

川西亚高山森林凋落物分解初期土壤动物 对红桦凋落叶质量损失的贡献*

夏磊 吴福忠 杨万勤** 谭波

(四川农业大学生态林业研究所林业生态工程重点实验室, 成都 611130)

摘要 2010年10月26日—2011年4月18日在川西亚高山地区季节性冻融期间,选择典型的红桦-岷江冷杉林,采用凋落物分解袋法调查了不同网孔(0.02、0.125、1和3 mm)凋落物分解袋内的凋落物质量损失,分析微型、中型和大型土壤动物对红桦凋落叶分解的贡献.结果表明:在季节性冻融期间,0.02、0.125、1和3 mm分解袋内的红桦凋落叶质量损失率分别为11.8%、13.2%、15.4%和19.5%,不同体径土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率为39.5%;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的变化趋势相对一致.在季节性冻融的初期、深冻期和融化期,不同土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率为大型土壤动物(22.7%)>中型土壤动物(11.9%)>微型土壤动物(7.9%).季节性冻融期间土壤动物活动是影响川西亚高山森林凋落物分解的重要因素之一.

关键词 季节性冻融 红桦凋落叶 土壤动物 质量损失率 亚高山森林

文章编号 1001-9332(2012)02-0301-06 **中图分类号** S718 **文献标识码** A

Contribution of soil fauna to the mass loss of *Betula albosinensis* leaf litter at early decomposition stage of subalpine forest litter in western Sichuan. XIA Lei, WU Fu-zhong, YANG Wan-qin, TAN Bo (Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecological Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2012, 23(2): 301–306.

Abstract: In order to quantify the contribution of soil fauna to the decomposition of birch (*Betula albosinensis*) leaf litter in subalpine forests in western Sichuan of Southwest China during freeze-thaw season, a field experiment with different mesh sizes (0.02, 0.125, 1 and 3 mm) of litterbags was conducted in a representative birch-fir (*Abies faxoniana*) forest to investigate the mass loss rate of the birch leaf litter from 26 October, 2010 to 18 April, 2011, and the contributions of micro-, meso- and macro-fauna to the decomposition of the leaf litter. Over the freeze-thaw season, 11.8%, 13.2%, 15.4% and 19.5% of the mass loss were detected in the litterbags with 0.02, 0.125, 1 and 3 mm mesh sizes, respectively. The total contribution of soil fauna to the litter decomposition accounted for 39.5% of the mass loss, and the taxa and individual relative density of the soil fauna in the litterbags had the similar variation trend with that of the mass loss rate. The contribution rate of soil fauna to the leaf litter mass loss showed the order of micro- < meso- < macro-fauna, with the highest contribution of micro-fauna (7.9%), meso-fauna (11.9%), and macro-fauna (22.7%) at the onset of freezing stage, deeply frozen stage, and thawing stage, respectively. The results demonstrated that soil fauna played an important role in the litter decomposition in subalpine forests of western Sichuan during freeze-thaw season.

Key words: freeze-thaw season; *Betula albosinensis* leaf litter; soil fauna; mass loss rate; subalpine primary forest.

* 国家自然科学基金项目(31170423, 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项目(20105103110002)资助.

** 通讯作者. E-mail: scyangwq@163.com

2011-07-04 收稿, 2011-11-09 接受.

在中高纬度和高海拔地区,冬季森林凋落物的质量损失率高于生长季节^[1-2],其是否与土壤动物的贡献有关?这对于深入认识冬季凋落物分解的生态过程具有重要意义^[3-4].大型和中型土壤动物一方面直接取食、破碎凋落物,另一方面通过取食和排泄改变土壤微生物群落的结构和功能;而微型土壤动物取食直接参与凋落物分解的微生物,影响了其群落结构.这一生态过程将对凋落物分解产生直接或间接的影响^[5],同时,温度等环境因子的影响更强烈^[6-7].以往研究认为,冬季通常是土壤动物的“休眠期”,其对凋落物分解等土壤生态过程的贡献可以忽略.近年的研究发现,冬季仍然存在丰富的土壤动物类群和明显的土壤动物活动^[8-9],由此可能对凋落物分解有着重要贡献.而且季节性冻融期间温度的动态变化显著影响了土壤动物的组成和动态,进而可能调控了凋落物的分解过程^[10-11].

