

DOI: 10.5846/stxb202004271008

王雅雅, 饶鑫, 童升洪, 韩晓鸽, 王俊, 简曙光, 任海, 申卫军. 西沙永兴岛抗风桐与海岸桐群落凋落叶分解及中型土壤动物的贡献. 生态学报, 2020, 40(23): 8805-8815.

Wang Y Y, Rao X, Tong S H, Han X G, Wang J, Jian S G, Ren H, Shen W J. Leaf litter decomposition and soil mesofauna contribution in *Pisonia grandis* and *Guettarda speciosa* plant communities in the Yongxing Island of South China Sea. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(23): 8805-8815.

西沙永兴岛抗风桐与海岸桐群落凋落叶分解及中型土壤动物的贡献

王雅雅^{1,2}, 饶鑫^{1,2}, 童升洪^{1,2}, 韩晓鸽¹, 王俊¹, 简曙光¹, 任海¹, 申卫军^{1,*}

1 中国科学院华南植物园, 广州 510560

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:我国南海诸岛主要是珊瑚岛。植物凋落物分解是生态系统元素循环的关键环节,但目前关于南海珊瑚岛生态系统凋落物分解的研究还是空白。以我国西沙群岛的优势树种抗风桐(*Pisonia grandis*)和海岸桐(*Guettarda speciosa*)为研究对象,采用凋落物袋法,分别于分解期间的第3、6、9、13和15个月取样,探究中型土壤动物对两种植物群落中凋落物分解过程中质量损失和养分释放的影响。结果表明:与没有中型土壤动物存在的情况(0.1 mm 凋落物袋)相比,分解开始后的6个月内,中型土壤动物存在(2 mm 凋落物袋)使抗风桐和海岸桐凋落叶分解速率分别提高了12.3%和4.8% ($P < 0.05$);分解6—15个月期间,中型土壤动物存在使抗风桐和海岸桐凋落叶分解速率分别提高了33.0%和12.3% ($P < 0.05$)。中型土壤动物排除显著影响了不同分解阶段凋落叶总碳(Total carbon, TC)、总氮(Total nitrogen, TN)、纤维素、木质素和半纤维素的残留率变化。中型土壤动物群落组成受土壤温度显著影响($P < 0.05$),它们对凋落叶分解的贡献可能主要受优势类群如真螨目和寄螨目的影响。相较海岸桐,抗风桐凋落叶的分解周期更短,中型土壤动物对其的贡献更大;选用抗风桐作为南海珊瑚岛退化植被恢复或新建的先锋种对促进生态系统元素循环更有利。

关键词:凋落物分解; 养分释放; 中型土壤动物; 珊瑚岛

Leaf litter decomposition and soil mesofauna contribution in *Pisonia grandis* and *Guettarda speciosa* plant communities in the Yongxing Island of South China Sea

WANG Yaya^{1,2}, RAO Xin^{1,2}, TONG Shenghong^{1,2}, HAN Xiaoge¹, WANG Jun¹, JIAN Shuguang¹, REN Hai¹, SHEN Weijun^{1,*}

1 South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510560, China

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

Abstract: Coral island is the major terrestrial ecosystem type in South China Sea. Litter decomposition is a key biogeochemical process that drives ecosystem nutrient cycling, but has not been studied in these coral islands. We set up three quadrats in each of the two plant communities dominated by *Pisonia grandis* and *Guettarda speciosa* in the Yongxing Island of South China Sea. Decomposition litterbags were deployed in the quadrats in July 2018 to quantify the litter turnover rate and nutrient release pattern. The decomposition experiment lasted for 15 months till October 2019 and we sampled 5 times within the period to weigh remaining litter mass and to analyze the chemical constituents of the decomposing litter. The analyzed chemical elements included total carbon (TC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), lignin, cellulose,

基金项目:科技部重点研发计划项目(2016YFC1403001);中国科学院战略先导科技专项(A类)(XDA13020600, XDA13020505)

收稿日期:2020-04-27; 网络出版日期:2020-10-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shenweij@scbg.ac.cn

and semi-cellulose. To examine the role of soil mesofauna with body size of 0.2—2.0 mm in the litter mass loss and nutrient release from decomposing *P. grandis* and *G. speciosa* leaf litter, litterbags with two different mesh sizes (0.1 mm and 2.0 mm) were used. The relative mass loss difference between these two mesh-size litterbags was used to quantify the contribution of mesofauna. During the earlier 6 months of decomposition, the presence of soil mesofauna increased the leaf litter decomposition rate of *P. grandis* significantly by 12.3% and that of *G. speciosa* by 4.8% ($P < 0.05$). During the latter 6 to 15 months of decomposition, the effects exerted by soil mesofauna seemed to increase, with decomposition rate being increased significantly by 33.0% and 12.3% for the two litter species ($P < 0.05$). The presence of soil mesofauna accelerated the release rate of total carbon, total nitrogen, cellulose, lignin, hemicellulose from the decomposing litters. Change in soil mesofauna community structure was mainly affected by soil temperature. However, the contribution of soil mesofauna to litter decomposition was not correlated to the changes in mesofauna richness and abundance. We argue that the measured mesofaunas contribution to litter decomposition was most likely affected by the dominant groups such as Acariformes and Parasiformes, but the photodegradation of litter and litterbags of the differed mesh-size might also played a role. The exact contribution of these factors/mechanisms ought to be explored in further studies. Based on the results of this study, we suggest that using *P. grandis*, in comparison of *G. speciosa*, as pioneer species in the establishment and restoration of degraded vegetation on the coral islands of South China Sea could better promote the ecosystem nutrient cycling.

Key Words: litter decomposition; nutrient release; soil mesofauna; coral island

植物凋落物分解是生态系统中养分循环和能量流动的关键过程。全球尺度上净初级生产力 50% 以上通过凋落物分解归还土壤^[1]。在生物和非生物因素的作用下,凋落物分解后参与土壤有机质形成,并释放养分元素到土壤中为植物生长提供营养^[2-3]。前人研究表明,凋落物分解主要受气候、凋落物质量和土壤生物群落的影响^[4-5]。在全球尺度上,凋落物分解过程主要受气候因素影响^[6];而在局域尺度上,则依赖于凋落物质量和土壤生物^[7]。植物凋落物质量通常用初始 C:N、木质素:N 和木质素:P 等化学计量比来衡量,初始 C:N 和木质素:N 越低,凋落物质量越高,越有利于分解^[8-9]。土壤动物是凋落物分解过程中被广泛研究的生物因子^[10],其对凋落物分解的作用主要通过以下三种方式:(1)取食或破碎凋落物增加微生物的接触表面积;(2)通过粪便改变凋落物化学组分;(3)通过改变微生物群落结构、刺激微生物活性等而加快凋落物分解^[11-13]。土壤动物根据体径可分为大型(>2 mm)、中型(0.2—2 mm)和小型(<0.2 mm)土壤动物^[14];中型土壤动物因其分布广泛、类群丰富及食性广等特征而备受关注^[15-16]。土壤中型土壤动物主要由弹尾目和螨类组成,通过取食真菌、细菌以及植物凋落物碎屑而参与凋落物分解过程^[17-18]。

