

季节性冻融期间土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献

夏磊 吴福忠 杨万勤*

四川农业大学生态林业研究所林业生态工程省级重点实验室, 成都 611130

摘要 冬季凋落物的质量损失是中高纬度和高海拔地区凋落物分解的关键, 但冬季凋落物分解是否与土壤动物的贡献有关, 不同冻融时期(冻融初期、深冻期和融化期)的土壤动物对凋落物分解的贡献是否存在差异? 对这两个问题仍缺乏必要的关注。为了解季节性冻融期间土壤动物对岷江冷杉(*Abies faxoniana*)凋落物分解的贡献, 采用凋落物分解袋法, 调查了季节性冻融期间(2010年10月底至2011年4月中旬), 不同网孔(0.020 mm、0.125 mm、1.000 mm和3.000 mm)凋落物分解袋内的岷江冷杉凋落叶质量损失, 分析了微型、中型和大型土壤动物对岷江冷杉凋落叶分解的贡献。在季节性冻融期间, 0.020 mm、0.125 mm、1.000 mm和3.000 mm分解袋内的岷江冷杉凋落叶质量损失率分别为12.13%、13.07%、14.95%和18.74%。不同体径的土壤动物对季节性冻融期间岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率总共为35.28%; 不同孔径凋落物袋内土壤动物的类群和个体相对密度与凋落叶的质量损失率呈现相对一致的变化趋势。在季节性冻融的3个阶段中, 土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率均为: 微型土壤动物<中型土壤动物<大型土壤动物。其中, 微型、中型和大型土壤动物分别在深冻期、冻融初期和融化期表现出最高的贡献率, 分别为6.56%、11.77%和21.94%。然而相对于其他冻融时期, 深冻期中型和大型土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率最低。这些结果清晰地表明了川西高山季节性冻融期间土壤动物调控着凋落物分解的生态过程, 是高山冬季凋落物分解的重要因素之一。

关键词 岷江冷杉凋落叶, 高山森林, 季节性冻融, 质量损失, 土壤动物

Contribution of soil fauna to mass loss of *Abies faxoniana* leaf litter during the freeze-thaw season

XIA Lei, WU Fu-Zhong, and YANG Wan-Qin*

Sichuan Provincial Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecological Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract

Aims Mass loss in wintertime is one of the key processes in litter decomposition in cold biomes. The contribution of soil fauna to litter decomposition has been unclear, and the contribution might be different in different winter periods (OF: the onset of the freeze-thaw season, DF: the deep frozen period and TS: the thawing stage). The objective was therefore to quantify the contributions of soil fauna to fir (*Abies faxoniana*) leaf litter decomposition during the freeze-thaw season.

Methods A field experiment using litterbags was conducted in an alpine fir forest from October 2010 to April 2011. Samples of air-dried fir leaf litter were placed in nylon litterbags (20 cm × 20 cm, 10 g per bag), and the edges were sealed. We investigated mass loss rates in litterbags with different mesh sizes (0.020, 0.125, 1.000 and 3.000 mm) and simultaneously analyzed contributions of micro-, meso- and macro-fauna to leaf litter decomposition.

Important findings Over the freeze-thaw season, the mass loss rates in litterbags with different mesh sizes were 12.13% (0.020 mm), 13.07% (0.125 mm), 14.95% (1.000 mm) and 18.74% (3.000 mm). Contribution percentages of all three body-size soil faunas were about 35.28%. Mass loss rates of fir leaf litter appeared consistent with the taxa and individual relative density of soil fauna. Contribution percentages of mass loss rates showed the order as micro- < meso- < macro-fauna during the three stages of the freeze-thaw season. The highest contribution percentages of micro-fauna (6.56%), meso-fauna (11.77%) and macro-fauna (21.94%) were detected at DF, OF and TS stage, respectively. However, the contribution percentages of meso- and macro-fauna during the DF stage

were lower than the other two stages. The results demonstrated that soil fauna played an important role in litter decomposition during the freeze-thaw season in alpine forests of western China.

Key words *Abies faxoniana* leaf litter, alpine forest, freeze-thaw season, mass loss, soil fauna

凋落物分解是森林生态系统的重要组成部分, 其对于森林生态系统的结构和功能具有至关重要的作用(Seastedt, 1984; Chapin *et al.*, 2002; Duffy, 2002; 陈瑾等, 2011)。气候条件、凋落物质量和分解者群落等多种因素综合影响着凋落物分解的整个生态过程(Singh *et al.*, 1999; Smith & Bradford, 2003; Garcia-Pausas *et al.*, 2004)。土壤动物通过直接破碎、取食凋落物, 或者间接地调节微生物的活性和群落结构, 极大地控制着凋落物的分解(Anderson *et al.*, 1983; Read & Perez-Moreno, 2003; 杨效东和邹晓明, 2006)。然而, 土壤动物的群落组成和活性随着温度等环境因素的改变而发生变化(Swift *et al.*, 1979)。过去认为冬季作为“休眠期”, 期间的土壤动物对凋落物分解的贡献可以忽略。但是近年来研究发现, 高寒地区冬季雪被下仍然维持着相当数量、类群的土壤动物和明显的土壤动物活动(Diekötter *et al.*, 2010; Tan *et al.*, 2010), 可能对凋落物分解具有重要的贡献。加之, 季节性冻融期间温度的动态变化具有明显的阶段性特征, 显著影响了土壤动物的功能多样性和活性, 进而可能调控了冬季凋落物分解的生态过程(Aerts, 2006; Henry, 2008)。