在川西亚高山地区每年的11月至次年4月,伴随着气候的季节性变化,土壤表现出明显的季节性冻融特征,冻融时间长达5~6个月^[12].研究季节性冻融期间土壤动物对凋落物分解的影响,对于认识凋落物分解的整个生态过程具有重要意义^[10].由于调查方法的限制,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^[13].笔者前期研究发现,在季节性冻融期间,土壤动物活动频繁,而且凋落物分解特征明显^[8,14],土壤动物可能对凋落物分解有着重要贡献.红桦(*Betula albosinensis*)是川西亚高山森林典型的优势植物种类,研究其凋落物分解过程是了解生态系统养分循环的关键,对该地区植被的群落结构和功能的维持具有重要作用^[12].为此,本文以川西亚高山典型的红桦凋落叶为对象,调查季节性冻融期间不同孔径凋落物分解袋内凋落物的质量损失率、不同体径土壤动物对红桦凋落叶分解的贡献,以期了解川西亚高山森林及其相似区域冬季凋落物分解过程提供科学依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

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,海拔2458~4619 m.该地区年平均气温2~4℃,最高气温23℃,最低气温-18℃,年降水量850 mm.土壤季节性冻融期长达5~6个月.研究区域主要森林植被随海拔分异为岷江冷杉(*Abies faxoniana*)原始林、岷江冷杉-红桦混

交林和岷江冷杉次生林,土壤为雏形土和新成土;林下灌木主要有箭竹(*Fargesia spathacea*)、马缨杜鹃(*Rhododendron delavayi*)、三颗针(*Berberis sargentiana*)、红毛花楸(*Sorbus rufopilosa*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、扁刺蔷薇(*Rosa sweginzowii*)等;草本主要有蟹甲草(*Cacalia* spp.)、高山冷蕨(*Cystopteris montana*),以及苔草属和莎草属植物等.

样地设在岷江冷杉-红桦混交林(102°54' E, 31°16' N,海拔3298 m)中.土壤为发育于坡积物上的雏形土,有机层厚(12±2) cm,土层浅薄,pH 6.6.乔木层以岷江冷杉和红桦为主,树龄约80 a,林下植被主要有:箭竹、野樱桃(*Prunus tatsienensis*)、三颗针、红毛花楸、蟹甲草、唐松草(*Thalictrum* spp.)等^[14].

1.2 试验设计与样品处理

根据基础调查和当地历年气象资料,研究区每年11月初至次年4月中旬为土壤季节性冻融期^[14].2010年10月26日埋样,然后在固定样地的枯枝落叶层下和土壤表面之间埋设一个iButton DS1923-F5 纽扣式温度记录器(Maxim Com. USA),根据2010年10月26日—2011年4月18日的日平均温度变化(图1),将融冻期分为冻融初期(10月底至12月初)、深冻期(2月初至翌年3月初)和融化期(3月初至4月中旬).

2010年9月,在研究地的红桦林群落内收集新鲜的红桦凋落叶,将样品带回室内风干,然后称取10 g 叶片,分别装入不同孔径的分解袋(20 cm×20 cm).分解袋采用上层面0.02 mm(基本排除土壤动物进入)^[15]、0.125 mm(基本排除中、大型土壤动物进入)^[15]、1 mm(基本排除大型土壤动物进

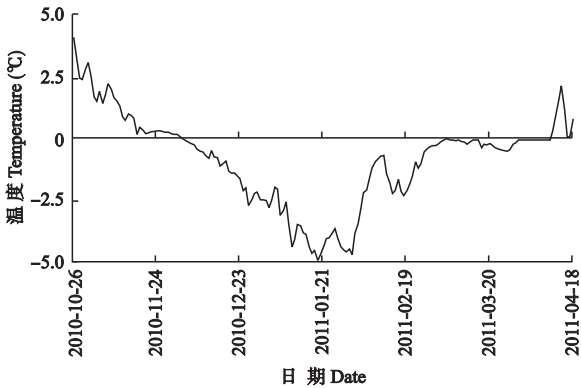


图1 季节性冻融期间样地土壤温度动态变化
Fig. 1 Dynamics of soil temperature in the study forests during the freeze-thaw season.

