<sup>-2</sup>)没有显著差异, 但相对密度(ind·g<sup>-1</sup>)呈现出常绿阔叶林和滇山杨林显著高于苔藓矮林; 土壤节肢动物密度季节变化呈现干季(4 月和 12 月)显著高于雨季(6 月), 群落香农多样性指数差异不显著。干热季(4 月)3 林地枯枝落叶现存量与其土壤节肢动物群落和主要类群密度呈显著正相关关系, 而在干冷季(12 月)凋落物总现存量与其土壤节肢动物群落及蜱螨目相对密度则呈显著负相关关系; 弹尾目和鞘翅目密度与地表凋落物层的 N 储量也有显著的正相关关系。哀牢山亚热带森林凋落物及其土壤节肢动物群落的发展与森林植被结构密切相关, 其群落个体数量和多样性受森林地表凋落物的调控, 但林内其他环境因素如温湿度对森林凋落物层土壤动物个体数的季节变动也有明显影响。

**关键词** 凋落物 土壤节肢动物 生物多样性 亚热带森林 哀牢山

**文章编号** 1001-9332(2011)11-3011-10 **中图分类号** Q145.2 **文献标识码** A

**Characteristics of floor litter and soil arthropod community in different types of subtropical forest in Ailao Mountain of Yunnan, Southwest China.** YANG Zhao<sup>1,2</sup>, YANG Xiao-dong<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Tropical Forestry Ecology, Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650223, China; <sup>2</sup>Institute of Ecology and Geobotany, Yunnan University, Kunming 650091, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(11): 3011–3020.

**Abstract:** By using line transect method, an investigation was conducted on the floor litter and soil arthropod community in a mid mountain wet evergreen broad-leaved forest, a mossy dwarf forest, and a *Populus bonatii* forest in Ailao Mountain of Yunnan in April (dry and hot season), June (rainy season), and December (dry and cold season), 2005. In both dry and rainy seasons, the existing floor litter mass, C storage, and C/N ratio in the three forests all increased in the order of mossy dwarf forest > *P. bonatii* forest > evergreen broad-leaved forest, but the N storage had less difference. In the floor litter layer of the forests, Acari and Collembola were the dominant groups of soil arthropod community, while Diptera larvae, Coleoptera, ants, and Homoptera were the common groups. The Sorenson coefficients of soil arthropod community in the three forests were extremely great. No significant differences were observed in the soil arthropod density (ind·m<sup>-2</sup>) in the floor litter layer among the three forests, but the relative density (ind·g<sup>-1</sup>) of soil arthropods was higher in the evergreen broad-leaved forest and *P. bonatii* forest than in the mossy dwarf forest. In the three forests, the density of soil arthropods was significantly higher in dry season than in rainy season, but the Shannon diversity index had less difference. There were significant positive correlations between the existing floor litter mass and the individual density (ind·m<sup>-2</sup>) and dominant

\* 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-413)和国家自然科学基金项目(40671103)资助。

\*\* 通讯作者。E-mail: yangxd@xtbg.ac.cn

2011-02-24 收稿, 2011-08-05 接受。

groups of soil arthropod communities in dry and hot season (April), but negative correlations between the existing floor litter mass and the relative density ( $\text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$ ) of soil arthropod communities and Acari in dry and cold season (December). The individual densities of Collembola and Coleoptera also had positive correlations with the N storage of the existing floor litter mass in the three forests. It was considered that the floor litter and the development of soil arthropod community in the litter layer of the subtropical forests in Ailao Mountain had a close relation with the vegetation structure of the forests, and the individual density and the diversity of the soil arthropod community were controlled by the floor litter, whereas the environmental factors such as temperature and moisture in the forests also had obvious effects on the seasonal dynamics of the individual density of the soil arthropods.

**Key words:** litter; soil arthropod; biodiversity; subtropical forest; Ailao Mountain.

地上与地下生物间的物质和能量循环是维持森林生态系统的重要生态过程<sup>[1]</sup>,植物群落的物种多样性、凋落物质量与地下分解者群落间的相互关系是影响这一生态过程的重要因素,但少有研究给予关注<sup>[2-3]</sup>.同一气候带地区,因地形和植物群落演替形成了不同植被类型森林生态系统,其地上植物凋落物数量和质量差异将直接影响以其为栖息生境和物质能量来源的土壤生物群落结构和功能<sup>[4]</sup>,进而对凋落物分解和系统养分循环产生影响,最终反馈至植物的生长和群落演替过程<sup>[5-6]</sup>.

土壤动物是地下分解者食物网的重要组成部分,对土壤结构和理化性质、土壤微生物生长和酶活性,以及地下生物网结构及功能具有调控作用,同时也是分解、矿化等生态过程的主要调节者和媒介<sup>[7-10]</sup>,对其群落结构和多样性特征与地上凋落物的关系进行研究将有重要意义.

广泛分布于哀牢山徐家坝地区的中山湿性常绿阔叶林是滇南常绿阔叶林的代表类型之一.已有较多的研究涉及了哀牢山植物群落结构、森林小气候及土壤养分状况,但对于土壤动物群落结构特征及其与森林凋落物的相关关系研究未见报道.本研究以哀牢山徐家坝地区分布于海拔 2200~2600 m 的原生中山湿性常绿阔叶林、次生性滇山杨林和海拔 2600 m 以上的山顶原生苔藓矮林作为研究生境,通过对林地森林凋落物和土壤节肢动物群落的调查,拟回答以下问题:1) 同一气候环境尺度下的不同植被类型阔叶林凋落物数量(地表现存量)和质量(C、N 含量)有何差异?2) 同一气候环境尺度下的不同植被类型阔叶林凋落物土壤动物群落组成和分布格局是否有差异?3) 亚热带中山常绿阔叶林土壤节肢动物群落与森林凋落物数量和质量的相关关系及可能的影响因素是什么?研究结果将为进一步深入探讨森林生态过程积累资料和奠定基础.

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究地位于云南省景东县哀牢山国家级自然保护区,是云贵高原、横断山脉和青藏高原三大自然地理区域的接合部,是中亚热带气候与南亚热带气候的南北过渡地区,也是生物多样性较丰富及植物区系地理成分荟萃之地.研究区地理位置为  $24^{\circ}32' \text{N}$ ,  $101^{\circ}01' \text{E}$ ,海拔 2600~2700 m,气候主要由冬季的北风和夏季的西南季风控制,属中山湿性气候,干湿两季交替分明.年均气温  $11.3^{\circ}\text{C}$ ,最热月均温  $15.4^{\circ}\text{C}$ (8月),最冷月均温  $5.4^{\circ}\text{C}$ (1月).年均降水量 1931.9 mm,其中 85% 的降水集中在雨季(5—10月).地带性植被为中山湿性常绿阔叶林和山顶苔藓矮林,土壤为山地黄棕壤<sup>[11]</sup>.