岷江冷杉凋落物的分解是土壤分解者和植被之间养分循环的关键环节, 对川西高山森林的群落结构和功能的维持具有极其重要的作用(Yang *et al.*, 2005, 2006)。每年11月至次年4月, 伴随着气候的季节性变化, 岷江冷杉凋落物的分解表现出明显的季节性冻融特征, 土壤冻融时间长达5–6个月(杨万勤等, 2007; 邓仁菊等, 2009)。前期的研究发现, 季节性冻融期间凋落物分解明显地高于生长季节, 并且土壤动物活动频繁(Tan *et al.*, 2010; Wu *et al.*, 2010), 土壤动物可能对季节性冻融期间凋落物的分解具有重要贡献, 但相应的研究一直缺乏。因此, 我们采用凋落物分解袋法, 研究了季节性冻融期间不同体径土壤动物对不同冻融时期川西高山森林区最为典型的岷江冷杉(*Abies faxoniana*)凋落叶质量损失的贡献, 旨在为深入认识冬季高山森林凋落物分解的自然过程提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省理县毕棚沟(102°53′–102°57′ E, 31°14′–31°19′ N), 地处青藏高原东缘与四川盆地的过渡带。年降水量约850 mm, 年平均气温2–4 °C, 最高气温23 °C, 最低气温为–18 °C。季节性冻融期长达5–6个月, 冻融作用明显。研究区域的主要森林植被为岷江冷杉原始林, 乔木层主要由岷江冷杉、红桦(*Betula albosinensis*)和粗枝云杉(*Picea asperata*)组成(Wu *et al.*, 2010)。林下灌木主要有箭竹(*Fargesia spathacea*)、高山杜鹃(*Rhododendron delavayi*)、三颗针(*Berberis sargentiana*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、扁刺蔷薇(*Rosa weginzowii*)等; 草本植物主要有蟹甲草(*Cacalia* spp.)、高山冷蕨(*Cystopteris montana*)、薹草属和莎草属植物等。本实验选择具代表性的岷江冷杉原始林作为实验样地(海拔3 582 m, 坡向NE 45°, 坡度42°)。土壤为雏形土, 土层浅薄, 土体为A–C (A: 腐殖质层; B: 淀积层; C: 母质层)结构。土壤有机层厚(15 ± 2) cm, pH 6.2 (Wu *et al.*, 2010)。

1.2 试验设计和样品处理

根据基础调查和历年当地气象资料, 研究区每年11月初至次年4月中旬为土壤的季节性冻融期。2010年10月26日埋样后, 在固定样地内枯枝落叶层下和土壤表面之间埋设一个纽扣式温度记录仪(iButton DS1923-F5, Maxim/Dallas Semiconductor, Sunnyvale, CA, USA), 设定为每15 min记录一次数据。2010年10月底到2011年4月中旬样地土壤温度变化特征如图1所示。10月底至12月初为冻融初期, 12月初至3月初为深冻期, 3月初至4月中旬则为融化期。

2010年9月, 在研究地点的岷江冷杉森林群落内收集新鲜的岷江冷杉凋落叶, 将样品带回室内风干, 然后称取10 g, 分别装入各孔径的分解袋(20 cm × 20 cm)中。分解袋由两层尼龙网缝合而成, 贴地面层均采用0.020 mm孔径的尼龙网, 表面层分别采用孔径为0.020 mm (基本排除土壤动物)

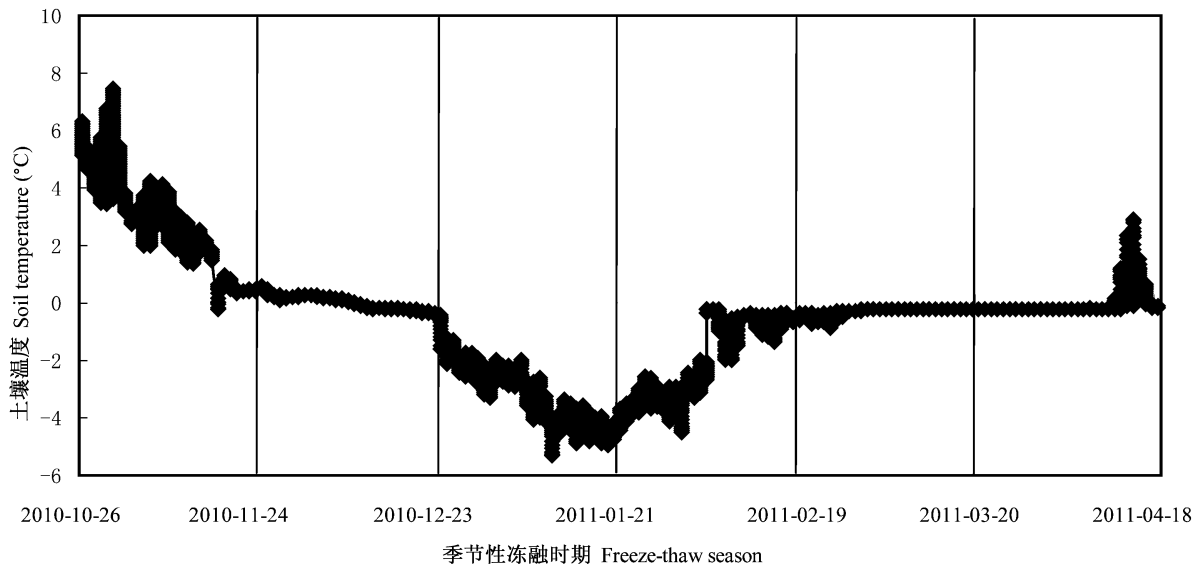


图1 季节性冻融期间样地土壤温度的动态变化(2010年10月26日至2011年4月18日)。

Fig. 1 Dynamic changes of soil temperature in the sampling site during the freeze-thaw season (from 26 October 2010 to 18 April 2011).