入)^[16]和 3 mm(允许所有土壤动物进入)^[17],下层面均采用 0.02 mm 孔径尼龙网袋作为分解袋进行试验.另外,取相同质量(10 g)风干叶 9 袋在 60~70℃下烘干至恒量,由其推算出网袋内样品的初始干质量.2010 年 10 月 26 日,在样地内设置 5 个 50 m×50 m 取样点,每个样点相隔 10 m,每个样点的地表放置 0.02、0.125、1 和 3 mm 孔径的凋落物分解袋各 9 袋,季节性冻融前 1 次布置,分别在 2010 年 12 月 23 日(冻融初期)、2011 年 3 月 1 日(深冻期)和 2011 年 4 月 18 日(融化期)收集凋落物袋.每次随机从每个样点内取回 4 种孔径分解袋各 3 袋.将收集的分解袋装入密封透气的土壤动物收集袋中低温保存,迅速带回室内,先将袋外泥土去除,然后将袋内分解基质全部取出放置于解剖盘中,手拣其中大型土壤动物,之后材料放置于 Tullgren 式干漏斗分离提取中小型土壤动物.清除已提取了土壤动物凋落叶上的泥土,将凋落物置于 60~70℃下烘干至恒量,并获取干质量数据^[18].

1.3 数据处理

各孔径内凋落物的质量损失率(L_t)及不同体径土壤动物作用的凋落物质量损失率(C_{fau})及对凋落物质量损失的贡献率(P_{fau})计算公式如下^[14,18]:

$$L_t = (M_0 - M_t) / M_0 \times 100\%$$
$$C_{\text{fau}} = (L_{\text{bt}} - L_{\text{st}}) - (L_{\text{b0}} - L_{\text{s0}})$$
$$P_{\text{fau}} = C_{\text{fau}} / (L_{3\text{t}} - L_{30}) \times 100\%$$

式中: M_0 为凋落物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; $(L_{\text{bt}} - L_{\text{st}})$ 为最近一次采样相邻网孔大小凋落物袋质量损失率的差; $(L_{\text{b0}} - L_{\text{s0}})$ 为上一次采样相邻网孔大小凋落物袋质量损失率的差; $L_{3\text{t}}$ 为最近一次采样 3 mm 孔径凋落物袋质量损失率; L_{30} 为上一次采样 3 mm 孔径凋落物袋质量损失率.

数据统计分析采用 SPSS 11.5 和 Excel 软件完成,采用单因素方差分析(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,以及不同类型土壤动物对红桦凋落叶质量损失率的影响.

2 结果与分析

2.1 冻融期间红桦凋落叶质量损失率的变化

在整个季节性冻融期间,不同孔径凋落物分解袋内红桦凋落叶的质量损失率分别为 11.8% (0.02 mm) < 13.2% (0.125 mm) < 15.4% (1 mm) < 19.5% (3 mm)(图2).随孔径的增大,3个时期中