在位于自然保护区核心区的中国科学院哀牢山亚热带森林生态系统研究站长期固定样地(中国生态系统研究网络——CERN 样地)分别选取具有代表性的中山湿性常绿阔叶林、山顶苔藓矮林和滇山杨林作为研究样地.中山湿性常绿阔叶林(evergreen broad-leaved forest,EBF)是哀牢山徐家坝地区面积最大、保存最完整的原生性植被,约占该地区植被总面积的 77.9%.群落垂直分层明显,乔木层高 20~25 m,平均盖度 95%,优势树种为木果石栎(*Lithocarpus xylocarpus*)、景东石栎(*L. chintungensis*)、腾冲栲(*Castanopsis wattii*)、滇木荷(*Schima noronhae*)、绿叶润楠(*Machilus viridis*)、红花木莲(*Manglietia insignis*)和舟柄茶(*Hartia sinensis*)等,林内生境潮湿,层间植物(附生植物、藤本植物和寄生植物)丰富<sup>[11]</sup>.

山顶苔藓矮林(mossy dwarf forest,MDF)分布于该地区海拔 2600 m 以上山顶和山脊,群落乔木层高 5~7 m,以倒卵叶石栎(*Lithocarpus pachphylloides*)、景东石栎、露珠杜鹃(*Rhododendron irroratum*)、珍珠

花( *Lyonia ovalifolia* ) 和米饭树( *Vaccinium duclouxii* ) 为主, 平均盖度达 85%<sup>[1]</sup>。

滇山杨林( *Populus bonatii* forest, PBF) 是中山湿性常绿阔叶林遭砍伐、火烧后形成的先锋树种组成的次生落叶阔叶混交林。群落乔木层高 15 ~ 20 m, 以滇山杨为主, 伴生种有木果石栎、景东石栎和滇木荷等, 盖度达 80% 以上<sup>[1]</sup>。

## 1.2 研究方法

**1.2.1 土壤节肢动物取样** 2005 年 4、6 和 12 月在所选 3 个植被类型的固定观测样地( 1 hm<sup>2</sup> ), 沿外围周长( 中山湿性常绿阔叶林样地每隔 80 m、其他两种林型样地每隔 30 m ) 分别设置 5 个 1 m×1 m 的样方。在每个样方内按对角线用 10 cm×10 cm 取样框收集 2 个地表层枯枝落叶( 未分解) 和腐殖质样品。采用手拣法先将每个枯枝落叶和腐殖质样品中的大型土壤节肢动物拣出, 然后将样品带回实验室用 Tullgren 法( 干漏斗法) 分离提取其中的中小型土壤节肢动物( 40 W 白炽灯, 96 h )。土壤节肢动物的分类鉴定依据《中国亚热带土壤动物》<sup>[2]</sup> 和《中国土壤动物检索图鉴》<sup>[3]</sup>, 分至大类群单位( 目 )。

**1.2.2 凋落物处理** 将分离出土壤节肢动物的枯枝落叶和腐殖质在 70 °C 下烘干并称量, 然后分别将 4、12 月在同一样方( 1 m×1 m ) 获取的两个凋落物样品混合, 交中国科学院西双版纳热带植物园生物地球化学实验室, 用 Vario MAX CN 碳氮分析仪( Elementar Analysensysteme GmbH, Germany ) 分别测定枯枝落叶和腐殖质的 C、N 含量。

**1.2.3 数据处理** 将每一样方中获取的枯枝落叶和腐殖质干质量换算为现存量( g·m<sup>-2</sup> )。土壤节肢动物各类群相对多度以某一类群个体数占群落个体总

数的百分比表示: 10% 以上为优势类群, 1% ~ 10% 为常见类群, 1% 以下为稀有类群。个体数量用密度( ind·m<sup>-2</sup> ) 和相对密度( ind·g<sup>-1</sup> )<sup>[4]</sup> 计算, 其中相对密度由每个样品中获取的土壤节肢动物个体数/样品凋落物干质量得出。根据以下公式计算土壤节肢动物群落各多样性指数:

1) Shannon 多样性指数(  $H'$  )<sup>[5]</sup>:

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

式中:  $P_i = N_i/N$ ,  $N_i$  为第  $i$  类群的个体数;  $N$  为群落总个体数。

2) Pielou 均匀度指数(  $E$  )<sup>[6]</sup>:

$$E = H' / \ln S$$

式中:  $S$  为群落类群数。

3) Sorensen 相似性系数(  $S$  )<sup>[6]</sup>

$$S = 2j / (a + b)$$

式中:  $j$  为两个群落中共有的类群;  $a$  和  $b$  分别为群落 A 和群落 B 的类群数。0 <  $S$  < 0.25 为极不相似, 0.25 ≤  $S$  < 0.5 为中等不相似, 0.5 ≤  $S$  < 0.75 为中等相似, 0.75 ≤  $S$  < 1.0 为极为相似。

所有数据统计分析均在 SPSS 13.0 软件下完成。对凋落物和土壤动物各指标进行 ANOVA 分析, 月份间和林地间多重比较采用 LSD 法, 相同林地、不同凋落物层采用成对  $t$  检验。对 3 林地凋落物现存量与其相应的土壤节肢动物个体数量进行相关分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 林地地表凋落物数量和质量特征

由表 1 可以看出, 不同季节地表枯枝落叶和腐殖质现存总量都表现为苔藓矮林 > 滇山杨林 > 常绿

表 1 3 林地地表凋落物和腐殖质现存量

Table 1 Existing mass of floor litter and humus in the three forests ( mean±SE, g·m<sup>-2</sup> )

| 月份 Month | 项目 Item           | EBF             | MDF            | PBF             |
|----------|-------------------|-----------------|----------------|-----------------|
| 4        | 枯枝落叶 Floor litter | 1577.9±1104.4Aa | 1607.8±186.0Aa | 1733.4±99.3Aa   |
|          | 腐殖质 Humus         | 3925.0±325.7Aa  | 6621.1±666.4Ab | 5232.7±641.8Aab |
|          | 总计 Total          | 5502.9±299.7Aa  | 8228.9±631.5Ab | 6966.1±666.3Aab |
| 6        | 枯枝落叶 Floor litter | 1499.4±110.9Aa  | 1660.1±104.4Aa | 1634.1±139.7ABa |
|          | 腐殖质 Humus         | 5528.2±243.9Ba  | 7963.2±722.4Ab | 6317.4±542.8Aa  |
|          | 总计 Total          | 7027.6±279.8Ba  | 9623.3±763.1Ab | 7951.5±539.2Aa  |
| 12       | 枯枝落叶 Floor litter | 1016.3±117.8Ba  | 1937.9±99.3Ab  | 1307.3±178.7Ba  |
|          | 腐殖质 Humus         | 2875.4±177.2Ca  | 6871.8±393.3Ab | 3497.9±271.9Ba  |
|          | 总计 Total          | 3891.7±179.0Ca  | 8809.7±442.7Ab | 4805.2±340.1Ba  |

EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest; MDF: 苔藓矮林 Mossy dwarf forest; PBF: 滇山杨林 *Populus bonatii* forest. 同列不同大写字母表示凋落物在同一林地不同月份间差异显著, 同行不同小写字母表示同月份凋落物在不同林地间差异显著(  $P < 0.05$  ) Different capital letters in the same column indicated significant difference among the different months in the same forest, and different small letters in the same row indicated significant difference among the different forests in the same month at 0.05 level. 下同 The same below.