从全球尺度看,土壤动物对凋落物分解的作用主要表现为正效应,平均可以解释凋落物损失的 27%^[5]。土壤动物对凋落物分解的贡献也受气候因素和凋落物类型的影响^[6,19],在不同生态系统中土壤动物对凋落物分解的影响有差异。在草原生态系统中,中型土壤动物对低质量凋落物分解的促进效果明显^[20];而在旱地生态系统中,凋落物分解并未受到土壤动物去除的影响,主要是由非生物的光解发挥主导作用^[21];Powers 等^[22]在热带雨林的研究表明中型土壤动物的排除使凋落物的分解速率降低了 50%;另有研究者在巴西中部的原始热带稀树雨林中的研究也得出了类似的结论:土壤动物对凋落物分解的贡献率达 13%—57%^[23],雨季的贡献更大。

我国南海诸岛基本上都是珊瑚岛,其中西沙群岛自然岛屿最多,植被最具代表性,自然乔木植被主要是抗风桐(*Pisonia grandis*)纯林和海岸桐(*Guettarda speciosa*)纯林。近年来,由于受到人类活动和全球变化影响而出现了退化现象,亟需进行植被恢复^[24]。在植被养护管理方面以及重新造林过程中,维持或恢复当地原生植物群落组成至关重要^[25]。由于土壤动物尤其是中型土壤动物能促进凋落物分解、加速碳氮周转和调节植被组成^[26],它们在植被恢复过程中土壤肥力改善方面能发挥重要作用。恢复或新建的珊瑚岛礁植被生态系统

中,土壤动物发挥作用的大小,也是评价恢复成效的一个重要指标。但是,目前关于我国南海珊瑚岛生态系统凋落物分解及土壤动物在分解过程中的作用还没有开展研究。

另外,在南海珊瑚岛一些新建的先锋群落中,观察到很多地表的凋落叶虽然叶肉组织已经剥落,但叶脉网络仍然完整保存,这可能是凋落叶分解速率慢的一种表现;猜想可能是缺少了土壤动物的碎化或微生物的作用,但缺少相关的实验验证。本研究采用凋落物袋法,探究南海西沙永兴岛优势树种抗风桐和海岸桐凋落叶分解过程中中型土壤动物的作用,为深入理解热带珊瑚岛生态系统的养分循环过程,土壤肥力形成过程和研发有效的土壤改良措施提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

本研究的研究样地位于西沙永兴岛,是海南三沙市政府所在地。永兴岛位于北纬 16°50',东经 112°20',属于中国西沙群岛东部的宜居群岛,是南海诸岛中面积最大的自然岛屿(约 2.10 km²)。该区域属热带海洋性季风气候,年平均降水量 1500 mm,多集中在 5—9 月,干湿季差异明显。年平均气温为 26.3℃,年太阳辐射量大,日照时数长,终年高温,蒸发量大。土壤基质为珊瑚和贝壳类残体在鸟粪的长期作用下形成的磷质石灰土和滨海盐土。岛上主要植物群落为抗风桐、海岸桐和草海桐(*Scaevola sericea* Vahl)等形成的单优群落^[27-29]。

1.2 样地布设

本研究选择抗风桐纯林和海岸桐纯林作为研究样地。在每个样地中随机布置 3 个 5 m×5 m 的重复样方,同时分别以样地中的抗风桐和海岸桐凋落叶为研究对象,选用孔径分别为 0.1 mm 和 2 mm,规格为 15 cm×20 cm 的凋落物袋。0.1 mm 孔径的凋落物袋基本排除中型土壤动物,但允许小型土壤动物进入(主要为线虫、原生动物等湿生类动物),视为无中型土壤动物对照;2 mm 孔径凋落物袋内允许中型和小型土壤动物进入,但排除大型土壤动物,视为有中型土壤动物处理。两种孔径凋落物袋质量损失之差即为中型土壤动物的贡献^[18]。在 2018 年 7 月开始布置凋落物分解实验,每个凋落物袋内装入风干后的凋落叶 10 g。在每个样方的土壤表面放置两种孔径的凋落物网袋各 20 袋,共 240 袋,分别于 2018 年 10 月、2019 年 1 月、4 月、8 月和 10 月进行凋落物袋回收,每次每个样方回收 2—3 袋。其中,一袋用于失重率测定,45℃烘箱中烘 48 h 至恒重,用毛刷轻轻去除凋落叶表面的杂质和砂砾后称重,烘干的凋落叶样品用研磨仪(JXFSTPRP-48,中国)粉碎后过 60 目筛,留待进行元素测定。其中,凋落叶 TC、TN 和 TP 含量分别采用重铬酸钾容量法-外加热法、奈氏比色法和钼锑抗比色法进行测定;凋落叶木质素、纤维素和半纤维素含量采用中性和酸性纤维洗涤法(Van Soest 法)测定。一袋用于中型土壤动物分离,利用 Tullgren 法提取中型土壤动物,在 Olympus 体视显微镜(SMZ140-N2LED)下镜检,并鉴定、分类^[14]。

在进行凋落物袋布设的同时,在样地中安装土壤温湿度自动记录仪(MC301N,美国),实时监测表层土壤的温度和湿度。此外,分别在布置凋落物袋时,在每个样方内用直径 35 cm 的土钻各取 5 钻 0—5 cm 和 5—10 cm 层土壤,充分混合,风干后过筛,进行基本理化性质分析,包括 pH、含水量、土壤总有机碳(Total organic carbon, TOC)、土壤 TN 及土壤 TP 等的分析。土壤样品 pH 测定用电位法(水土比 1:2.5);含水量测定用烘干法(105℃, 24 h);土壤 TOC、TN 和 TP 的测定方法与上述植物凋落叶的分析方法相同。

1.3 数据处理与分析

凋落叶分解快慢用失重率、残留率和分解常数来度量,计算公式如下:

$$\text{凋落叶失重率: } L_t = (W_0 - W_t) / W_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{凋落叶元素残留率: } R_t = (C_t \times W_t) / (C_0 \times W_0) \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{凋落物分解常数(Olson 衰减指数模型}^{[30]}): y = W_t / W_0 = a \cdot e^{-kt} \quad (3)$$