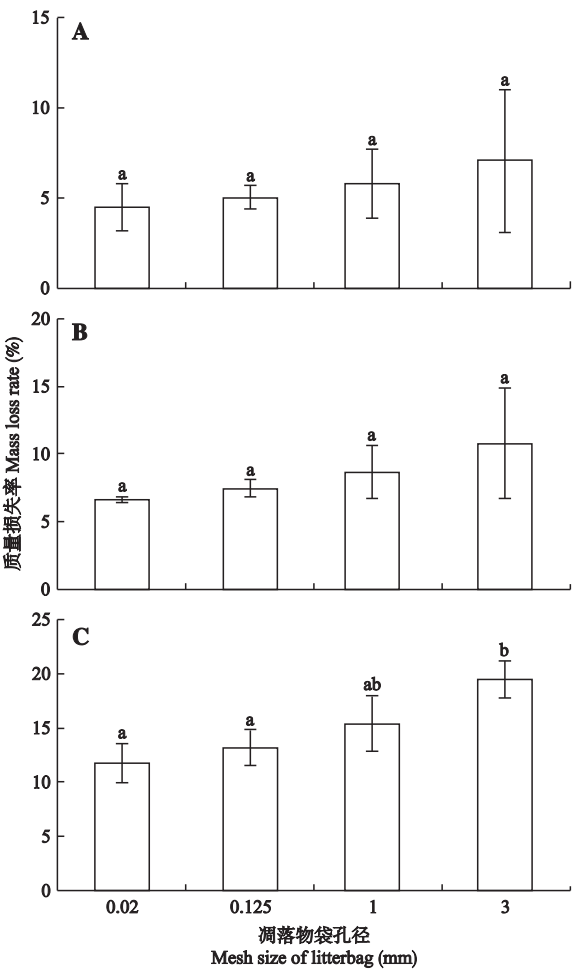


图2 季节性冻融期间红桦凋落叶的质量损失率
Fig. 2 Mass loss rates of birch leaf litter during the freeze-thaw season (mean±SE, n=5).
A) 冻融初期 Onset of freezing stage; B) 深冻期 Deeply frozen stage; C) 融化期 Thawing stage. 不同小写字母表示不同孔径间差异显著(P<0.05) Different small letters indicated significant difference among different mesh sizes at 0.05 level. 下同 The same below.

凋落叶质量损失率表现为增加的趋势,而且融化期各孔径分解袋内的质量损失率显著高于冻融初期和深冻期.在冻融初期和深冻期,不同孔径分解袋内凋落叶质量损失率无显著差异,但在融化期,3 mm 孔径凋落物袋内质量损失率显著大于 0.02 和 0.125 mm.

2.2 土壤动物密度对红桦凋落叶质量损失的影响

不同孔径凋落物袋内土壤动物的类群和个体相对密度与红桦凋落叶的质量损失率的变化趋势相一致(图3).由冻融初期到深冻期,随着土壤动物的类群(1 mm 除外)和个体相对密度降低,各孔径凋落物袋内凋落叶质量损失率呈现出增长变缓的趋势;而深冻期到融化期,随着土壤动物的类群和个体相对密度的升高,各孔径凋落叶质量损失率呈现出增

长加快的趋势。

2.3 不同类型土壤动物作用下凋落叶质量损失率和土壤动物的贡献率的变化

在季节性冻融期间,土壤动物对凋落叶质量损失率的影响大小顺序为:大型土壤动物>中型土壤动物>微型土壤动物,且大型土壤动物的作用显著高于微型土壤动物($P<0.05$) (图4)。融化期土壤动

物的作用最为明显,深冻期土壤动物的作用最小。
土壤动物对不同冻融期凋落叶质量损失的贡献率为:大型土壤动物>中型土壤动物>微型土壤动物 (图4)。在冻融初期和融化期,大型土壤动物的贡献率显著高于微型和中型土壤动物;在深冻期,微型、中型和大型土壤动物的贡献率具有显著差异($P<0.05$)。