表 2 3 林地地表凋落物 C、N 含量及储量

Table 2 C and N content and storage of floor litter in the three forests (mean±SE)

| 月份<br>Month |     | EBF                                    |                                       | MDF                                    |                                       | PBF                                    |                                       |
|-------------|-----|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------------------|
|             |     | 含量<br>Content<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 储量<br>Storage<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 含量<br>Content<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 储量<br>Storage<br>(g·m <sup>-2</sup> ) | 含量<br>Content<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) | 储量<br>Storage<br>(g·m <sup>-2</sup> ) |
| 4           | C   | 334.4±26.6Aab                          | 1813.1±82.5Aa                         | 407.3±29.6Aa                           | 3325.3±347.5Ab                        | 262.0±49.8Ab                           | 1833.0±363.4Aa                        |
|             | N   | 17.0±1.0Aa                             | 93.1±6.4Aa                            | 15.9±0.4Aa                             | 130.9±12.2Aa                          | 13.8±2.9Aa                             | 96.7±20.6Aa                           |
|             | C/N | 19.7±1.0Aa                             |                                       | 25.7±2.2Ab                             |                                       | 20.3±1.7Aa                             |                                       |
| 12          | C   | 331.4±31.5Aa                           | 1285.4±125.1Ba                        | 413.4±28.7Ab                           | 3649.9±322.4Ac                        | 431.7±15.2Bb                           | 2073.5±163.9Ab                        |
|             | N   | 16.8±0.9Aa                             | 65.2±3.7Ba                            | 15.8±1.1Aa                             | 138.5±10.5Ab                          | 16.1±0.5Aa                             | 83.2±9.7Aa                            |
|             | C/N | 19.6±1.0Aa                             |                                       | 26.3±1.1Ab                             |                                       | 27.0±1.8Bb                             |                                       |

阔叶林,且各林地均以雨季 6 月最高,干季 12 月最低,其中常绿阔叶林和滇山杨林的季节差异显著,而苔藓矮林在 3 个季节无显著差异。

由于该地区中山湿性常绿阔叶林在一年中有两个凋落高峰,分别是干季的 4—5 月和初冬的 10—11 月<sup>[1]</sup>,本研究对两个凋落高峰期间(4 和 12 月)所获取的地表残留物样品进行 C、N 分析,比较各林地地表凋落物中的 C、N 含量和储量。由表 2 可以看出,常绿阔叶林凋落物的 C 和 N 储量均表现为 4 月显著高于 12 月(C 储量:  $t=3.522, P<0.05$ ; N 储量:  $t=3.758, P<0.05$ ),滇山杨林凋落物 C 含量表现为 12 月显著高于 4 月( $t=-3.262, P<0.05$ ),其他无显著季节差异。4 月苔藓矮林凋落物的 C 含量在 3 林地中最高,而 12 月则以滇山杨林最高。凋落物 C 储量在 4 和 12 月都表现为苔藓矮林>滇山杨林>常绿阔叶林。3 林地凋落物 N 含量和 N 储量差异不大, C/N 比以常绿阔叶林最低。

## 2.2 凋落物层土壤节肢动物群落组成

3 林地地表枯枝落叶层和腐殖质层中共获取土壤节肢动物 40059 头,隶属 6 纲 22 个类群(目)。苔藓矮林类群数最多(22 类),常绿阔叶林次之(21 类),滇山杨林最少(20 类)。土壤节肢动物群落优势类群均为蜱螨目和弹尾目,二者占群落总数的 90% 以上,构成所调查哀牢山 3 类亚热带森林凋落物层土壤节肢动物群落的主体,并且蜱螨目绝对数量和相对多度远高于弹尾目,其优势度最为显著。双翅目幼虫、鞘翅目和膜翅目蚁类在常绿阔叶林中为常见类群,而苔藓矮林中以双翅目幼虫、鞘翅目和同翅目为常见类群,滇山杨林中鞘翅目和双翅目幼虫较为常见,其余类群在 3 林地仅为稀有类群。

3 林地凋落物层土壤节肢动物群落相似性系数( $S$ ) 在 0.93~0.98 之间,表明其群落结构极为相似,并以苔藓矮林和常绿阔叶林的相似程度最高(0.98)。

同一土壤节肢动物类群在不同林地的相对多度有所差异,如蜱螨目在 3 林地的相对多度表现为滇山杨林>常绿阔叶林>苔藓矮林,弹尾目为苔藓矮林>滇山杨林>常绿阔叶林。膜翅目蚁类在常绿阔叶林中分布相对较多,而在其他两类林地中较少;同翅目在苔藓矮林具有较高的相对多度(表 3)。

## 2.3 凋落物层土壤节肢动物群落个体数量的水平分布

凋落物层土壤节肢动物群落总体及优势类群蜱螨目和弹尾目密度(ind·m<sup>-1</sup>) 在林地间差异不显著,但常见类群双翅目幼虫和膜翅目蚁类密度以常绿阔叶林最高,鞘翅目和同翅目则在苔藓矮林中最高(表 3)。

土壤节肢动物相对密度(ind·g<sup>-1</sup>) 是反映单位质量凋落物中土壤动物个体数的指标。常绿阔叶林和滇山杨林凋落物中土壤节肢动物相对密度显著高于苔藓矮林( $F_{2,87}=5.703, P<0.05$ )。优势类群蜱螨目和弹尾目、常见类群双翅目幼虫和膜翅目蚂蚁的相对密度在 3 林地排列次序为常绿阔叶林>滇山杨林>苔藓矮林,且差异显著。其中,蜱螨目:  $F_{2,87}=4.821, P<0.05$ ; 弹尾目:  $F_{2,87}=3.217, P<0.05$ ; 双翅目幼虫:  $F_{2,87}=14.475, P<0.05$ ; 蚂蚁:  $F_{2,87}=3.804, P<0.05$ (表 3)。

## 2.4 凋落物层土壤节肢动物群落个体数量的垂直分布

图 1 显示,3 林地土壤节肢动物密度在凋落物层间的垂直分布具有季节差异。就土壤节肢动物群落密度而言,常绿阔叶林在干季 12 月表现为腐殖质层高于枯枝落叶层( $t=-2.226, P<0.05$ ),而雨季 6 月则相反( $t=2.324, P<0.05$ ),干季 4 月差异不显著。苔藓矮林各季节总体上呈现出腐殖质层土壤节肢动物密度高于枯枝落叶层,但均无显著差异。滇山杨林动物密度在干季(12 月和 4 月)表现为腐殖质层高于枯枝落叶层,其中 4 月差异显著( $t=2.115$ ,