(Zwahlen *et al.*, 2007)、0.125 mm (基本排除中、大型土壤动物) (Zwahlen *et al.*, 2007)、1.000 mm (基本排除大型土壤动物) (Kampichler & Bruckner, 2009)和3.000 mm (基本允许所有土壤动物进入) (Crutsinger *et al.*, 2009)的尼龙网。另外,取相同重量(10 g)的风干叶9袋,在60–70 °C下烘干至恒重,由其推算出放置在网袋内样品的初始干重。2010年10月26日,在样地内设置5个取样点(50 m × 50 m),每个样点之间相隔10 m,每个样点内包括0.020 mm、0.125 mm、1.000 mm和3.000 mm孔径的凋落物分解袋各9袋于地表,季节性冻融前一次布置。季节性冻融期间(冻融初期的2010年12月23日、深冻期的2011年3月1日和融化期的2011年4月18日各采样一次)每次随机从每个样点内取回4种孔径的分解袋各3袋,所采的分解袋装入密封而又透气的土壤动物收集袋低温保存,迅速带回室内,先将袋外泥土轻轻去除,然后将袋内分解基质全部取出放置于解剖盘中,拣去其中的大型土壤动物,之后将材料放置于Tullgren式干漏斗中分离提取中小型土壤动物。将凋落物置于60–70 °C下烘干至恒重,并获取干重数据(尹文英等, 1998; Yang & Chen, 2009)。

1.3 计算与统计分析

各孔径内凋落物的质量损失率及各类型土壤动

物对凋落物质量损失的贡献计算公式(Yang & Chen, 2009; Wu *et al.*, 2010)如下:

$$\text{不同孔径网袋内凋落物的质量损失率 } L_t (\%) = 100 \times (M_0 - M_t) / M_0$$

$$\text{不同体径土壤动物作用的凋落物质量损失率 } C_{\text{fauna}} (\%) = (L_{bt} - L_{st}) - (L_{b0} - L_{s0})$$

$$\text{不同体径土壤动物对凋落物质量损失的贡献率 } P_{\text{fauna}} (\%) = 100 \times C_{\text{fauna}} / (L_{3t} - L_{30})$$

$$\text{季节性冻融期间土壤动物对凋落物质量损失的总贡献率 } P_{\text{total}} (\%) = 100 \times (L_3 - L_{0.02}) / L_3$$

式中: M_0 为凋落袋埋置前的烘干凋落物质量; M_t 为各孔径内的干凋落物残留量; $(L_{bt} - L_{st})$ 为最近一次采样相邻网孔大小凋落物袋质量损失率差; $(L_{b0} - L_{s0})$ 为上一次采样相邻网孔大小凋落物袋质量损失率差; L_{3t} 为最近一次采样3.000 mm孔径凋落物袋质量损失率; L_{30} 为上一次采样3.000 mm孔径凋落物袋质量损失率; L_3 为最后一次采样3.000 mm孔径凋落物袋质量损失率; $L_{0.02}$ 为最后一次采样0.020 mm孔径凋落物袋质量损失率。

数据统计与分析采用SPSS 11.5和Excel完成,单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)多重比较季节性冻融期间各孔径内凋落叶

的质量损失率, 以及微型、中型和大型土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失率的贡献。

2 结果和分析

2.1 岷江冷杉凋落叶的质量损失率

整个季节性冻融期间, 不同孔径凋落物分解袋内岷江冷杉凋落叶的质量损失率分别为12.13% (0.020 mm孔径) < 13.07% (0.125 mm孔径) < 14.95% (1.000 mm孔径) < 18.74% (3.000 mm孔径) (图2)。3个时期中凋落叶质量损失率也表现为随孔径的增大而增加的趋势。融化期各孔径凋落物袋内凋落叶的质量损失率显著高于冻融初期和深冻期的 ($p < 0.05$)。尽管不同孔径分解袋内的凋落叶质量损失率在冻融初期和深冻期并无显著差异, 但在融化期, 3.000 mm孔径凋落物袋内凋落叶质量损失率显著 ($p < 0.05$) 大于0.020 mm和0.125 mm孔径的凋落物袋内的凋落叶质量损失率。

2.2 土壤动物群落特征与凋落叶质量损失

不同孔径凋落物袋内土壤动物的类群和个体相对密度与岷江冷杉凋落叶的质量损失率呈现出相对一致的变化趋势(图3)。由冻融初期到深冻期, 随着土壤动物的类群和个体相对密度降低, 各孔径的凋落物袋内凋落叶质量损失率也呈现出增长变缓的趋势; 然而经过深冻期到融化期, 随着土壤动物的类群和个体相对密度的升高, 各孔径凋落物袋中的凋落叶质量损失率则呈现出增长加快的趋势。