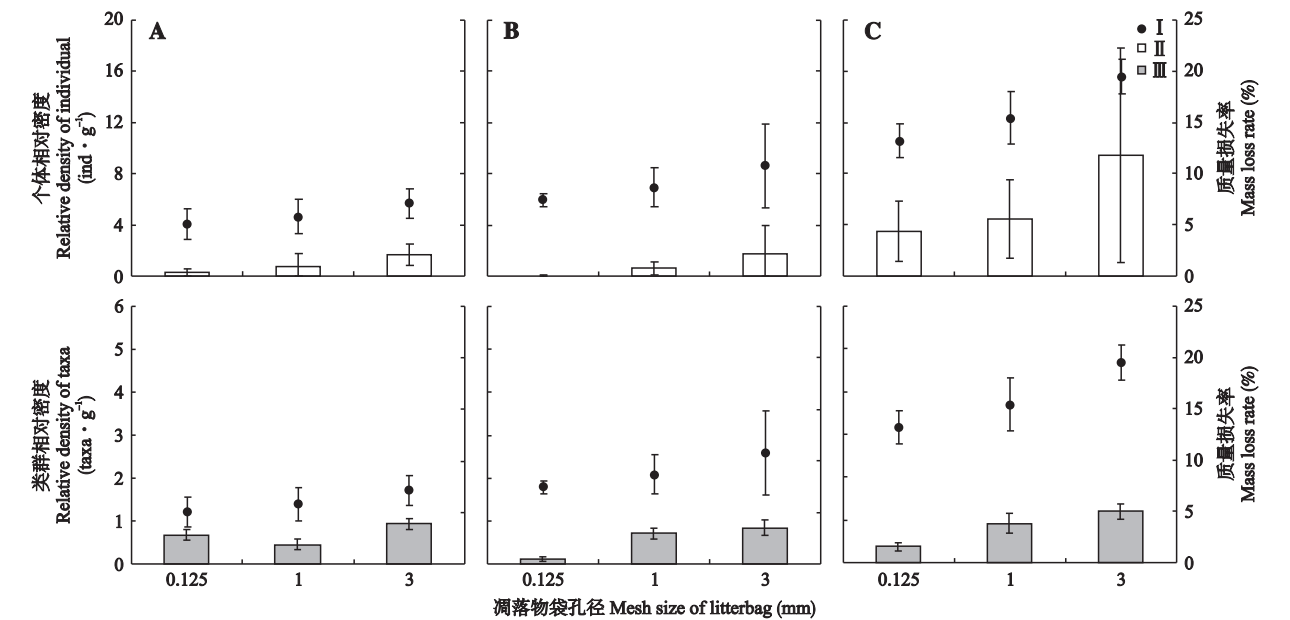


图3 分解袋中红桦凋落叶质量损失率、土壤动物的个体和类群相对密度的变化
Fig.3 Variation of mass loss rates of birch leaf litter, individual and taxa relative density of soil fauna in litterbags (mean±SE, $n=5$).
I:质量损失率 Mass loss rate; II:个体相对密度 Relative density of individual; III:类群相对密度 Relative density of taxa.