表 3 3 林地地表凋落物土壤节肢动物群落组成  
Table 3 Community composition of soil arthropods in the floor litter of three forests ( mean±SE, n=90)

| 类群<br>Group                 | EBF                             |                                 |             | MDF                             |                                 |             | PBF                             |                                 |             |
|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------|
|                             | ID<br>( ind • m <sup>-2</sup> ) | RD<br>( ind • g <sup>-1</sup> ) | RA<br>( % ) | ID<br>( ind • m <sup>-2</sup> ) | RD<br>( ind • g <sup>-1</sup> ) | RA<br>( % ) | ID<br>( ind • m <sup>-2</sup> ) | RD<br>( ind • g <sup>-1</sup> ) | RA<br>( % ) |
| 蜱螨目<br>Acari                | 34140. 0±3873. 2a               | 7. 295±1. 034a                  | 75. 21      | 30463. 3±4192. 0a               | 3. 529±0. 474b                  | 72. 07      | 35526. 7±5081. 3a               | 6. 384±1. 045a                  | 77. 45      |
| 弹尾目<br>Collembola           | 6976. 7±647. 7a                 | 1. 386±0. 140a                  | 15. 37      | 8030. 0±1127. 0a                | 0. 930±0. 126b                  | 19. 00      | 7650. 0±1073. 8a                | 1. 200±0. 155ab                 | 16. 68      |
| 双翅目幼虫<br>Diptera larvae     | 1480. 0±253. 8a                 | 0. 327±0. 065a                  | 3. 26       | 456. 7±85. 7b                   | 0. 054±0. 011b                  | 1. 08       | 520. 0±78. 6b                   | 0. 093±0. 015b                  | 1. 13       |
| 鞘翅目<br>Coleoptera           | 720. 0±72. 1a                   | 0. 148±0. 020a                  | 1. 59       | 1163. 3±116b                    | 0. 135±0. 013a                  | 2. 75       | 746. 7±89. 5a                   | 0. 126±0. 016a                  | 1. 63       |
| 蚁类<br>Ants                  | 580. 0±181. 4a                  | 0. 142±0. 056a                  | 1. 28       | 160. 0±53. 7b                   | 0. 018±0. 006b                  | 0. 38       | 293. 3±89. 9ab                  | 0. 048±0. 014b                  | 0. 64       |
| 同翅目<br>Homoptera            | 353. 3±80. 9a                   | 0. 082±0. 022a                  | 0. 78       | 836. 7±376. 2a                  | 0. 084±0. 035a                  | 1. 98       | 190. 0±104. 2a                  | 0. 031±0. 017a                  | 0. 41       |
| 马陆目<br>Sphaerotheriida      | 306. 7±197. 6a                  | 0. 046±0. 025a                  | 0. 68       | 110. 0±28. 5a                   | 0. 012±0. 003a                  | 0. 26       | 80. 0±21. 1a                    | 0. 014±0. 004a                  | 0. 17       |
| 蜘蛛目<br>Aranene              | 256. 7±52. 2a                   | 0. 052±0. 010a                  | 0. 57       | 140. 0±29. 8b                   | 0. 017±0. 004b                  | 0. 33       | 150. 0±25. 7b                   | 0. 025±0. 004b                  | 0. 33       |
| 结合目<br>Symphyia             | 133. 3±21. 6a                   | 0. 028±0. 005a                  | 0. 29       | 210. 0±74. 5a                   | 0. 024±0. 008b                  | 0. 50       | 113. 3±21. 8a                   | 0. 019±0. 004b                  | 0. 25       |
| 拟蝎目<br>Pseudoscorpiones     | 80. 0±26. 9a                    | 0. 017±0. 006a                  | 0. 18       | 50. 0±15. 0ab                   | 0. 005±0. 002b                  | 0. 12       | 13. 3±6. 3b                     | 0. 003±0. 001b                  | 0. 03       |
| 缨翅目<br>Thysanoptera         | 66. 7±31. 2a                    | 0. 014±0. 007a                  | 0. 15       | 6. 7±4. 6a                      | 0. 001±0. 000b                  | 0. 02       | 56. 7±31. 0a                    | 0. 008±0. 005ab                 | 0. 12       |
| 鳞翅目幼虫<br>Lepidoptera larvae | 56. 7±14. 9a                    | 0. 012±0. 004a                  | 0. 12       | 53. 3±19. 6a                    | 0. 007±0. 002a                  | 0. 13       | 70. 0±16. 7a                    | 0. 012±0. 003a                  | 0. 15       |
| 石蛾虫目<br>Lithobiomorpha      | 56. 7±20. 2a                    | 0. 013±0. 005a                  | 0. 12       | 200. 0±37. 4b                   | 0. 023±0. 005a                  | 0. 47       | 93. 3±19. 7a                    | 0. 015±0. 003a                  | 0. 20       |
| 其他膜翅目<br>Other Hymenoptera  | 43. 3±11. 4a                    | 0. 010±0. 003a                  | 0. 10       | 13. 3±6. 3b                     | 0. 001±0. 001b                  | 0. 03       | 36. 7±10. 2ab                   | 0. 006±0. 002ab                 | 0. 08       |
| 地蜈蚣目<br>Geophilomorpha      | 43. 3±10. 4a                    | 0. 009±0. 002a                  | 0. 10       | 200. 0±36. 2b                   | 0. 025±0. 005b                  | 0. 47       | 236. 7±43. 0b                   | 0. 039±0. 007b                  | 0. 52       |
| 双尾目<br>Diplura              | 20. 0±13. 9a                    | 0. 005±0. 004a                  | 0. 06       | 46. 7±14. 2a                    | 0. 006±0. 002a                  | 0. 04       | 16. 7±6. 9a                     | 0. 002±0. 001a                  | 0. 10       |
| 半翅目<br>Hemiptera            | 23. 3±11. 4a                    | 0. 004±0. 002a                  | 0. 05       | 36. 7±17. 6a                    | 0. 004±0. 002a                  | 0. 09       | 16. 7±8. 4a                     | 0. 003±0. 002a                  | 0. 04       |
| 啮虫目<br>Psocoptera           | 26. 7±9. 5a                     | 0. 007±0. 002a                  | 0. 04       | 16. 7±6. 9a                     | 0. 002±0. 001a                  | 0. 11       | 46. 7±19. 0a                    | 0. 008±0. 003a                  | 0. 04       |
| 原尾目<br>Protura              | 13. 3±7. 9a                     | 0. 003±0. 002a                  | 0. 03       | 53. 3±20. 2b                    | 0. 006±0. 003a                  | 0. 13       | 10. 0±7. 4a                     | 0. 002±0. 001a                  | 0. 02       |
| 毛翅目幼虫<br>Trichoptera larvae | 10. 0±5. 6a                     | 0. 002±0. 001a                  | 0. 02       | 3. 3±3. 3a                      | 0. 000±0. 000a                  | 0. 01       | —                               | —                               | —           |
| 蜈蚣目<br>Scolopendromorpha    | 3. 3±3. 3a                      | 0. 001±0. 001a                  | 0. 01       | 3. 3±3. 3a                      | 0. 000±0. 000a                  | 0. 01       | —                               | —                               | —           |
| 等足目<br>Isopoda              | —                               | —                               | —           | 16. 7±6. 9a                     | 0. 002±0. 001a                  | 0. 04       | 3. 3±3. 3b                      | 0. 001±0. 001a                  | 0. 01       |
| 总计 Total                    | 45390. 0±4423. 9a               | 9. 602±1. 207a                  |             | 42270. 0±5030. 6a               | 4. 885±0. 566b                  |             | 45870. 0±5617. 4a               | 8. 039±1. 145a                  |             |

ID: 密度 Individual density; RD: 相对密度 Relative density; RA: 相对多度 Relative abundance. 同行不同小写字母表示林间差异显著 ( P<0. 05)  
Different small letters in the same row indicated significant difference among the three forests at 0. 05 level.