2.3 微型、中型和大型土壤动物作用的凋落叶质量损失率和贡献率

季节性冻融期间土壤动物作用的凋落叶质量损失率均为微型土壤动物 < 中型土壤动物 < 大型土壤动物(图4)。在冻融初期, 大型土壤动物的作用显著高于微型土壤动物的, 而在融化期大型土壤动物的作用显著高于微型和中型土壤动物的 ($p < 0.05$)。不同冻融时期, 各类型土壤动物均以融化期作用最为明显, 而深冻期土壤动物的作用最小, 且中型和大型土壤动物在融化期作用的质量损失率显著高于两者在深冻期的作用 ($p < 0.05$)。

不同冻融时期不同体径土壤动物对凋落叶质量损失的贡献率也呈现出微型土壤动物 < 中型土壤动物 < 大型土壤动物(图5)。在冻融初期和深冻期, 大型土壤动物的贡献率显著高于微型土壤动物的, 而在融化期大型土壤动物的贡献率显著高于微型和中型

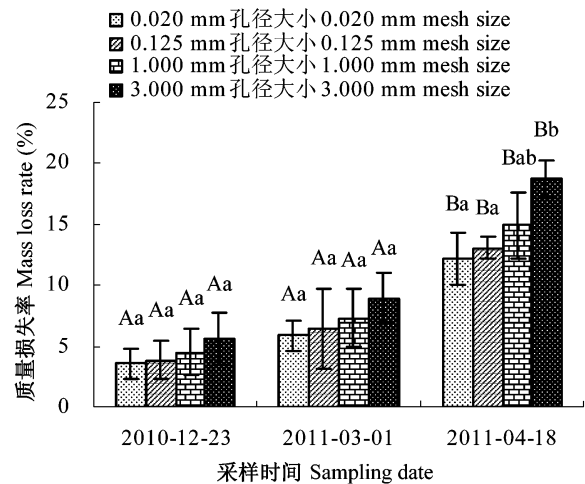


图2 季节性冻融期间各孔径网袋岷江冷杉凋落叶的质量损失率(平均值±标准误差, $n = 5$)。不同大写字母表示同一孔径、不同分解期的差异显著 ($p < 0.05$); 不同小写字母表示相同分解期、不同孔径间差异显著 ($p < 0.05$)。

Fig. 2 Mass loss rates of *Abies faxoniana* leaf litter in litterbags with different mesh sizes during the freeze-thaw season (mean \pm SE, $n = 5$). Different capital letters indicate significant difference ($p < 0.05$) among the different decomposition stages for the same mesh size; Different small letters indicate significant difference ($p < 0.05$) among the different mesh sizes within the same decomposition stage.

土壤动物的 ($p < 0.05$)。大型土壤动物在融化期的贡献率最高为21.94%, 中型土壤动物在冻融初期的贡献率最高为11.77%, 微型土壤动物在深冻期的贡献率最高为6.56%。相对于其他两个冻融时期, 深冻期中型和大型土壤动物的贡献率最低。

3 讨论

深入了解高山或高海拔地区季节性冻融期间土壤动物对凋落物分解的贡献, 对于认识冬季凋落物分解的整个生态过程具有重要意义(Aerts, 2006)。由于调查方法的局限性和对冬季土壤生态过程的理解不够, 仅有极少研究关注到季节性冻融期间土壤动物对森林生态系统过程的影响(Yang *et al.*, 2006)。本项研究结果发现, 整个季节性冻融期间不同孔径分解袋内的岷江冷杉凋落叶质量损失率分别是12.13% (0.020 mm孔径)、13.07% (0.125 mm孔径)、14.95% (1.000 mm孔径)和18.74% (3.000 mm孔径), 这与前期对季节性冻融期间岷江冷杉凋落物分解的研究结果相一致(Wu *et al.*, 2010)。三种不同体径的土壤动物对季节性冻融期间凋落叶质量损失的总贡