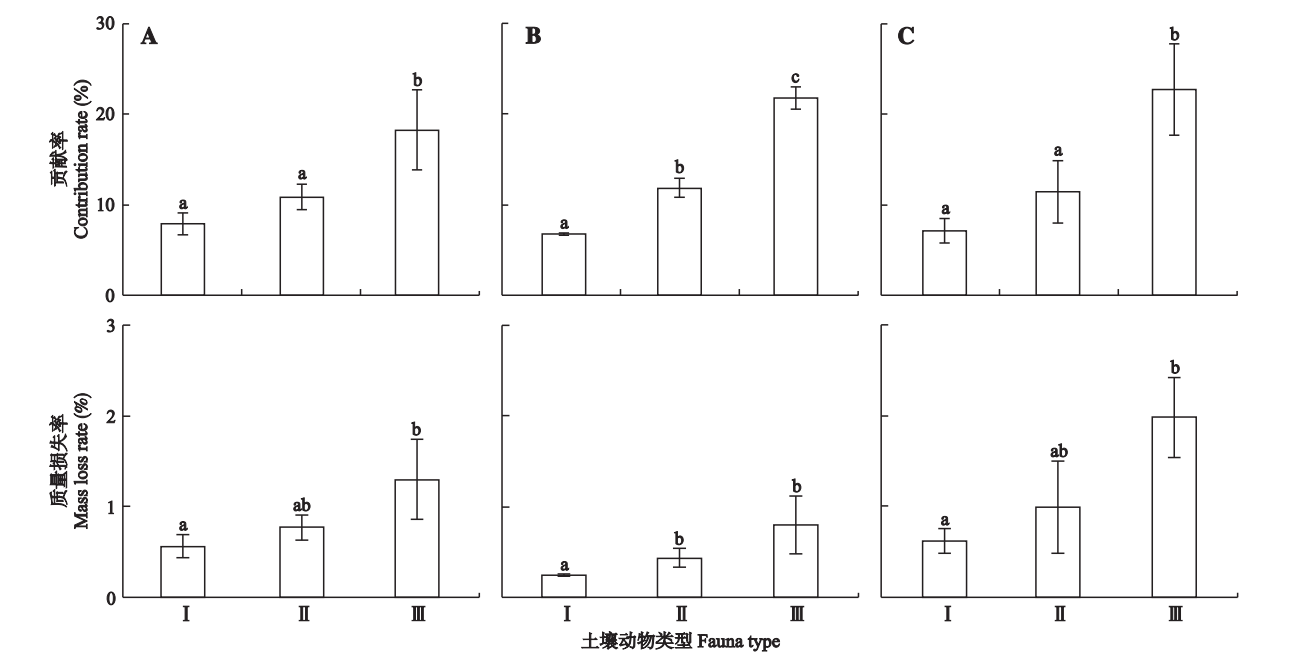


图4 不同类型土壤动物作用下红桦凋落叶的质量损失率和土壤动物的贡献率
Fig.4 Mass loss rates of birch leaf litter as driven by micro-, meso- and macro-fauna and contribution rates of soil fauna (mean±SE, $n=5$).
I:微型土壤动物 Micro-fauna; II:中型土壤动物 Meso-fauna; III:大型土壤动物 Macro-fauna.

3 讨 论

本研究表明,季节性冻融期间,不同孔径分解袋内的红桦凋落叶质量损失率分别为 11.8% (0.02 mm)、13.2% (0.125 mm)、15.4% (1 mm) 和 19.5% (3 mm),与前期的研究结果^[14]一致. 季节性冻融期间 3 种类型土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率为 39.5%,表明土壤动物是影响冻融期间凋落物分解的重要因素之一. 在冻融初期、深冻期和融化期 3 个时期中,土壤动物对凋落叶质量损失的贡献率均表现出:大型土壤动物>中型土壤动物>微型土壤动物,表明大型土壤动物对凋落物分解的贡献最为显著. 3 个时期中土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率存在显著差异,以深冻期对凋落物质量损失率的贡献率最低. 这可能与不同冻融阶段的冻融特征不同有关.

凋落物的分解速率受凋落物质量、环境条件和分解者群落 3 个因素控制^[19]. 在本研究中,不同孔径凋落物袋内土壤动物的类群和个体相对密度与红桦凋落叶质量损失率的变化趋势一致. 从冻融初期到深冻期,由于温度降低、冻结作用加强,土壤动物的类群(1 mm 除外)和个体相对密度降低,各孔径凋落物袋内凋落叶质量损失率呈现出增长变缓的趋势;而深冻期到融化期,由于温度升高、冻结作用减弱,土壤动物的类群和个体相对密度升高,各孔径凋落物袋内凋落叶质量损失率呈现出增长加快的趋势,进一步证明了季节性冻融期间土壤动物与红桦凋落叶质量损失密切相关. 前期研究发现,季节性冻融期间存在相当数量和类群的土壤动物^[8]. 这是因为随着网孔的增大,土壤动物破碎的凋落物更容易从分解袋中遗漏(如雨水淋溶,蚯蚓、蚂蚁等的取食和搬运,以及采样渗漏等);另一方面,网孔的变化会改变分解袋内微气候环境和生物活性^[20],因此各时期红桦凋落叶质量损失率均随孔径的增大而增加. 而在凋落物分解前期,尽管新鲜凋落物为土壤动物提供了相对丰富的食物,但不同功能类群的土壤动物常栖居于凋落物分解的不同阶段,可能在新鲜凋落物的分解阶段某些土壤动物类群会缺失^[21],故冻融初期土壤动物对凋落物分解的贡献并不大. 另外,由于深冻期的土温较低,极大地限制了大多数分解者的活性^[22],土壤动物对红桦凋落叶分解的作用也不明显. 因此在冻融初期和深冻期,各孔径凋落物袋内凋落叶的质量损失率均无显著差异. 随着融化期土温的上升(图 1),3 mm 网袋内土壤动物个体和