P<0. 05), 而雨季则无明显的垂直分布差异. 凋落物层土壤节肢动物优势类群蜱螨目和弹尾目的垂直分布有所不同, 蜱螨目密度的垂直分布与群落总体一致, 而弹尾目表现为腐殖质层高于枯枝落叶层. 对于土壤节肢动物相对密度, 干季和雨季的弹尾目、蜱螨目和土壤节肢动物群落均表现为枯枝落叶层显著高于腐殖质层( 图 1) .

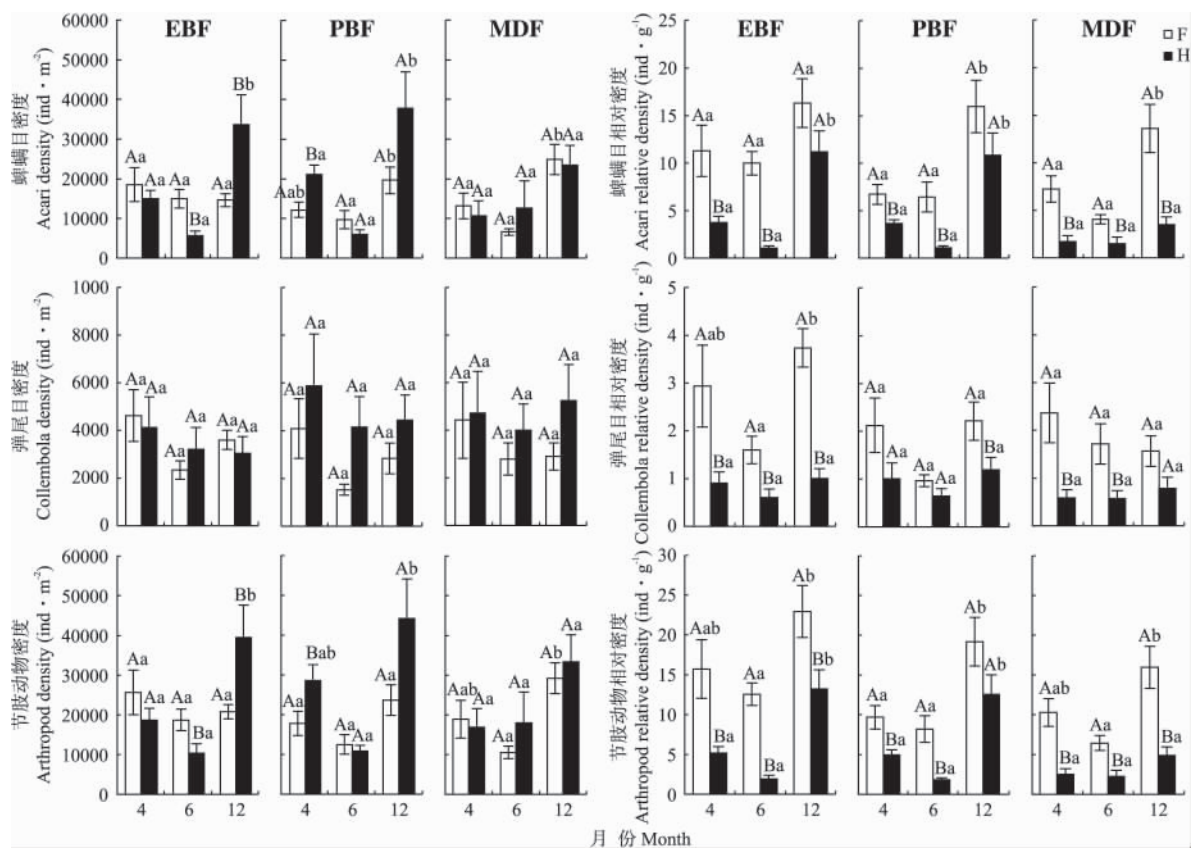
2. 5 凋落物层土壤节肢动物群落个体数量的季节分布

枯枝落叶层、腐殖质层的土壤节肢动物群落总

体及优势类群蜱螨目和弹尾目的密度和相对密度在 3 林地都表现为干季( 4 和 12 月) 高于雨季( 6 月) , 其中蜱螨目密度表现为 12 月>4 月>6 月, 弹尾目则表现为 4 月>12 月>6 月( 图 1) .

2. 6 凋落物层土壤节肢动物群落多样性比较

表 4 显示, 3 林地凋落物层土壤节肢动物群落的各多样性指数无显著差异, 总体上呈现为苔藓矮林和常绿阔叶林略高于滇山杨林. 不同林地凋落物层土壤节肢动物群落多样性和均匀性指数的季节变化有所不同, 表现出干季 12 月最低, 雨季 6 月最高.



**图 1 土壤节肢动物和优势类群密度的垂直分布**  
**Fig.1** Vertical distribution of density of soil arthropods and dominant groups ( mean±SE,  $n=10$  ).  
EBF: 常绿阔叶林 Evergreen broad-leaved forest; MDF: 苔藓矮林 Mossy dwarf forest; PBF: 滇山杨林 *Populus bonatii* forest. F: 枯枝落叶层 Floor litter layer; H: 腐殖质层 Humus layer. 不同大写字母表示同一林地内不同层次间差异显著, 不同小写字母表示同一层次不同月份间差异显著(  $P<0.05$  ) Different capital letters indicated significant difference between layers in the same forest, different small letters indicated significant difference among months in the same layer at 0.05 level.

**表 4 3 林地凋落物层土壤节肢动物群落多样性指数**  
**Table 4** Diversity indices of soil arthropod community in the floor litter of three forests ( mean±SE,  $n=10$  )

| 项目<br>Item                               | 月份<br>Month | EBF         | MDF          | PBF          |
|------------------------------------------|-------------|-------------|--------------|--------------|
| 类群数<br>Groups                            | 4           | 20          | 21           | 18           |
|                                          | 6           | 17          | 19           | 17           |
|                                          | 12          | 18          | 19           | 19           |
|                                          | 总计 Total    | 21          | 22           | 20           |
| Shannon 多样性指数<br>Shannon diversity index | 4           | 0.95±0.04Aa | 0.86±0.02Aab | 0.81±0.05ABb |
|                                          | 6           | 0.90±0.06Aa | 1.03±0.08Ba  | 0.91±0.06Aa  |
|                                          | 12          | 0.84±0.22Aa | 0.85±0.14Aa  | 0.65±0.27Ba  |
| Pielou 均匀度指数<br>Pielou evenness index    | 4           | 0.41±0.02Aa | 0.42±0.03ABa | 0.34±0.02ABb |
|                                          | 6           | 0.41±0.02Aa | 0.46±0.04Aa  | 0.41±0.02Aa  |
|                                          | 12          | 0.35±0.11Aa | 0.34±0.05Ba  | 0.29±0.13Ba  |

2.7 凋落物数量和质量与土壤节肢动物群落的相关关系

为进一步分析哀牢山 3 类森林凋落物层中土壤节肢动物个体数量与林地地表残留物数量 ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ ) 的关系,分别就不同季节 3 林地地表枯枝落叶和腐殖质现存量与其中的土壤节肢动物密度