式中, W_0 为初始凋落叶干重(g), W_t 为某次取样时的凋落叶干重(g); C_0 为初始凋落叶养分元素的含量(%), C_t

为取样时养分元素的含量(%), W_t/W_0 表示质量残留率(%), a 为分解系数, k 为分解常数, t 为分解时间(月)。

土壤动物群落组成特征以及对凋落叶分解的贡献率(C_f)用以下公式计算:

$$\text{土壤动物对凋落叶分解的贡献率: } C_f = (L_2 - L_{0.1})/L_{0.1} \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{Shannon-Wiener 多样性指数: } H' = - \sum_{i=1}^s P_i \ln P_i \quad (5)$$

$$\text{Pielou 均匀性指数: } J_{wax} = H'/\ln S \quad (6)$$

$$\text{Margalef 丰富度指数: } D = (S - 1)/\ln N \quad (7)$$

公式(4)–(7)中 L_2 和 $L_{0.1}$ 分别表示 2 mm 和 0.1 mm 孔径凋落物袋内凋落叶失重率。S 为中型土壤动物总类群数, P_i 为第 i 个类群的个体数占总个体数的比例, N 为类群总个体数。

采用独立样本 t 检验分析不同孔径凋落物袋处理间的差异, 单因素方差分析(one-way ANOVA)检测分解时间对凋落叶分解的影响, Pearson 相关性分析探究土壤动物对凋落叶分解的贡献率与土壤动物群落结构变化的相关性。统计分析采用 SPSS21.0 软件, 作图用 Origin9.0 和 R.3.4.4 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质和凋落物质量

永兴岛抗风桐和海岸桐群落土壤含水量、土壤温度与湿度, 以及 pH、TOC、TN 和 TP 含量均没有显著差异。这些土壤理化性质在两个取样土层(0–5 cm 和 5–10 cm)之间也没有显著差异($P>0.05$; 表 1)。这些结果表明两个植物群落凋落叶分解的小气候环境相似。

表 1 抗风桐和海岸桐纯林土壤理化性质(均值±标准误)

Table 1 Soil physical and chemical properties in the *P. grandis* and *G. speciosa* forests (mean±SE)

群落类型 Forest type	土层 Soil layer/cm	含水量 Soil water content/%	pH	总有机碳 TOC/%	全氮 TN/%	全磷 TP/%	年均土 壤湿度 Mean soil moisture/%	年均土 壤温度 Mean soil temperature/°C
抗风桐纯林	0–5	19.87±6.37a	7.93±0.08a	4.02±0.59ab	0.25±0.0001a	0.56±0.15a	8.84±0.53b	28.09±0.11a
<i>P. grandis</i> forest	5–10	17.70±4.47a	7.92±0.04a	2.64±0.24b	0.25±0.0003a	0.49±0.03a	11.55±0.38a	28.11±0.10a
海岸桐纯林	0–5	27.30±3.77a	7.03±0.33a	5.28±0.40a	0.25±0.001a	0.81±0.06a	9.28±0.44b	27.80±0.16a
<i>G. speciosa</i> forest	5–10	19.81±4.34a	7.78±0.47a	1.88±0.64b	0.25±0.0002a	0.63±0.04a	11.18±0.28a	27.92±0.16a

同列数据后不同小写字母表示两群落在 0.05 水平上差异显著

除半纤维素含量外, 两个树种凋落叶的初始化学质量存在一定差异。抗风桐凋落叶的 TC、TP、木质素和纤维素含量显著低于海岸桐, 而其 TN 含量显著高于海岸桐凋落叶($P<0.05$; 表 2)。抗风桐凋落叶的 C:N 和木质素:N 均显著低于海岸桐凋落叶($P<0.05$; 表 2)。因此, 抗风桐凋落叶初始质量显著高于海岸桐。

表 2 抗风桐和海岸桐凋落叶初始化学质量(均值±标准误)

Table 2 Initial chemical properties of *P. grandis* and *G. speciosa* leaf litter (mean±SE)

树种 Litter species	总碳 TC/%	总氮 TN/%	总磷 TP/%	木质素 Lignin/%	纤维素 Cellulose/%	半纤维素 Semi- cellulose/%	碳:氮 C:N	木质素:氮 Lignin:N
抗风桐 <i>P. grandis</i>	32.25±0.43b	1.74±0.05a	0.12±0.003b	9.56±1.15b	12.19±0.34b	9.19±0.41a	18.59±0.51b	5.55±0.79b
海岸桐 <i>G. speciosa</i>	45.39±1.84a	0.73±0.01b	0.23±0.002a	13.63±2.54a	14.7±0.16a	10.32±0.20a	62.43±2.63a	18.66±3.26a

同列数据后不同小写字母表示两树种凋落叶在 0.05 水平上差异显著

2.2 质量损失和养分释放

在两种凋落叶分解 15 个月期间, 凋落叶失重率受凋落物袋孔径和分解时间的影响。本研究中, 两种凋落

叶分解过程大体可分为两个阶段,分解前 6 个月失重较快,6 个月后分解速率变慢。分解前 6 个月,抗风桐 0.1 mm 凋落物袋内凋落物失重率(43.5%)显著低于 2 mm 凋落物袋内凋落叶失重率(60.3%) ($P < 0.05$; 表 3);海岸桐 0.1 mm 和 2 mm 孔径凋落物袋内凋落叶失重率分别为 33.3% 和 34.3%,两者之间差异不显著 ($P > 0.05$; 表 3)。分解 15 个月后,抗风桐 0.1 mm 凋落物袋内凋落叶失重率(56.8%)显著低于 2 mm 凋落物袋内凋落叶失重率(77.6%) ($P < 0.05$; 表 3);海岸桐两种孔径凋落物袋内凋落叶失重率分别为 51.0% 和 51.7%,两者之间无显著差异 ($P > 0.05$; 表 3)。

中型土壤动物对抗风桐和海岸桐凋落叶分解的贡献率随分解时间变化。在分解 0—6 个月内,对抗风桐和海岸桐的平均贡献率分别为 12.3% 和 4.8% ($P < 0.05$; 表 3);分解 6—15 个月内,平均贡献率分别为 33.0% 和 12.3% ($P < 0.05$; 表 3)。这些结果显示,中型土壤动物对抗风桐凋落叶失重率在分解早期和晚期均有显著影响,而对海岸桐凋落叶失重率仅在分解后期有显著影响。

表 3 抗风桐和海岸桐凋落叶分解过程中失重率及中型土壤动物贡献率的变化(均值±标准误)

Table 3 Mass loss and mesofauna contribution ratios (mean±SE) to the decomposition of *P. grandis* and *G. speciosa* litters

