

# 土壤动物对川西高山/亚高山森林凋落物分解的贡献<sup>\*</sup>

刘瑞龙<sup>1</sup> 李维民<sup>2</sup> 杨万勤<sup>1</sup> 谭 波<sup>1</sup> 王文君<sup>1</sup> 徐振锋<sup>1</sup> 吴福忠<sup>1\*\*</sup>

(<sup>1</sup>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; <sup>2</sup>四川省川西林业局, 四川理县 623102)

**摘要** 采用凋落物分解袋法, 研究了土壤动物对川西高山/亚高山森林代表性植物康定柳、方枝柏、红桦和岷江冷杉凋落物在分解第一年(2011年11月—2012年10月)不同关键时期质量损失的贡献。结果表明: 在凋落物第一年的分解过程中, 不同物种凋落物的分解速率大小依次为康定柳>红桦>岷江冷杉>方枝柏, 且均为生长季节大于冻融季节。土壤动物对凋落物分解的贡献率( $P_{fa}$ )为方枝柏(26.7%)>岷江冷杉(18.8%)>红桦(15.7%)>康定柳(13.2%), 其中康定柳和方枝柏的 $P_{fa}$ 在生长季节大于冻融季节, 而红桦和岷江冷杉的 $P_{fa}$ 为冻融季节大于生长季节。冻融季节土壤动物的作用与凋落物初始C、P和N/P显著相关, 而生长季节则与N、C/N、木质素、木质素/纤维素显著相关。

**关键词** 土壤动物 高山/亚高山森林 凋落物 质量损失率

**文章编号** 1001-9332(2013)12-3354-07 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

**Contributions of soil fauna to litter decomposition in alpine/subalpine forests.** LIU Rui-long<sup>1</sup>, LI Wei-min<sup>2</sup>, YANG Wan-qin<sup>1</sup>, TAN Bo<sup>1</sup>, WANG Wen-jun<sup>1</sup>, XU Zhen-feng<sup>1</sup>, WU Fu-zhong<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; <sup>2</sup>Forestry Bureau of Western Sichuan, Lixian 623102, Sichuan, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2013, 24(12): 3354–3360.

**Abstract:** A field experiment was conducted using the litterbag method to quantify the contribution of soil fauna to litter mass loss of *Salix paraplesia*, *Sabina saltuaria*, *Betula albosinensis* and *Abies faxoniana* during different key periods of the decomposition process of the first year (from November 2011 to October 2012). The results showed that the mass loss rate showed *S. paraplesia* > *B. albosinensis* > *A. faxoniana* > *S. saltuaria*, and the rate in the growing season was greater than in the freeze-thaw season. The contribution rate of soil fauna to the mass decomposition displayed as *S. saltuaria* (26.7%) > *A. faxoniana* (18.8%) > *B. albosinensis* (15.7%) > *S. paraplesia* (13.2%), which was higher in the freeze-thaw season than in the growing season for litter of *B. albosinensis* and *A. faxoniana* while vice versa for litter of *B. albosinensis* and *A. faxoniana*. The contribution of soil fauna was mainly related to organic C, P and N/P in the freeze-thaw season, while N, C/N, lignin and lignin/cellulose in the growing season.

**Key words:** soil fauna; alpine/subalpine forest; litter; mass loss.

凋落物分解是森林生态系统物质循环与能量流动的关键环节<sup>[1-2]</sup>。研究表明, 土壤生物群落(包括土壤动物)对凋落物分解具有重要贡献<sup>[3-4]</sup>, 但受到温度等环境因子以及凋落物质量的调控<sup>[5-6]</sup>。高寒

地区明显的冬季雪被和土壤冻结-融化过程, 会显著影响土壤动物活动及其对凋落物分解的贡献<sup>[7]</sup>。近年来研究发现, 在冬季冻结环境下, 土壤动物对凋落物分解仍有显著的贡献, 且受控于温度驱动的冻融循环格局<sup>[8-9]</sup>。但这些研究大多从单一物种角度出发, 忽略了凋落物质量对土壤动物活动及其贡献的影响。通常, 可食性较好的凋落物往往可以吸引更多的土壤动物类群, 而可食性较差的凋落物分解过程中土壤动物类群相对单一<sup>[10-11]</sup>。在高寒森林生态系

\* 国家自然科学基金项目(31170423, 31270498)、“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05)、四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目(2012JQ0008, 2012JQ0059)和中国博士后科学基金项目(2012T50782)资助。

\*\* 通讯作者. E-mail: wufzchina@163.com

2013-03-04 收稿, 2013-10-08 接受。

统中,严酷的温度环境极大地限制了冬季冻融条件下土壤动物的活动,且温度驱动的冻融循环将显著改变凋落物的质量<sup>[12-13]</sup>,进而影响土壤动物对凋落物分解的贡献。尤其是在当前气候变化情境下,冬季冻融循环格局的改变必将影响凋落物的质量和土壤动物的活动<sup>[14]</sup>。这些过程不仅作用于冬季凋落物分解,而且可能调控生长季节土壤动物对凋落物分解的贡献。但现有研究很少关注冬季与生长季节凋落物分解的相互联系。