(  $\text{ind} \cdot \text{m}^{-2}$  ) 和相对密度(  $\text{ind} \cdot \text{g}^{-1}$  ) 进行相关分析 ( 表 5 ) . 结果表明:4 月,3 林地枯枝落叶层土壤节肢动物群落及主要类群的密度与枯枝落叶数量呈显著正相关关系(  $P<0.05$  ),马陆目的相对密度与枯枝落叶数量也呈现显著的正相关关系(  $P<0.05$  ) . 6 月,不同凋落物层中土壤节肢动物及主要类群密度和相



表 5 凋落物土壤节肢动物主要类群密度与地表凋落物现存量的相关系数  
Table 5 Correlation coefficients between density of major soil arthropod groups and litter biomass (n=30)

| 项目<br>Item                     | 4 月 April            |              | 6 月 June             |              | 12 月 December        |              |
|--------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
|                                | 枯枝落叶<br>Floor litter | 腐殖质<br>Humus | 枯枝落叶<br>Floor litter | 腐殖质<br>Humus | 枯枝落叶<br>Floor litter | 腐殖质<br>Humus |
| 土壤节肢动物总数 Total soil arthropods | 0.517 **             | -0.084       | 0.098                | 0.247        | 0.222                | 0.006        |
| 蜱螨目 Acari                      | 0.457 *              | -0.256       | 0.070                | 0.270        | 0.259                | -0.108       |
| 弹尾目 Collembola                 | 0.494 **             | 0.242        | 0.146                | 0.028        | 0.042                | 0.332        |
| 蚁类 Ants                        | 0.377 *              | -0.283       | -0.004               | -0.180       | -0.122               | -0.212       |
| 马陆目 Sphaerotheriida            | 0.636 **             | 0.082        | 0.067                | -0.032       | 0.217                | -0.077       |

\* P<0.05; \*\* P<0.01. 下同 The same below.

表 6 土壤节肢动物主要类群相对密度与地表凋落物现存量的相关系数  
Table 6 Correlation coefficients between relative density of major soil arthropod groups and litter biomass (n=30)

| 项目<br>Item                     | 4 月 April            |              | 6 月 June             |              | 12 月 December        |              |
|--------------------------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|----------------------|--------------|
|                                | 枯枝落叶<br>Floor litter | 腐殖质<br>Humus | 枯枝落叶<br>Floor litter | 腐殖质<br>Humus | 枯枝落叶<br>Floor litter | 腐殖质<br>Humus |
| 土壤节肢动物总数 Total soil arthropods | 0.054                | -0.523 **    | -0.327               | -0.056       | -0.557 **            | -0.433 *     |
| 蜱螨目 Acari                      | 0.021                | -0.584 **    | -0.296               | 0.039        | -0.454 *             | -0.444 *     |
| 弹尾目 Collembola                 | 0.100                | 0.001        | -0.172               | -0.208       | -0.548 **            | -0.102       |
| 蚁类 Ants                        | 0.352                | -0.380 *     | -0.074               | -0.284       | -0.141               | -0.261       |
| 马陆目 Sphaerotheriida            | 0.524 **             | -0.032       | -0.095               | -0.056       | 0.021                | -0.286       |

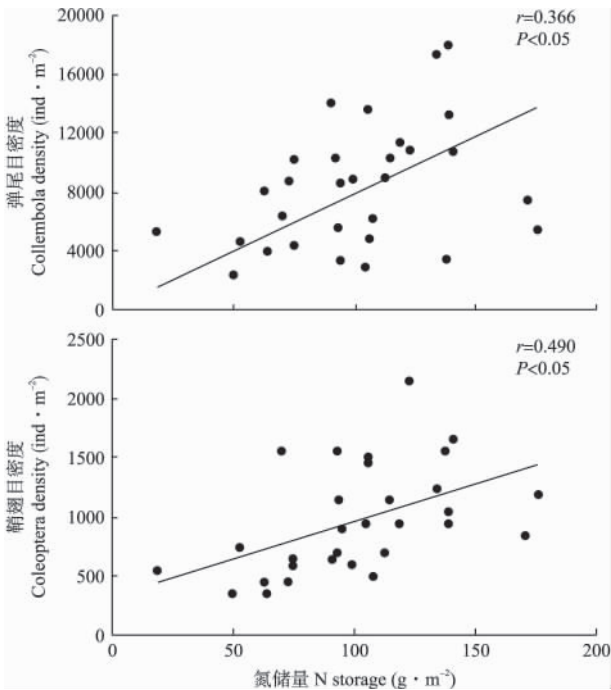


图 2 弹尾目和鞘翅目节肢动物密度与地表凋落物氮储量的相关关系  
Fig.2 Correlation between density of arthropods of Collembola and Coleoptera and N storage of litter (n=30).

对密度与凋落物现存量相关关系不显著; 12 月, 土壤节肢动物群落总数和蜱螨目相对密度与相应凋落物现存量则表现为显著的负相关关系 (P<0.05) (表 6)。

同时对 4 和 12 月的 3 林地凋落物土壤节肢动物群落总数、优势类群和常见类群的密度与地表凋

落物 N 储量进行相关分析, 结果只发现弹尾目和鞘翅目数量密度与地表凋落物层的 N 储量有显著的正相关关系 (弹尾目:  $r=0.366, P<0.05$ ; 鞘翅目:  $r=0.490, P<0.05$ ) (图 2)。

3 讨 论

Tian 等<sup>[7]</sup> 研究发现, 土壤动物群落结构组成与森林土壤及植被条件有关, 不同植被类型的森林有着与其凋落物相适应的土壤节肢动物群落。本研究所调查的 3 类森林地表土壤节肢动物群落类群组成相近 (相似性系数 S 在 0.93 ~ 0.98 之间), 蜱螨目和弹尾目为优势类群, 且蜱螨目数量多度和相对多度远高于弹尾目, 常见类群主要以双翅目幼虫、鞘翅目和膜翅目蚁类为主, 这与热带森林<sup>[13]</sup>、亚热带常绿阔叶林<sup>[19]</sup> 土壤动物群落组成特征相似。凋落物层土壤节肢动物群落密度及多样性在 3 种森林间无显著差异, 这与天童山常绿阔叶林和西双版纳热带森林土壤动物群落不同演替阶段林地的分布状况不同<sup>[20-21]</sup>。本研究中的 3 种森林均分布在同一山体, 林内小气候潮湿温凉, 并且滇山杨次生林也明显混生有成熟常绿阔叶林中的树种, 如绿叶润楠 (*Machilus viridis*)、南亚枇杷 (*Eriobotrya bengalensis*)、瓦山安息香 (*Symplocos botryantha*) 等, 处于演替发展的后期, 植被组成和结构与常绿阔叶林有相似之处<sup>[22]</sup>, 因此, 3 林地土壤节肢动物群落结构无明显差异的原因与其分布的地理位置、土壤条件和地上