类群相对密度达到最大(图 3),土壤动物对凋落物进行更多的破碎、养分释放和重新分配,同时对其自身的活性进行调整^[23-24],对红桦凋落叶分解的作用增强,因而在融化期 3 mm 孔径凋落物袋内质量损失率显著大于 0.02 和 0.125 mm. 此外,温度升高引起融雪的淋滤作用增强,也导致融化期各孔径凋落物袋内红桦凋落叶的质量损失率显著高于冻融初期和深冻期.

不同类型土壤动物能够通过地下食物网和生态系统过程显著改变凋落物的分解速率^[25],这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^[6,26]. 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,但也增加了凋落物的分解速率^[20],因而季节性冻融期间土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率均呈现出:大型土壤动物>中型土壤动物>微型土壤动物的趋势. 这主要归因于以下几个方面:1) 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^[27];2) 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^[28];3) 肉食性或植食性的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^[29]等,直接或者间接地影响凋落物的分解. 所以,在季节性冻融的各个时期,大型土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率都显著高于微型土壤动物. 在冻融初期,微型土壤动物的类群数较高(图 3),而且中、大型土壤动物对微型土壤动物的抑制作用^[20]较冻结期和融化期小,微型土壤动物在冻融初期对红桦凋落叶质量损失的贡献率最高;在深冻期,由于气温较低,极大地抑制了微型、中型和大型土壤动物的活性^[22],致使其对红桦凋落叶质量损失的贡献率存在显著差异;在融化期,随着温度的上升,微型、中型和大型土壤动物的活性增加^[23-24],有利于大型土壤动物的活动,导致大型土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率显著高于微型和中型土壤动物.

综上所述,川西高山地区季节性冻融期间,土壤动物对红桦凋落叶的分解具有显著贡献,而冻融初期、深冻期和融化期的冻融特征明显影响了土壤动物群落的组成. 季节性冻融期间土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献率均为:大型土壤动物>中型土壤动物>微型土壤动物,并且在季节性冻融的各个时期,不同类型土壤动物对凋落叶质量损失的贡献率具有显著差异. 其机制还有待进一步研究.