凋落叶种类 Litter species	变量 Variable	3 个月 3 months	6 个月 6 months	9 个月 9 months	13 个月 13 months	15 个月 15 months
抗风桐 <i>P. grandis</i>	失重率(0.1 mm 袋)/%	42.34±2.17Aa	43.45±5.02Bb	49.59±1.72Aab	54.48±3.93Aa	56.77±3.70Bb
	失重率(2 mm 袋)/%	34.3±4.83Aab	60.29±2.8Aa	62.49±7.93Aa	61.12±5.38Aa	77.56±2.13Aa
	贡献率/%	-17.46±15.50b	42.01±14.82a	48.43±9.42a	12.87±9.82ab	37.79±10.02a
海岸桐 <i>G. speciosa</i>	失重率(0.1 mm 袋)/%	25.27±1.39Abc	33.25±3.85Ab	27.45±0.63Ab	43.61±3.94Aa	50.99±5.28Ab
	失重率(2 mm 袋)/%	19.56±4.08Ac	34.31±1.18Ab	35.7±2.42Aab	48.72±2.49Aa	51.74±1.20Ab
	贡献率/%	-7.12±9.30a	16.71±7.66a	25.16 ±10.07a	12.63 ±5.41a	3.40±9.49a

同行数据后不同小写字母表示在不同采样时间失重率和贡献率的统计差异,同列不同大写字母表示同种凋落叶两种孔径凋落物袋在同一采样时间失重率的统计差异($P < 0.05$)

根据经典 Olson 分解模型拟合凋落物质量残留率随分解时间动态变化及计算分解常数。抗风桐凋落叶在 0.1 mm 和 2 mm 孔径凋落物袋内的分解常数分别为 0.05 和 0.08,也即分解周期分别为 20 个月和 12.5 个月,两种凋落袋处理间差异显著 ($P < 0.01$; 图 1)。海岸桐分解常数在两种孔径凋落物袋处理下分别为 0.04 和 0.05,也即分解周期分别为 25 个月和 20 个月,凋落物袋处理间差异不显著 ($P > 0.01$; 图 1)。因此,两种孔径凋落物袋处理显著影响抗风桐分解常数和分解周期,而对海岸桐没有显著影响。

抗风桐和海岸桐凋落叶在分解过程中表现出相似的养分释放变化趋势。随着分解过程的持续,两种凋落叶的 TC 和纤维素残留率呈现出降低趋势;TN 残留率则呈现出升高趋势;TP、木质素、半纤维素、C:N 及木质素:N 的残留率先上升后下降,其中 TP 残留率变化在时间上差异不显著 ($P > 0.05$; 图 2)。

独立样本 t 检验表明,抗风桐和海岸桐的养分元素残留率在不同分解时期受凋落物袋孔径影响 ($P < 0.05$; 图 2)。与 2 mm 凋落物袋相比,0.1 mm 凋落物袋内抗风桐凋落叶 TC、纤维素、木质素和半纤维素的释放在分解后期显著减少 ($P < 0.05$; 图 2),残留率分别下降了 57.1%、53.8%、55.6% 和 22.5%,促进了抗风桐 TN 的富集,残留率提高了 64.5%;而对于海岸桐,0.1 mm 凋落物袋处理抑制了其凋落叶分解过程中纤维素和半纤维素的释放,但分解 15 个月后养分残留率在两种孔径凋落物袋处理间差异不显著 ($P > 0.05$; 图 2)。因此,抗风桐和海岸桐凋落叶分解过程中元素释放变化趋势相似,但在不同分解时期养分元素残留率受凋落物孔径影响,且其对抗风桐养分释放影响更大。

2.3 中型土壤动物群落组成随分解时间的变化

在凋落叶分解过程中,抗风桐和海岸桐凋落物袋内共计捕获中型土壤动物 462 只,其中优势类群为螨类,常见种为腹足纲、虫齿目和弹尾目等。按食性分为杂食、食菌、食植、食腐和食肉五大功能类群,其中杂食性占主要优势。

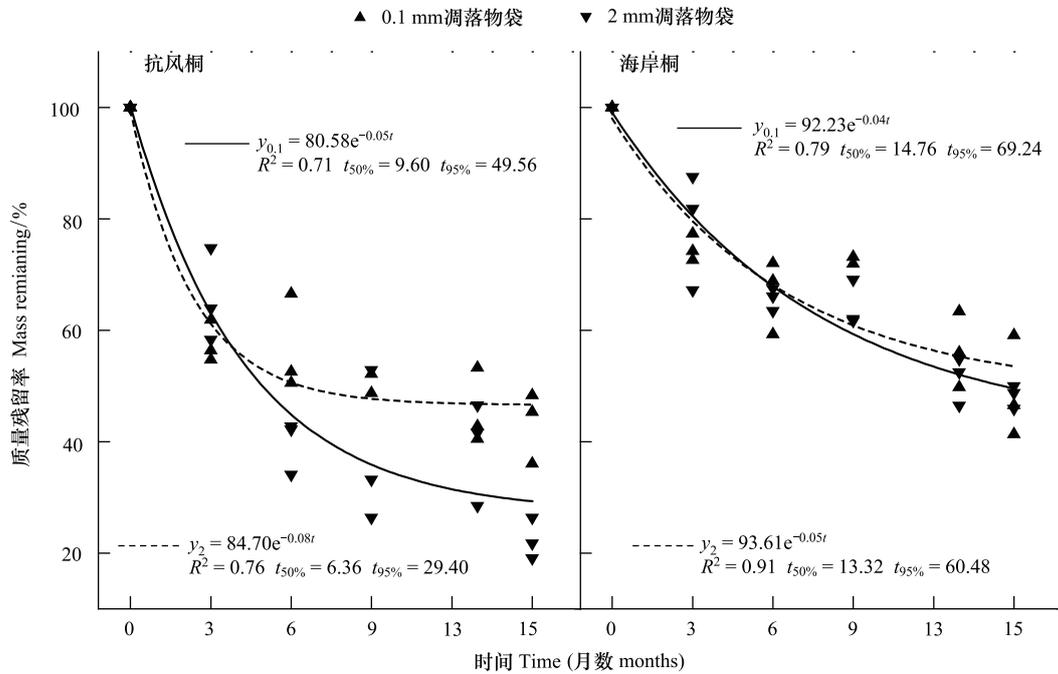


图 1 两种孔径凋落物袋处理下抗风桐和海岸桐凋落叶分解过程中质量残留率变化

Fig.1 Mass remaining ratios of the two litter species (*P. grandis* and *G. speciosa*) in the two mesh-size litterbags

实线是 0.1 mm 孔径凋落物袋内质量残留率随分解时间的拟合曲线,虚线是 2 mm 孔径凋落物袋内质量残留率随分解时间的拟合曲线, R^2 为决定系数,表示方程拟合度; $t_{50\%}$ 和 $t_{95\%}$ 分别表示凋落物分解 50% 和 95% 时所需要的时间(月)

表 4 凋落叶分解过程中中型土壤动物种类和数量

Table 4 Taxa and number of soil mesofauna individuals observed at different sampling times