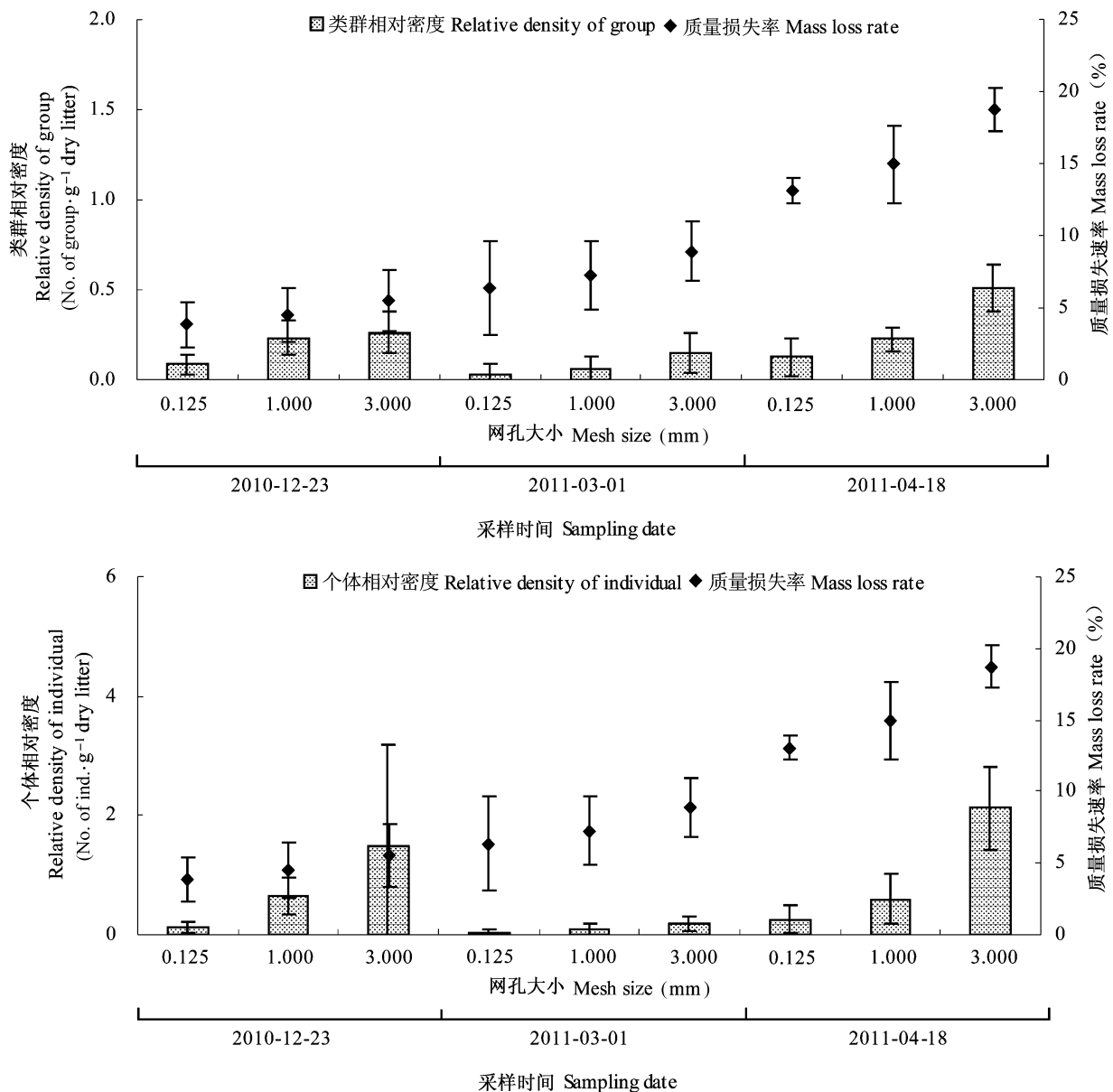


图3 岷江冷杉凋落叶质量损失率、土壤动物的类群和个体相对密度变化(平均值±标准误差, n = 5)。
 Fig. 3 Variations of mass loss rates of *Abies faxoniana* leaf litter, taxa and individual relative density of soil fauna (mean ± SE, n = 5).

献率为35.28%。这表明,土壤动物活动是季节性冻融期间凋落物分解的重要生物因素之一。此外,相对于中型和微型土壤动物,大型土壤动物对冬季凋落物分解的贡献更为显著。并且,土壤动物对冬季岷江冷杉凋落物分解的贡献率还与土壤冻融时期有关,在季节性冻融的各个时期,大型土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率显著高于微型土壤动物的。相对于其他两个冻融时期,深冻期中型和大型土壤动物的贡献率最低,这可能与季节性冻融

期间不同冻融阶段的冻融特征的差异有关。

气候条件、凋落物质量和分解者群落是调控凋落物分解速率的3个关键因素(Meentemeyer, 1978, 1984; Cadish & Giller, 1997; 徐振锋等, 2009)。本研究表明,不同孔径的凋落物袋内土壤动物的类群和个体相对密度与岷江冷杉凋落叶的质量损失率呈现出相对一致的变化趋势。从冻融初期到深冻期,由于温度的降低,冻结作用的加强,随着土壤动物的类群和个体相对密度的降低,各孔径凋落物袋内凋

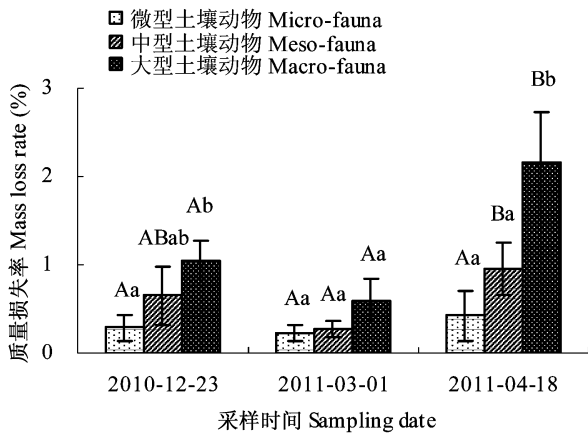


图4 微型、中型和大型土壤动物作用的岷江冷杉凋落叶质量损失率(平均值±标准误差, $n = 5$)。不同大写字母表示同一类型土壤动物、不同分解期的差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示相同分解期、不同土壤动物间差异显著($p < 0.05$)。
Fig. 4 Mass loss rates of *Abies faxoniana* leaf litter as driven by micro-, meso- and macro-fauna (mean ± SE, $n = 5$). Different capital letters indicate significant difference ($p < 0.05$) among the different decomposition stages for the same body size of soil fauna; Different small letters indicate significant difference ($p < 0.05$) among the different body sizes of soil fauna within the same decomposition stage.