参考文献

- [1] Papa S, Pellegrin A, Fioretto A. Microbial activity and quality changes during decomposition of *Quercus ilex* leaf litter in three Mediterranean woods. *Applied Soil Ecology*, 2008, **40**: 401–410
- [2] Melillo JM, Aber JD, Muratore JF. Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*, 1982, **63**: 621–626
- [3] Chapin FS, Matson PA, Mooney HA. Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology. New York: Springer, 2002
- [4] Luo Y-Y (罗媛媛), Yuan J-F (袁金凤), Shen G-C (沈国春), *et al.* Decomposition of *Schima superba* leaf litter and dynamics change of soil meso-micro arthropods community structure in evergreen broad-leaved forest fragments. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(2): 265–271 (in Chinese)
- [5] Read DJ, Perez-Moreno J. Mycorrhizas and nutrient cycling in ecosystems: A journey towards relevance? *New Phytologist*, 2003, **157**: 475–492
- [6] Wang SJ, Ruan HH, Han Y. Effects of microclimate, litter type, and mesh size on leaf litter decomposition along an elevation gradient in the Wuyi Mountains, China. *Ecological Research*, 2010, **25**: 1113–1120
- [7] Luo Y-Y (罗媛媛), Yuan J-F (袁金凤), Shen G-C (沈国春), *et al.* Dynamics of soil arthropod community structure and its responses to forest fragmentation during the decomposition of *Castanopsis eyrei* leaf litter. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(5): 1295–1301 (in Chinese)
- [8] Tan B, Wu FZ, Yang WQ, *et al.* Characteristics of soil animal community in the subalpine/alpine forests of western Sichuan during onset of freezing. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**: 93–99
- [9] Diekötter T, Wamser S, Wolters V, *et al.* Landscape and management effects on structure and function of soil arthropod communities in winter wheat. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, **137**: 108–112
- [10] Aerts R. The freezer defrosting: Global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 2006, **94**: 713–724
- [11] Henry HAL. Climate change and soil freezing dynamics: Historical trends and projected changes. *Climatic Change*, 2008, **87**: 421–434
- [12] Yang WQ, Wang KY, Kellomäki S, *et al.* Annual and monthly variations in litter macronutrients of three subalpine forests in western China. *Pedosphere*, 2006, **16**: 788–798
- [13] Deng R-J (邓仁菊), Yang W-Q (杨万勤), Feng R-F (冯瑞芳), *et al.* Mass loss and element release of the subalpine of forest litter over one freeze-thaw season. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(10): 5731–5735 (in Chinese)
- [14] Wu FZ, Yang WQ, Zhang J, *et al.* Litter decomposition in two subalpine forests during the freeze-thaw season. *Acta Oecologica*, 2010, **36**: 135–140
- [15] Zwahlen C, Hilbeck A, Nentwig W. Field decomposition of transgenic *Bt* maize residue and the impact on non-target soil invertebrates. *Plant and Soil*, 2007, **300**: 245–257
- [16] Kampichler C, Bruckner A. The role of microarthropods in terrestrial decomposition: A meta-analysis of 40 years of litterbag studies. *Biological Reviews*, 2009, **84**: 375–389
- [17] Crutsinger GM, Sanders NJ, Classen AT. Comparing intra- and inter-specific effects on litter decomposition in an old-field ecosystem. *Basic and Applied Ecology*, 2009, **10**: 535–543
- [18] Yang XD, 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**: 910–918
- [19] Cadish G, Giller KE. Driven by Nature: Plant Litter Quality and Decomposition. Wallingford CAB International, 1997
- [20] Bradford MA, Tordoff GM, Eggers T, *et al.* Microbiota, fauna, and mesh size interactions in litter decomposition. *Oikos*, 2002, **99**: 317–323
- [21] Heemsbergen DA, Berg MP, Loreau M, *et al.* Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. *Science*, 2004, **306**: 1019–1020
- [22] Bokhorst S, Bjerke JW, Melillo J, *et al.* Impacts of extreme winter warming events on litter decomposition in a sub-Arctic heathland. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**: 611–617
- [23] Campbell JL, Mitchell MJ, Groffman PM, *et al.* Winter in northeastern North America: A critical period for ecological processes. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2005, **3**: 314–322
- [24] Wall DH, Bradford MA, John MGST, *et al.* Global decomposition experiment shows soil animal impacts on decomposition are climate-dependent. *Global Change Biology*, 2008, **14**: 2661–2677
- [25] Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, *et al.* Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, **304**: 1629–1633
- [26] Meyer III WM, Ostertag R, Cowie RH. Macro-invertebrates accelerate litter decomposition and nutrient release in a Hawaiian rainforest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**: 206–211
- [27] Swift MJ, Heal OW, Anderson JM. Decomposition in Terrestrial Ecosystems. Berkeley, CA: University of California Press, 1979
- [28] Hedlund K, Augustsson A. Effects of enchytraeid grazing on fungal growth and respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 1995, **27**: 905–909
- [29] Doblas-Miranda E, Sánchez-Piñero F, González-Megías A. Different microhabitats affect soil macroinvertebrate assemblages in a Mediterranean arid ecosystem. *Applied Soil Ecology*, 2009, **41**: 329–335

作者简介 夏磊,男,1986年生,硕士研究生。主要从事土壤生态和森林生态研究。E-mail: xialei20051659@yahoo.com.cn

责任编辑 李凤琴