类群 Taxa	抗风桐 <i>P. grandis</i>					海岸桐 <i>G. speciosa</i>					食性 Feeding habit
	3	6	9	13	15	3	6	9	13	15	
真螨目 Acariformes	14	4	1	115	7	27	1		126	5	杂食
寄螨目 Parasiformes	5	1		23	2		1		18		杂食
猛水蚤目 Harpacticoida	1										杂食
腹足纲 Gastropoda			1	1	4	1	1	1	3	4	杂食
膜翅目 Hymenoptera			1			1					杂食
虫齿目 Psocoptera	19			3		20			2		食菌
缨翅目 Thysanoptera						1			1		食菌
鳞翅目 Lepidoptera						1					食植
同翅目 Homoptem			2					2			食植
等翅目 Isoptera						1					食腐
鞘翅目 Coleoptera	1						1				食腐
蜚蠊目 Blattoptera						2					食腐
双翅目 Diptera			1					2			食腐
弹尾纲 Collembola		2		19		1	1	1	6		食肉
蜘蛛目 Araneae				3					1		食肉
类群数 Richness	5	3	5	6	3	9	5	4	7	2	
个体数 Abundance	40	7	6	146	13	55	5	6	157	9	

中型土壤动物群落结构存在季节差异,在分解 13 个月后中型土壤动物类群数和总个体数达到峰值,主要是真螨目和寄螨目动物(表 4);多样性和丰富度也达到最高。但不同分解阶段抗风桐和海岸桐凋落物袋内中

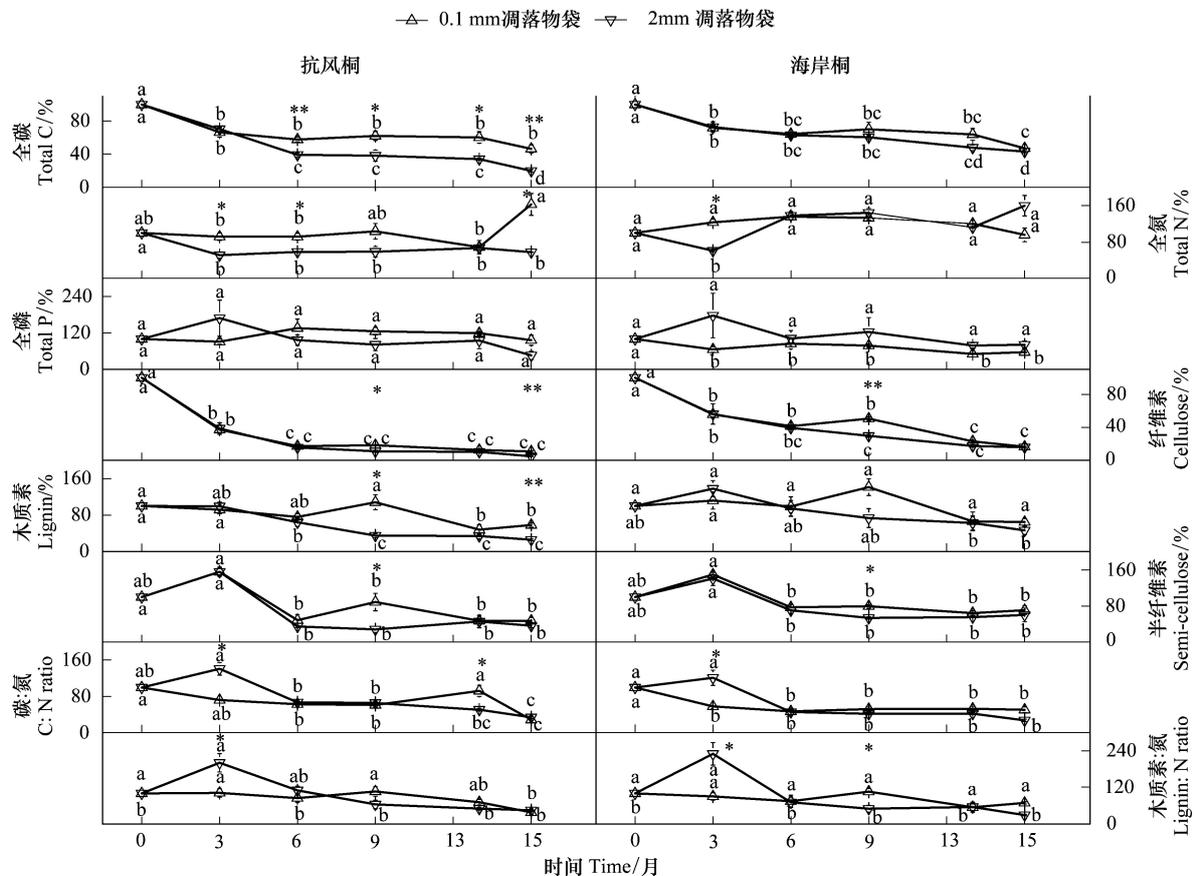


图 2 两种孔径凋落物袋处理下抗风桐和海岸桐的养分元素残留率随分解时间的变化

Fig.2 Dynamics in nutrient mass remaining for *P. grandis* and *G. speciosa* in two mesh-size litterbags

不同小写字母表示不同分解时间凋落叶失重率在 0.05 水平上差异显著, * 表示同一分解时间不同孔径凋落物袋处理间差异显著 (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$)

型土壤动物的多样性指数、均匀度指数和丰富度指数变化趋势相似, 差异不显著(图 3)。

用两种凋落叶 5 次采样时间的数据进行 Pearson 相关分析, 结果显示中型土壤动物个体数和类群数与凋落物质量、中型土壤动物贡献率以及土壤湿度的相关性均不显著。中型土壤动物个体数和类群数仅与土壤温度呈显著正相关性($P < 0.05$; 图 5)。

3 讨论

本研究结果表明, 中型土壤动物的排除减缓了两种凋落叶分解过程中的质量损失, 影响了养分释放过程, 中型土壤动物的贡献因凋落叶类型和分解时间而异, 这与绝大多数前人研究结果一致^[5,19,31]。龙健等^[32]在茂兰喀斯特森林的研究结果认为土壤动物对初始凋落物质量高的凋落物分解贡献更大; Fujii 等^[33]对不同海拔梯度上森林凋落物分解的研究结果也显示中型土壤动物对高质量凋落物分解的贡献率更大。研究结果也显示中型土壤动物的排除对抗风桐凋落物叶分解的影响更大; 抗风桐的 C:N 和木质素: N 显著低于海岸桐, 初始凋落物质量较高, 中型土壤动物可能更加偏好取食这种质量较高的凋落叶, 从而更有利于其分解。然而, 在青藏高寒草甸凋落物分解的研究显示, 土壤动物对 C:N 高的凋落物分解促进作用更大^[34], 这可能是低温干旱的环境下, 土壤动物对 C 的利用需求更高导致的。有一些学者在温带森林和热带雨林的研究同样支持中型土壤动物对质量低的凋落物分解作用更显著^[25,35], 可能的原因是中型土壤动物通过捕食作用调节真菌分解者群落结构, 使真菌的多样性更高, 更有利于低质量凋落物分解; 这说明中型土壤动物对凋落物分解的作