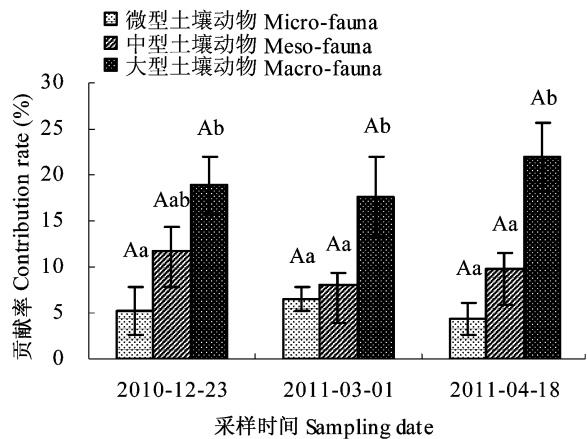


图5 微型、中型和大型土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率(平均值±标准误差, $n = 5$)。不同大写字母表示同一类型土壤动物、不同分解期的差异显著($p < 0.05$); 不同小写字母表示相同分解期、不同土壤动物间差异显著($p < 0.05$)。
Fig. 5 Contribution rates (%) of micro-, meso- and macro-fauna to the mass loss of *Abies faxoniana* leaf litter (mean ± SE, $n = 5$). Different capital letters indicate significant difference ($p < 0.05$) among the different decomposition stages for the same body size of soil fauna; Different small letters indicate significant difference ($p < 0.05$) among the different body sizes of soil fauna within the same decomposition stage.

落叶质量损失率也呈现出增长变缓的趋势, 经过深深冻期到融化期, 由于温度的升高, 冻结作用的减弱,

随着土壤动物的类群和个体相对密度的升高, 各孔径凋落物袋内凋落叶质量损失率则呈现出增长加快的趋势。这进一步证明了土壤动物是季节性冻融期间岷江冷杉凋落叶质量损失的重要因素之一。然而, 除土壤动物对凋落物质量损失具有重要贡献外, 微生物活动和淋溶作用也可直接导致凋落物质量损失, 但相关研究还需要进一步深入。

同时, 研究还发现高山森林季节性冻融期间存在相当数量和类群的土壤动物(Tan *et al.*, 2010)。一方面随着网孔的增大, 土壤动物破碎的凋落物更容易从分解袋中遗漏(雨水淋溶, 蚯蚓、蚂蚁等的取食和搬运, 采样渗漏); 另一方面网孔的变化将改变分解袋内的微气候环境和生物的活性, 从而加速凋落物的分解(Bradford *et al.*, 2002)。因此, 在季节性冻融的3个阶段岷江冷杉凋落叶的质量损失率均随着凋落物袋孔径的增大而增加。尽管新鲜凋落物为土壤动物提供了相对丰富的底物, 但不同营养类群的土壤动物常常出现在凋落物分解的不同阶段(Berg *et al.*, 1998; Hunter *et al.*, 2003), 使得某些土壤动物类群可能在凋落物分解初期缺失(Heemsbergen *et al.*, 2004), 因而在冻融初期土壤动物对岷江冷杉凋落物质量损失的贡献并不显著。深冻期温度较低, 极大地限制了大多数分解者的活性(Bokhorst *et al.*, 2010), 致使土壤动物在此时期对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献也不明显。相反, 随着融化期温度的回升(图1), 3.000 mm孔径的网袋内土壤动物个体和类群的相对密度也增加至最高值(图3)。土壤动物对凋落物进行更多的破碎、养分的释放和重新分配, 同时调整其自身的活性(Campbell *et al.*, 2005; Wall *et al.*, 2008), 使得3.000 mm孔径的凋落物袋内土壤动物对岷江冷杉凋落叶分解的作用最强, 在融化期3.000 mm孔径凋落物袋内的质量损失率显著高于0.020 mm和0.125 mm孔径的凋落物袋中的。

不同体径大小的土壤动物能够通过地下食物网和生态系统过程的联系显著改变凋落物的分解速率(Wardle *et al.*, 2004), 对于描述土壤动物群落结构对凋落物分解的影响具有重要意义(Heneghan & Bolger, 1996; González & Seastedt, 2001; Wang *et al.*, 2010; Meyer *et al.*, 2011)。尽管中型和大型土壤动物间接地抑制了微型土壤动物、真菌和细菌对凋落物的分解, 但中型和大型土壤动物的存在还是增加了凋落物的分解速率(Bradford *et al.*, 2002), 因而季节

性冻融期间土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率均为微型土壤动物<中型土壤动物<大型土壤动物。并且在季节性冻融的各个时期, 大型土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率显著高于微型土壤动物, 这主要归因于以下几个方面: 首先, 大型土壤动物通过直接破碎凋落物, 增加微生物可利用的表面积(Swift *et al.*, 1979; Lavelle *et al.*, 1997); 其次, 大型或中型土壤动物可取食细菌、真菌, 以影响微生物的群落结构(Hedlund & Augustsson, 1995); 此外, 肉食性或植食性土壤动物通过调节其他类群的群落结构或改变微环境条件(Doblas-Miranda *et al.*, 2007)等, 直接或者间接地影响凋落物的分解。然而, 深冻期温度较低, 极大地抑制了中型和大型土壤动物的活性(Bokhorst *et al.*, 2010), 致使中型和大型土壤动物对凋落物的分解作用减弱, 中型和大型土壤动物在深冻期对凋落叶质量损失的贡献率最低。同时, Brooks等(1999)和Groffman等(2001)发现冬季微生物的活性异常之高。微型土壤动物可能比中型和大型土壤动物受到的温度抑制小或者更加适宜低温环境, 因此相对于其他两个时期, 微型土壤动物在深冻期的贡献率最高。然而, 由于冻融初期中型土壤动物类群数较多(图3), 且晚秋到初冬时期新鲜凋落物为大多数分解者提供了丰富的食物来源(Bokhorst *et al.*, 2010; Gavazov, 2010), 因此, 相对于其他冻融时期, 冻融初期中型土壤动物在冻融初期的贡献率最高。晚冬到初春温度升高(图1), 大型土壤动物可能更加响应于温度变化, 其活性也随之升高(Aerts, 2006)。故相对于其他冻融时期, 融化期大型土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率最高。