植被组成结构相似有密切关系。

森林有机质的数量是影响土壤节肢动物群落数量分布的重要因素<sup>[23]</sup>。哀牢山 3 类林地的凋落物现存量(54.74 ~ 88.87 t · hm<sup>-2</sup>) 明显高于西双版纳热带季雨林(4.02 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[21]</sup>、海南尖峰岭热带山地雨林(5.9 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[24]</sup>、鼎湖山常绿阔叶林(3.50 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[25]</sup>、天童山常绿阔叶林<sup>[26]</sup>(10.45 t · hm<sup>-2</sup>) 以及东北针阔混交林(6.47 t · hm<sup>-2</sup>)<sup>[27]</sup>, 其相应分布的土壤节肢动物密度(42270 ± 5030 ~ 45870 ± 5617 ind · m<sup>-2</sup>) 比西双版纳季雨林(5654.0 ind · m<sup>-2</sup>)<sup>[21]</sup>、广东鼎湖山亚热带常绿阔叶林(39521 ind · m<sup>-2</sup>)<sup>[28]</sup>和东北针阔混交林(27520 ind · m<sup>-2</sup>)<sup>[29]</sup>高,但低于海南尖峰岭热带山地雨林(58000 ~ 10500 ind · m<sup>-2</sup>)<sup>[30]</sup>和天童山常绿阔叶林(65750 ± 10710 ind · m<sup>-2</sup>)<sup>[31]</sup>。

对西双版纳热带森林和北方针叶林的研究表明,土壤节肢动物群落密度与地表凋落物现存量具有正相关关系<sup>[21,27,32]</sup>。徐国良等<sup>[33]</sup>研究显示,鼎湖山 3 种常绿阔叶林地表节肢动物群落多样性与森林凋落物数量呈显著正相关,但与凋落物种类无相关性。张雪萍等<sup>[33]</sup>也认为,土壤动物的生物量与凋落物中未分解成分的生物量呈正相关,但与凋落物其他成分的现存量关系不明显。本研究表明,仅在干季 4 月,哀牢山 3 林地凋落物层土壤节肢动物群落总体和主要类群的密度与地表凋落物现存量有显著的正相关关系,而在 12 月呈现出群落相对密度与凋落物数量为负相关关系,雨季 6 月则无相关性。这一现象可能与哀牢山中山湿性常绿阔叶林长期低温和高湿度有密切关系。已有研究发现,土壤湿度对土壤动物群落的影响表现出雨季(负面)和干季(正面)明显不同<sup>[34]</sup>。本研究所查森林海拔均在 2200 m 以上,与其他不同纬度亚热带森林和同一纬度的西双版纳热带森林相比,其年均温较低(11.3 °C)、降水量偏高(1931.9 mm),森林凋落物分解速率较慢,地表残留物现存量极高(腐殖质平均厚达 5 ~ 7 cm),而凋落物的含水量与凋落物现存量呈显著的正相关关系<sup>[34]</sup>。研究表明,哀牢山中山湿性常绿阔叶林中枯枝落叶层和腐殖质层的饱和含水量在 270% 左右,成为主要的吸水层<sup>[35]</sup>。雨季(5—10 月)85% 以上的年降水量将导致其森林地表枯枝落叶层和腐殖质层的含水量与干季有极大的差异,已有数据显示哀牢山常绿阔叶林 6—10 月土壤含水量最高(60.1% ~ 68.4%),11 月—次年 1 月次之(55.0% ~ 60.1%),2—5 月较低(43.2% ~ 50.1%)<sup>[35]</sup>。因此,6 月该地

区森林凋落物层土壤节肢动物密度与凋落物残留量的相关关系可能被凋落物的高含水量影响。12 月为干冷季,凋落物层仍有较高的含水量,加上气温很低(5.4 °C 左右),导致单位质量凋落物中土壤节肢动物个体数量相对降低,土壤节肢动物相对密度与凋落物数量呈现负相关关系。由此也反映出,该地区雨季过高和干季适当的凋落物含水量使土壤节肢动物密度表现为雨季较低、干季较高的季节变化格局。此外,本研究同易兰和由文辉<sup>[31]</sup>的研究结果均表明,雨季腐殖质的土壤动物密度低于枯枝落叶层,干季则相反,说明哀牢山森林雨季腐殖质层含水量过高,抑制了土壤动物群落的发展,而干季腐殖质层的含水量则比枯枝落叶层更适合土壤动物生存。

森林凋落物层土壤节肢动物的数量密度分布不仅受凋落物数量的影响,更受凋落物质量(C、N)的控制。对波多黎各不同类型热带森林研究发现,在弱度分解凋落物中,马陆生物量与凋落物 N 含量呈显著正相关<sup>[36]</sup>。余广彬和杨效东<sup>[21]</sup>对西双版纳不同演替阶段热带森林的研究表明,<sup>23</sup> 年次生林和季雨林土壤节肢动物群落及优势类群密度与森林地表凋落物 N 储量存在极显著的正相关关系。本研究显示,哀牢山亚热带森林弹尾目和鞘翅目密度与地表凋落物层的 N 储量有显著的正相关关系,这与易兰和由文辉<sup>[31]</sup>在浙江天童山研究结果相似。凋落物作为土壤动物的直接或间接食物来源,其质量的优劣或限制性元素的含量直接影响土壤动物群落。如弹尾目主要取食植物凋落物<sup>[37]</sup>,而鞘翅目的大部分种类[金龟科(Scarabaeidae)的蛴螬类、叩甲科(Elaterridae)的金针虫类、象甲科(Curculionidae)的部分种类、叶甲科(Chrysomelidae)的多数种]为植食性<sup>[38]</sup>,因而高 N 储量的凋落物可能有利于较高数量的弹尾目和鞘翅目。

本研究仅从宏观层面初步探讨了哀牢山不同类型常绿阔叶林土壤节肢动物群落特征与地表凋落物数量(地表现存量)、质量(C、N)的相关关系,尚不能全面解释该地区影响土壤节肢动物群落结构和功能模式的调控机制,这有待进一步研究。同时,该地区特殊的气候导致凋落物含水量过高而影响了凋落物现存量与土壤节肢动物密度相互关系的现象,可能对凋落物分解和养分元素循环产生不同的影响,值得深入研究。