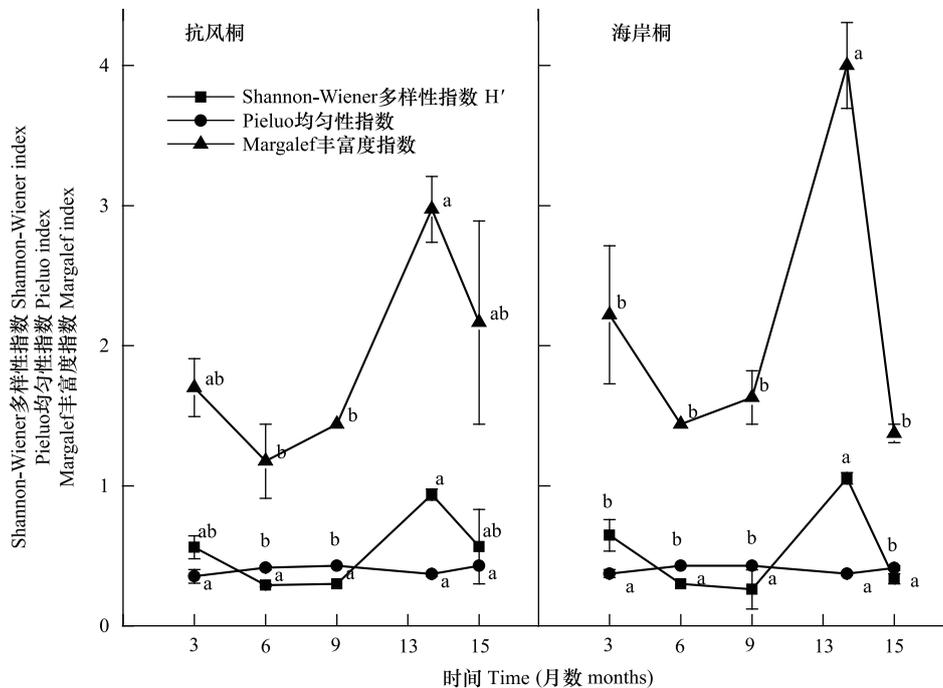


图3 抗风桐和海岸桐凋落叶分解过程中中型土壤动物群落组成的变化

Fig.3 Changes in soil mesofauna community composition with decomposition time for *P. grandis* and *G. speciosa* litters

不同小写字母表示不同分解阶段各指标在 $P < 0.05$ 水平上差异显著; D 为 Margalef 丰富度指数; H' 为 Shannon-Wiener 多样性指数; J_{wx} 为 Pielou 均匀性指数

用受凋落物质量的影响,但更依赖于气候因素调控。综上,本研究中中型土壤动物对两种植物凋落叶分解的作用差异,一方面可用初始凋落物质量来解释,另一方面可能还受到环境因子的限制。

根据当前的研究结果,中型土壤动物显著影响抗风桐和海岸桐养分释放过程,且主要在分解后期较明显;这与王振海^[36]对长白山针叶林凋落物分解的研究结果类似。土壤动物对凋落物分解初期养分释放的促进作用不显著,可能与初期侵入凋落物袋内的土壤动物数量和种类较少有关。本研究结果显示,中型土壤动物显著促进了分解过程中抗风桐 TC、TN、TP、纤维素、木质素和半纤维素的释放,显著促进了海岸桐 TN、纤维素、半纤维素的释放并抑制了其 TP 的释放,且显著提高了抗风桐和海岸桐分解前期的 C:N 和木质素:N。Lin 等^[30]在亚热带森林的研究结果也表明土壤动物促进凋落物 TC 和 TN 的释放;然而,在亚高山湿润森林的研究表明,分解前期土壤动物抑制凋落物 C 和 N 的释放,分解后期促进高质量凋落物 C 和 N 的释放^[37]。这与本研究结果不一致,中型土壤动物在分解前期促进了抗风桐和海岸桐 TN 的释放及抗风桐 TC 的释放,可能是由于土壤动物刺激了微生物的活性,加速了微生物对 C、N 的降解。Qiu 等^[38]对长白山阔叶林的研究结果显示,中小型土壤动物抑制了 P 的释放;刘瑞龙等^[39]在川西亚高山和高山森林中的研究中发现土壤动物促进高质量凋落物分解过程中 P 的释放,但抑制低质量凋落物 P 的释放,这说明土壤动物对凋落物 P 的释放的影响受初始凋落物质量影响。我们的研究结果与大多数研究一致^[33,39-40],土壤动物促进凋落物分解过程中纤维素、木质素和半纤维素的降解。综上,中型土壤动物影响凋落物分解过程中养分元素的释放,对两种凋落物影响差异显著,这主要可能归因于初始凋落物质量的差异。

中型土壤动物群落结构的季节性变化可能主要受土壤温湿度变化的影响^[6],反映在分解后期(2019年8月)土壤温湿度较高时,优势种螨类和弹尾目等数量增多,土壤动物多样性达到顶峰。一般认为,土壤动物群落结构变化是凋落物分解的重要调控因子,土壤动物丰富度和多样性高有利于凋落物分解^[41]。而本研究结果显示中型土壤动物个体数和类群数的变化与分解贡献率在统计上相关性不显著。罗媛媛等^[42]在亚热带常