综上所述, 川西高山季节性冻融期间土壤动物对岷江冷杉凋落叶分解具有显著贡献, 且冻融初期、深冻期和融化期3个时期的冻融特征明显影响了土壤动物群落。季节性冻融期间土壤动物对岷江冷杉凋落叶质量损失的贡献率均为微型土壤动物<中型土壤动物<大型土壤动物, 并且相对于冻融初期和融化期, 中型和大型土壤动物在深冻期对凋落叶质量损失的贡献率最低。尽管这些结果出现的机制还有待进一步深入, 但是无可否认的是季节性冻融期间土壤动物活动显著影响了凋落物分解过程, 这为深入认识川西高寒地区凋落物分解过程提供了重要的科学依据。

致谢 国家自然科学基金(30771702和31000213)、教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-07-0592)、四川省科技支撑计划项目(2010NZ0051)和教育部博士点基金(20105103110002)资助。感谢四川农业大学生态林业研究所的谭波博士在室内分析工作中给予的帮助。

参考文献

- Aerts R (2006). The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 94, 713–724.
- Anderson JM, Ineson P, Huish SA (1983). Nitrogen and cation mobilization by soil fauna feeding on leaf litter and soil organic matter from deciduous woodlands. *Soil Biology & Biochemistry*, 15, 463–467.
- Berg MP, Kniese JP, Verhoef HA (1998). Dynamics and stratification of bacteria and fungi in the organic layers of a Scots pine forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, 26, 313–322.
- Bokhorst S, Bjerke JW, Melillo J, Callaghan TV, Phoenix GK (2010). Impacts of extreme winter warming events on litter decomposition in a sub-Arctic heathland. *Soil Biology & Biochemistry*, 42, 611–617.
- Bradford MA, Tordoff GM, Eggers T, Jones TH, Newington JE (2002). Microbiota, fauna, and mesh size interactions in litter decomposition. *Oikos*, 99, 317–323.
- Brooks PD, Campbell DH, Tonnessen KA, Heuer K (1999). Natural variability in N export from headwater catchments: snow cover controls on ecosystem N retention. *Hydrological Processes*, 13, 2191–2201.
- Cadisch G, Giller KE (1997). *Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition*. CAB International, Wallingford.
- Campbell JL, Mitchell MJ, Groffman PM, Christenson LM, Hardy JP (2005). Winter in northeastern North America: a critical period for ecological processes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 3, 314–322.
- Chapin FS III, Mooney HA, Chapin MC, Matson PA (2002). *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*. Springer, New York.
- Chen J (陈瑾), Li Y (李扬), Huang JH (黄建辉) (2011). Decomposition of mixed litter of four dominant species in an Inner Mongolia steppe. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 35, 9–16. (in Chinese with English abstract)
- Crutsinger GM, Sanders NJ, Classen AT (2009). Comparing intra- and inter-specific effects on litter decomposition in an old-field ecosystem. *Basic and Applied Ecology*, 10, 535–543.
- Deng RJ (邓仁菊), Yang WQ (杨万勤), Feng RF (冯瑞芳), Hu JL (胡建利), Qin JL (秦嘉励), Xiong XJ (熊雪晶) (2009). Mass loss and element release of litter in the subalpine