致谢 本研究野外工作得到中国科学院哀牢山森林生态系统定位研究站的大力支持,何坚在室内工作上给予了很大帮助,在此一并感谢。



## 参考文献

- [1] Wardle DA. Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2002
- [2] Cragg RG, Bardgett RD. How changes in soil faunal diversity and composition within a trophic group influence decomposition processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, **33**: 2073–2081
- [3] Partsch S, Milcu A, Scheu S. Decomposers (Lumbricidae, Collembola) affect plant performance in model grasslands of different diversity. *Ecology*, 2006, **87**: 2548–2558
- [4] Wardle DA, Yeates GW, Nicholson KS, *et al.* Response of soil microbial biomass dynamics, activity and plant litter decomposition to agricultural intensification over a seven-year period. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, **31**: 1707–1720
- [5] Bever JD. Feedback between plants and their soil communities in an old field community. *Ecology*, 1994, **75**: 1965–1977
- [6] Bever JD, Westover KM, Antonovics J. Incorporating the soil community into plant population dynamics: The utility of the feedback approach. *Journal of Ecology*, 1997, **85**: 561–573
- [7] Swift MJ, Heal OW, Anderson JM. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. London, UK: Blackwell, 1979
- [8] Seastedt TR. The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Annual Review of Entomology*, 1984, **29**: 25–46
- [9] Anderson JM. Succession, diversity and trophic relationships of some soil animals in decomposing leaf litter. *Journal of Animal Ecology*, 1975, **44**: 475–495
- [10] Benckiser G. Fauna in Soil Ecosystems: Recycling, Nutrient Fluxes, and Agricultural Production. New York: CRC, 1997
- [11] Qiu X-Z (邱学忠), Xie S-C (谢寿昌). Studies on the Forest Ecosystem in Ailao Mountains, Yunnan, China. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 1998 (in Chinese)
- [12] Yin W-Y (尹文英), Yang F-C (杨逢春), Wang Z-Z (王振中). Soil Arthropod of Subtropical China. Beijing: Science Press, 1992 (in Chinese)
- [13] Yin W-Y (尹文英). Pictorial Keys to Soil Animals of China. Beijing: Science Press, 1998 (in Chinese)
- [14] González G, Seastedt TR. Comparison of the abundance and comparison of litter fauna in tropical and subalpine forest. *Pedobiologia*, 2000, **44**: 545–555
- [15] Shannon CE, Weaver W. The Mathematical Theory of Communication. Urbana, IL: University of Illinois Press, 1949
- [16] Pielou EC. The measurement of diversity in different types of biological collections. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, **13**: 131–144
- [17] Tian G, Brussaard L, Kang BT, *et al.* Soil fauna-mediated decomposition of plant residues under constrained environmental and residue quality conditions // Cadish G, Giller KE, eds. Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition. Wallingford: CAB International, 1997: 125–134
- [18] Yang X-D (杨效东), Sha L-Q (沙丽清). Preliminary investigation on time and space variation of structure of soil fauna community in artificial and secondary forests of Xishuangbanna. *Acta Pedologica Sinica (土壤学报)*, 2000, **37**(1): 116–123 (in Chinese)
- [19] Lin Y-H (林英华), Zhang F-D (张夫道), Zhang J-Q (张俊清), *et al.* Preliminary investigation on temporal and spatial variation of structure of soil fauna community in different natural vegetations of Dinghushan. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2005, **25**(10): 2616–2622 (in Chinese)
- [20] Yi L (易 兰), You W-H (由文辉), Song Y-C (宋永昌). Soil animal communities in the litter of the evergreen broad-leaved forest at five succession stages in Tiantong. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 2005, **25**(3): 466–473 (in Chinese)
- [21] Yu G-B (余广彬), Yang X-D (杨效东). Characteristics of litter and soil arthropod communities at different successional stages of tropical forests. *Biodiversity Science (生物多样性)*, 2007, **15**(2): 188–198 (in Chinese)
- [22] Sheng C-Y (盛才余), Xie S-C (谢寿昌). Studies on the growth regularity and the successional status of *Populus bonatii* in the Ailao Mountains. *Journal of Southwest Forestry College (西南林学院学报)*, 1991, **11**(1): 33–40 (in Chinese)
- [23] Hasegawa M. The relationship between the organic matter composition of a forest floor and the structure of a soil arthropod community. *European Journal of Soil Biology*, 2001, **37**: 281–284
- [24] Li Y-D (李意德), Fang J-Y (方精云), Wu Z-M (吴仲民), *et al.* Carbon pool and carbon dioxide dynamics of tropical mountain rain forest ecosystem at Jianfengling, Jiaonan Island. *Acta Ecologica Sinica (生态学报)*, 1998, **18**(4): 371–378 (in Chinese)
- [25] Yan J-H (闫俊华), Zhou G-Y (周国逸), Tang X-L (唐旭利), *et al.* Characteristics of litter and its contained water in three succession communities in Dinghushan Mountain. *Chinese Journal of Applied Ecology*

- (应用生态学报), 2001, 12(4): 509–512 (in Chinese)
- [26] Zhang Q-F (张庆费), Xu R-D (徐绒娣). Standing crops of the litterfall in the succession series of evergreen broad-leaved forest in Tiantong, Zhejiang Province. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 1999, 18(2): 17–21 (in Chinese)
- [27] Yin X-Q (殷秀琴), Zhang G-R (张桂荣). Correlation between forest litter and soil macroanimals. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1993, 4(2): 167–173 (in Chinese)
- [28] Liao C-H (廖崇惠), Li J-X (李健雄), Huang H-T (黄海涛). Soil animal community diversity in the forest of the southern subtropical region, China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 1997, 17(5): 549–555 (in Chinese)
- [29] Yin X-Q (殷秀琴), Wu D-H (吴东辉), Han X-M (韩晓梅). Diversity of soil animals community in Xiao Hinggan Mountains. *Scientia Geographica Sinica* (地理科学), 2003, 23(3): 316–322 (in Chinese)
- [30] Liao C-H (廖崇惠), Li J-X (李健雄), Yang Y-P (杨悦屏), et al. The community of soil animal in tropical rain forest in Jianfeng Mountain, Hainan Island, China: Relationship between seasonal change of community structure and climatic factors. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, 23(1): 139–147 (in Chinese)
- [31] Yi L (易 兰), You W-H (由文辉). Influences of changes of environmental factors on soil animal community in the succession of the vegetation in Tiantong. *Journal of East China Normal University* (Natural Science) (华东师范大学学报·自然科学版), 2006(6): 109–116 (in Chinese)
- [32] Xu G-L (徐国良), Huang Z-L (黄忠良), Ouyang X-J (欧阳学军), et al. Diversity of aboveground invertebrates in Dinghushan and its correlation with litter. *Zoological Research* (动物学研究), 2002, 23(6): 477–482 (in Chinese)
- [33] Zhang X-P (张雪萍), Cui G-F (崔国发), Chen P (陈 鹏). Biomass of soil animals in larch plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1996, 7(2): 156–157 (in Chinese)
- [34] Osler GHR, Korycinska A, Cole L. Differences in litter mass change mite assemblage structure on a deciduous forest floor. *Ecography*, 2006, 29: 811–818
- [35] Gong H-D (巩合德), Zhang Y-P (张一平), Liu Y-H (刘玉洪), et al. Dynamics of soil moisture in evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountain. *Journal of Northeast Forestry University* (东北林业大学学报), 2008, 36(1): 53–54 (in Chinese)
- [36] Warren MW, Zou XM. Soil macrofauna and litter nutrients in three tropical tree plantations on a disturbed site in Puerto Rico. *Forest Ecology and Management*, 2002, 170: 161–171
- [37] Ruess L, Schutz K, Migge-Kleian S, et al. Lipid composition of Collembola and their food resources in deciduous forest stands – Implications for feeding strategies. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39: 1990–2000
- [38] Zhang X-P (张雪萍), Hou W-L (侯威岭), Chen P (陈 鹏). Soil animals guilds and their ecological distribution in the northeast of China. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2001, 7(4): 370–374 (in Chinese)

---

作者简介 杨 赵,男,1980 年生,硕士研究生.主要从事土壤生态学研究. E-mail: feizhhu@mail.ynu.edu.cn

责任编辑 肖 红

---