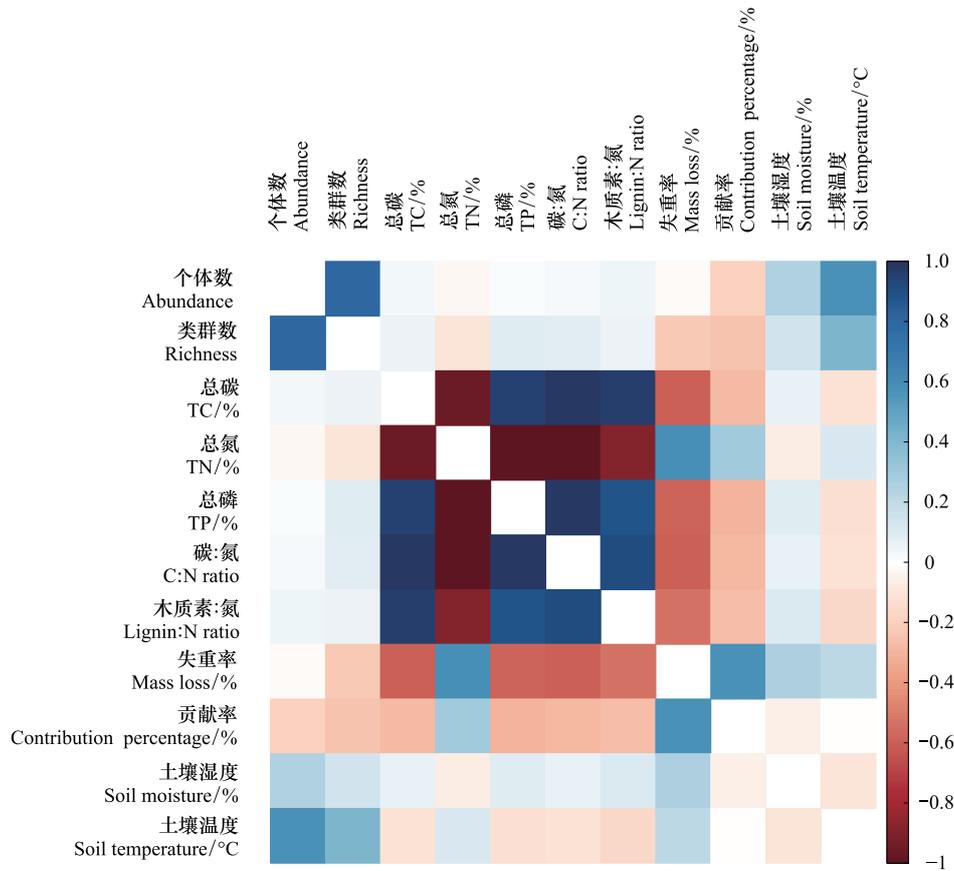


图 4 中型土壤动物个体数、类群数与凋落叶化学性质、土壤动物贡献率及土壤温度的相关性

Fig.4 Pearson correlations of mesofauna abundance and richness with litter chemistry, mesofauna contribution and soil climate
蓝色小方框代表正相关系数,橙色小方框代表负相关系数,颜色越深相关性越强

绿阔叶林的研究表明不同分解阶段各种中小型土壤动物类群优势度因其功能不同而异,如腐食性的弹尾目在分解后期比例较大;我们的研究结果也类似,分解后期真螨目和寄螨目数量较多。因此,中型土壤动物对凋落叶分解的作用可能不是由多样性决定的,而是一些优势类群决定的。杨志敏等^[43]在内蒙古典型草原的研究结果表明在光辐射强的地区土壤动物对凋落叶作用较弱,而光解起主要作用。南海珊瑚岛光照也比较强烈,光解作用在凋落叶分解中的贡献也值得进一步研究。也有研究者认为排除中型土壤动物对凋落叶分解的影响可能是由凋落叶孔径大小不同引起的凋落叶袋内微气候的差异导致的^[44-45],我们的研究结果中也可能有不同孔径凋落叶袋的影响效应。土壤生物在南海珊瑚岛凋落叶分解中的作用还需要进一步的实验来证实,如利用¹³C 同位素标记的凋落叶进行分解实验,再检测土壤动物或微生物生物量的¹³C,可证明特定土壤生物对凋落叶分解的直接贡献。

4 结论

抗风桐凋落叶具有更快的分解速率与更短的周转期。从加速元素周转的角度来看,选用抗风桐作为先锋树种进行退化珊瑚岛植被恢复更为有效。中型土壤动物显著影响了西沙群岛抗风桐和海岸桐凋落叶分解过程中的质量损失和养分释放;影响的程度因凋落叶类型和分解时间而异。中型土壤动物的存在能促进凋落叶分解,对质量较高的抗风桐凋落叶分解贡献更大。中型土壤动物对抗风桐凋落叶分解在整个分解期间都有显著贡献,但对海岸桐凋落叶分解的贡献仅在后期显著。中型土壤动物群落总个体数与类群数主要与土壤温度显著相关,它们与凋落叶分解贡献率之间的统计相关性不显著。中型土壤动物群落对凋落叶分解的影响可能

主要是一些优势类群贡献的,可能光解作用和不同孔径凋落物袋或它们的交互作用也有一定的影响效应。不同因素或机理在南海珊瑚岛生态系统凋落叶分解和元素循环中的作用仍需进一步的研究。

参考文献 (References):

- [1] Wardle D A, Bardgett R D, Klironomos J N, Setälä H, Van Der Putten W H, Wall D H. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [2] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. *Forest Ecology and Management*, 2000, 133(1/2): 13-22.
- [3] Filser J, Faber J H, Tiunov A V, Brussaard L, Frouz J, De Deyn G, Uvarov A V, Berg M P, Lavelle P, Loreau M, Wall D H, Querner P, Eijsackers H, Jiménez J J. Soil fauna: key to new carbon models. *Soil*, 2016, 2(4): 565-582.
- [4] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 1997, 79(3): 439-449.
- [5] García-Palacios P, Maestre F T, Kattge J, Wall D H. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes. *Ecology Letters*, 2013, 16(8): 1045-1053.
- [6] Wall D H, Bradford M A, St John M G, Trofymow J A, Behan-Pelletier V, Bignell D E, Dangerfield J M, Parton W J, Rusek J, Voigt W, Wolters V, Gardel H Z, Ayuke F O, Bashford R, Beljakova O I, Bohlen P J, Brauman A, Flemming S, Henschel J R, Johnson D L, Jones T H, Kovarova M, Kranabetter J M, Kutny L, Lin K C, Maryati M, Masse D, Pokarzhenskii A, Rahman H, Sabarú M G, Salamon J A, Swift M J, Varela A, Vasconcelos H L, White D, Zou X M. Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. *Global Change Biology*, 2008, 14(11): 2661-2677.
- [7] He Z M, Yu Z P, Huang Z Q, Davis M, Yang Y S. Litter decomposition, residue chemistry and microbial community structure under two subtropical forest plantations: a reciprocal litter transplant study. *Applied Soil Ecology*, 2016, 101: 84-92.
- [8] Hättenschwiler S, Coq S, Barantal S, Handa I T. Leaf traits and decomposition in tropical rainforests: revisiting some commonly held views and towards a new hypothesis. *New Phytologist*, 2011, 189(4): 950-965.
- [9] March-Salas M, Fitze P S. Changes in environmental predictability alter a plant's chemical composition and associated ecosystem services. *Environmental and Experimental Botany*, 2019, 168, 103865.
- [10] Bani A, Pioli S, Ventura M, Panzacchi P, Borruso L, Tognetti R, Tonon G, Brusetti L. The role of microbial community in the decomposition of leaf litter and deadwood. *Applied Soil Ecology*, 2018, 126: 75-84.
- [11] Wickings K, Grandy A S. The oribatid mite *Scheloribates moestus* (Acari: oribatida) alters litter chemistry and nutrient cycling during decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2): 351-358.
- [12] Frouz J. Effects of soil macro- and mesofauna on litter decomposition and soil organic matter stabilization. *Geoderma*, 2018, 332: 161-172.
- [13] 崔洋. 中亚热带森林土壤动物对凋落物分解和土壤有机碳的影响[D]. 沈阳: 中国科学院沈阳应用生态研究所, 2016: 3-4.
- [14] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴. 北京: 科学出版社, 1998.
- [15] Rousseau L, Venier L, Fleming R, Hazlett P, Morris D, Handa I T. Long-term effects of biomass removal on soil mesofaunal communities in northeastern Ontario (Canada) jack pine (*Pinus banksiana*) stands. *Forest Ecology and Management*, 2018, 421: 72-83.
- [16] 董玉梁, 余胜, 卫芯宇, 温娅檬, 吴福忠. 川西平原香樟林和香椿林中小型土壤动物群落结构特征. *四川农业大学学报*, 2018, 36(3): 344-349, 356-356.
- [17] Endlweber K, Ruess L, Scheu S. Collembola switch diet in presence of plant roots thereby functioning as herbivores. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(6): 1151-1154.
- [18] Kampichler C, Bruckner A. The role of microarthropods in terrestrial decomposition: a meta-analysis of 40 years of litterbag studies. *Biological Reviews*, 2009, 84(3): 375-389.
- [19] Frouz J, Roubířková A, Heděnc P, Tajovský K. Do soil fauna really hasten litter decomposition? A meta-analysis of enclosure studies. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 68: 18-24.
- [20] Xin W D, Yin X Q, Song B. Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen sandy lands in northeastern China. *Journal of Arid Environments*, 2012, 77: 90-95.
- [21] Araujo P I, Yahdjian L, Austin A T. Do soil organisms affect aboveground litter decomposition in the semiarid Patagonian steppe, Argentina? *Oecologia*, 2012, 168(1): 221-230.
- [22] Powers J S, Montgomery R A, Adair E C, Brearley F Q, DeWalt S J, Castanho C T, Chave J, Deinert E, Ganzhorn J U, Gilbert M E, González-Iturbe J A, Bunyavejehewin S, Grau H R, Harms K E, Hiremath A, Iriarte-Vivar S, Manzano E, De Oliveira A A, Poorter L, Ramanamanjato J B, Salk C, Varela A, Weiblen G D, Lerdau M T. Decomposition in tropical forests: a pan-tropical study of the effects of litter type, litter