- forest over one freeze-thaw season. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 29, 5731–5735. (in Chinese with English abstract)
- Diekötter T, Wamser S, Wolters V, Birkhofer K (2010). Landscape and management effects on structure and function of soil arthropod communities in winter wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 137, 108–112.
- Doblas-Miranda E, Sánchez-Piñ F, González-Megías A (2007). Soil macroinvertebrate fauna of a Mediterranean arid system: composition and temporal changes in the assemblage. *Soil Biology & Biochemistry*, 39, 1916–1925.
- Duffy JE (2002). Biodiversity and ecosystem function: the consumer connection. *Oikos*, 99, 201–219.
- García-Pausas J, Casals P, Romanyà J (2004). Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. *Soil Biology & Biochemistry*, 36, 989–997.
- Gavazov KS (2010). Dynamics of alpine plant litter decomposition in a changing climate. *Plant and Soil*, 337, 19–32.
- González G, Seastedt TR (2001). Soil fauna and plant litter decomposition in tropical and subalpine forests. *Ecology*, 82, 955–964.
- Groffman PM, Driscoll CT, Fahey TJ, Hardy JP, Fitzhugh RD, Fierney GL (2001). Effects of mild winter freezing on soil nitrogen and carbon dynamics in a northern hardwood forest. *Biogeochemistry*, 56, 191–213.
- Hedlund K, Augustsson A (1995). Effects of enchytraeid grazing on fungal growth and respiration. *Soil Biology & Biochemistry*, 27, 905–909.
- Heemsbergen DA, Berg MP, Loreau M, van Hal JR, Faber JH, Verhoef HA (2004). Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. *Science*, 306, 1019–1020.
- Heneghan L, Bolger T (1996). Effect of components of ‘acid rain’ on the contribution of soil microarthropods to ecosystem function. *Journal of Applied Ecology*, 33, 1329–1344.
- Henry HAL (2008). Climate change and soil freezing dynamics: historical trends and projected changes. *Climatic Change*, 87, 421–434.
- Hunter MD, Adl S, Pringle CM, Coleman DC (2003). Relative effects of macroinvertebrates and habitat on the chemistry of litter during decomposition. *Pedobiologia*, 47, 101–115.
- Kampichler C, Bruckner A (2009). The role of microarthropods in terrestrial decomposition: a meta-analysis of 40 years of litterbag studies. *Biological Reviews*, 84, 375–389.
- Lavelle P, Bignell D, Lepage M, Wolters V, Roger P, Ineson P, Heal OW, Dhillon S (1997). Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystem engineers. *European Journal of Soil Biology*, 33, 159–193.
- Meentemeyer V (1978). Microclimate the lignin control of litter decomposition rates. *Ecology*, 59, 465–472.
- Meentemeyer V (1984). The geography of organic decomposition rates. *Annals of the Association of American Geographers*, 74, 551–560.
- Meyer WM III, Ostertag R, Cowie RH (2011). Macro-invertebrates accelerate litter decomposition and nutrient release in a Hawaiian rainforest. *Soil Biology & Biochemistry*, 43, 206–211.
- Read DJ, Perez-Moreno J (2003). Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems—a journey towards relevance? *New Phytologist*, 157, 475–492.
- Seastedt TR (1984). The role of microarthropods in decomposition and mineralization processes. *Annual Review of Entomology*, 29, 25–46.
- Singh KP, Singh PK, Tripathi SK (1999). Litterfall, litter decomposition and nutrient release patterns in four native tree species raised on coal mine spoil at Singrauli, India. *Biology and Fertility of Soils*, 29, 371–378.
- Smith VC, Bradford MA (2003). Litter quality impacts on grassland litter decomposition are differently dependent on soil fauna across time. *Applied Soil Ecology*, 24, 197–203.
- Swift MJ, Heal OW, Anderson JM (1979). *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Tan B, Wu FZ, Yang WQ, Liu L, Yu S (2010). Characteristics of soil animal community in the subalpine/alpine forests of western Sichuan during onset of freezing. *Acta Ecologica Sinica*, 30, 93–99.
- Wall D, Bradford MA, John MGST, Trofymow JA, Behan-Pelletier V, Bignell DE, Dangerfield JM, Parton WJ, Rusek J, Voigt W, Wolters V, Gardel HZ, Ayuke FO, Bashford R, Beljakova OI, Bohlen PJ, Brauman A, Flemming S, Henschel JR, Johnson DL, Jones TH, Kovarova M, Kranabetter JM, Kutny L, Lin KC, Maryati M, Masse D, Pokarzhevskii A, Rahman H, Sabar MG, Salamon JA, Swift MJ, Varela A, Vasconcelos HL, White D, Zou XM (2008). Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. *Global Change Biology*, 14, 2661–2677.
- Wang SJ, Ruan HH, Han Y (2010). Effects of microclimate, litter type, and mesh size on leaf litter decomposition along an elevation gradient in the Wuyi Mountains, China. *Ecological Research*, 25, 1113–1120.
- Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, Setälä H, van der Putten WH, Wall DH (2004). Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 304, 1629–1633.
- Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, Deng RJ (2010). Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. *Acta Oecologica*, 36, 135–140.
- Xu ZF (徐振锋), Yin HJ (尹华军), Zhao CZ (赵春章), Cao G (曹刚), Wan ML (万名利), Liu Q (刘庆) (2009). A review of responses of litter decomposition in terrestrial ecosystems to global warming. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 33, 1208–1219. (in Chinese with English abstract)

abstract)

- Yang WQ (杨万勤), Feng RF (冯瑞芳), Zhang J (张健), Wang KY (王开运) (2007). Carbon stock and biochemical properties in the organic layer and mineral soil under three subalpine forests in Western China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 27, 4157–4165. (in Chinese with English abstract)
- Yang WQ, Wang KY, Kellomäki S, Gong HD (2005). Litter dynamics of three subalpine forests in Western Sichuan. *Pedosphere*, 15, 653–659.
- Yang WQ, Wang KY, Kellomäki S, Zhang J (2006). Annual and monthly variations in litter macronutrients of three subalpine forests in western China. *Pedosphere*, 16, 788–798.
- Yang XD, Chen J (2009). Plant litter quality influences the contribution of soil fauna to litter decomposition in humid tropical forests, southwestern China. *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 910–918.
- Yang XD (杨效东), Zou XM (邹晓明) (2006). Soil fauna and leaf litter decomposition in tropical rain forest in Xishuangbanna, SW China: effects of mesh size of litterbags. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)* (植物生态学报), 30, 791–801. (in Chinese with English abstract)
- Yin WY (尹文英), Hu SH (胡圣豪), Shen YF (沈韞芬), Ning YZ (宁应之), Sun XD (孙希达), Wu JH (吴纪华), Zhuge Y (诸葛燕), Zhang YM (张云美), Wang M (王敏), Chen JY (陈建英), Xu CG (徐成纲), Liang YL (梁彦龄), Wang HZ (王洪铸), Yang T (杨潼), Chen DN (陈德牛), Zhang GQ (张国庆), Song DX (宋大祥), Chen J (陈军) (1998). *Pictorial Keys to Soil Animals of China* (中国土壤动物检索图鉴). Science Press, Beijing. (in Chinese)
- Zwahlen C, Hilbeck A, Nentwig W (2007). Field decomposition of transgenic Bt maize residue and the impact on non-target soil invertebrates. *Plant and Soil*, 300, 245–257.

责任编辑: 傅声雷 责任编辑: 王 葳