- placement and mesofaunal exclusion across a precipitation gradient. *Journal of Ecology*, 2009, 97(4): 801-811.
- [23] Peña-Peña K, Irmiler U. Moisture seasonality, soil fauna, litter quality and land use as drivers of decomposition in Cerrado soils in SE-Mato Grosso, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 2016, 107: 124-133.
- [24] 简曙光, 任海. 热带珊瑚岛礁植被恢复工具种图谱. 北京: 中国林业出版社, 2017: 4-23.
- [25] Gergócs V, Hufnagel L. The effect of microarthropods on litter decomposition depends on litter quality. *European Journal of Soil Biology*, 2016, 75: 24-30.
- [26] De Deyn G B, Raaijmakers C E, Zoomer H R, Berg M P, De Ruiter P C, Verhoef H A, Bezemer T M, Van Der Putten W H. Soil invertebrate fauna enhances grassland succession and diversity. *Nature*, 2003, 422(6933): 711-713.
- [27] 柳艳菊, 闫俊岳, 宋艳玲. 近 50 年南海西沙地区的气候变化特征研究. *地理科学*, 2008, 28(6): 804-808.
- [28] 王清隆, 汤欢, 王祝年. 西沙群岛植物资源多样性调查与评价. *热带农业科学*, 2019, 39(8): 40-52.
- [29] 肖红伟, 肖化云, 张忠义, 王燕丽, 龙爱民, 刘丛强. 西沙永兴岛大气降水化学特征及来源分析. *中国环境科学*, 2016, 36(11): 3237-3244.
- [30] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [31] Lin D M, Wang F, Fanin N, Pang M, Dou P P, Wang H J, Qian S H, Zhao L, Yang Y C, Mi X C, Ma K P. Soil fauna promote litter decomposition but do not alter the relationship between leaf economics spectrum and litter decomposability. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 136: 107519.
- [32] 龙健, 张明江, 赵畅, 吴求生, 吴劲楠, 黄博聪, 张菊梅. 土壤动物对茂兰喀斯特森林凋落物分解过程中元素释放的作用. *生态学杂志*, 2019, 38(9): 2671-2682.
- [33] Fujii S, Cornelissen J H C, Berg M P, Mori A S, Rasmann S. Tree leaf and root traits mediate soil faunal contribution to litter decomposition across an elevational gradient. *Functional Ecology*, 2018, 32(3): 840-852.
- [34] 梁德飞. 凋落物质量、土壤动物和牛粪添加对青藏高原高寒草甸凋落物分解的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2016: 53-55.
- [35] Yang X D, Chen J. Plant litter quality influences the contribution of soil fauna to litter decomposition in humid tropical forests, southwestern China. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(5): 910-918.
- [36] 王振海, 殷秀琴, 张成蒙. 土壤动物在长白山臭冷杉凋落物分解中的作用. *林业科学*, 2016, 52(7): 59-67.
- [37] Li X Q, Yin X Q, Wang Z H, Fan W H. Litter mass loss and nutrient release influenced by soil fauna of *Betula ermanii* forest floor of the Changbai Mountains, China. *Applied Soil Ecology*, 2015, 95: 15-22.
- [38] Qiu L, Yin X Q, Jiang Y F. Contributions of soil meso- and microfauna to nutrient release during broadleaved tree litter decomposition in the Changbai Mountains. *Environmental Entomology*, 2019, 48(2): 395-403.
- [39] 刘瑞龙. 土壤动物对川西亚高山和高山森林凋落物分解的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014: 37-39.
- [40] Wang L F, Zhang J, He R L, Chen Y M, Yang L, Zheng H F, Li H J, Xiao J J, Liu Y. Impacts of soil fauna on lignin and cellulose degradation in litter decomposition across an alpine forest-tundra ecotone. *European Journal of Soil Biology*, 2018, 87: 53-60.
- [41] Wu P F, Wang C T. Differences in spatiotemporal dynamics between soil macrofauna and mesofauna communities in forest ecosystems; the significance for soil fauna diversity monitoring. *Geoderma*, 2019, 337: 266-272.
- [42] 罗媛媛, 袁金凤, 沈国春, 赵谷风, 于明坚. 常绿阔叶林片段中木荷凋落叶分解速率及中小型土壤节肢动物群落的结构动态. *应用生态学报*, 2010, 21(2): 265-271.
- [43] 杨志敏, 哈斯塔米尔, 刘新民. 放牧对内蒙古典型草原大针茅凋落物中土壤动物组成及其分解功能的影响. *应用生态学报*, 2016, 27(9): 2864-2874.
- [44] Bradford M A, Tordoff G M, Eggers T, Jones T H, Newington J E. Microbiota, fauna, and mesh size interactions in litter decomposition. *Oikos*, 2002, 99(2): 317-323.
- [45] 吴福忠, 谭波. 森林凋落物分解过程与土壤动物的相互关系研究进展. *四川农业大学学报*, 2018, 36(5): 569-575.