川西高山/亚高山森林位于青藏高原东缘,是全球气候变化的敏感区域,对维持区域生态安全有着极其重要的作用。该区域冻融期长达5~6个月,受季节性冻融作用明显<sup>[15-16]</sup>。研究表明,该区域土壤动物资源丰富。随温度的变化,土壤动物类群具有显著的季节动态。季节性冻融期间土壤动物对红桦(*Betula albosinensis*)和岷江冷杉(*Abies faxoniana*)凋落物分解等生态过程有着显著贡献,且相对于冻结初期及融化期,冻结期土壤动物对凋落物分解的贡献率最低<sup>[17]</sup>。但相关研究忽略了冬季与生长季节土壤动物对凋落物分解贡献的生态联系,以及凋落物质量对土壤动物贡献的影响。本文在已有研究基础上,采用凋落物分解袋法,以区域代表性物种康定柳(*Salix paraplesia*)、方枝柏(*Sabina saltuaria*)、红桦和岷江冷杉凋落物为对象,研究季节性冻融期和生长季节不同关键时期土壤动物对凋落物分解的贡献,以期为更清晰地认识川西高山/亚高山森林生态系统凋落物分解等物质循环过程提供基础资料。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省阿坝藏族羌族自治州理县毕棚沟景区(31°14'—31°19' N, 102°53'—102°57' E),地处青藏高原东缘与四川盆地过渡带,属丹巴-松潘半湿润气候,年均温2~4℃,最高气温23℃,最低温度-18℃;年均降水量850 mm,大多数降水集中

在5—8月。研究区每年11月至次年4月为季节性冻融期,冻融作用明显。

根据植被类型,样地1位于海拔3582 m,乔木层主要为方枝柏和岷江冷杉,树龄约120 a,林下植被主要为康定柳、三颗针(*Berberis sargentiana*)、高山杜鹃(*Rhododendron lapponicum*)等;样地2位于海拔3023 m,乔木层主要为岷江冷杉和红桦,树龄约70 a,林下植物主要为箭竹(*Fargesia spathacea*)、冷蕨(*Cystopteris montana*)以及苔草属和莎草属植物等。

### 1.2 样品收集及埋设

2011年10月,在样地内收集新鲜的康定柳、方枝柏、红桦和岷江冷杉的凋落叶,带回室内,自然风干,准确称取10 g,装入不同孔径凋落物袋(20 cm×20 cm)。每个物种不同孔径凋落物各60袋,共480袋。凋落物袋由两层尼龙网缝合而成,贴地面层均采用0.04 mm孔径的尼龙网,表面层孔径分别为0.04 mm(基本排除土壤动物)和3 mm(基本允许所有土壤动物进入)<sup>[18-19]</sup>。另外,4个物种分别取相同质量(10 g)的风干叶各5袋,在65℃下烘干至恒量,由其推算出放置在网袋内样品的初始干质量(8.67 g康定柳、9.14 g方枝柏、8.37 g红桦和8.77 g岷江冷杉),并测定其初始质量。凋落物初始质量特征如表1。

于2011年11月13日土壤冻结前,在样地1放置康定柳和方枝柏凋落物袋,样地2放置红桦和岷江冷杉凋落物袋。每个样地内随机选取5个5 m×5 m的均质样方,去除样方内土壤表面的植物和凋落物,将凋落物袋平铺于地表,并覆盖少许土壤以固定凋落物袋。每个样方分别放置不同孔径的凋落物分解袋各12袋。

### 1.3 样品采集

基于前期监测结果,在凋落物分解的第一年,分别在季节性冻融期和生长季节各采集3次样品。采样时间为:冻结初期(2011-12-27)、冻结期(2012-03-07)、融化期(2012-04-27)、生长季初期(2012-06-16)、

表1 凋落物初始质量特征

Table 1 Initial litter quality (means±SE, n=5)

物种 Species	有机碳 Organic carbon (g kg <sup>-1</sup> )	全N Total N (g kg <sup>-1</sup> )	全P Total P (g kg <sup>-1</sup> )	木质素 Lignin (%)	纤维素 Cellulose (%)
Sp	379.8±23.3a	12.4±0.9a	1.1±0.1a	25.4±1.7a	13.5±0.7a
Ss	517.7±20.3b	10.2±0.7b	1.4±0.1b	20.8±1.3b	12.2±0.7b
Ba	484.3±17.0c	10.4±0.8b	0.8±0.1c	26.9±1.1a	12.9±0.7ab
Af	505.9±30.6bd	11.4±1.1a	1.7±0.1d	22.6±1.2c	12.6±0.7bc

Sp:康定柳 *Salix paraplesia*; Ss:方枝柏 *Sabina saltuaria*; Ba:红桦 *Betula albosinensis*; Af:岷江冷杉 *Abies faxoniana*. 下同 The same below. 不同小写字母表示物种间的质量差异显著 Different small letters indicated significant difference among different species.

生长季中期(2012-08-25)和生长季末期(2012-10-30). 每次收取不同孔径、不同物种的凋落物袋各10袋(即5个样方各收取不同孔径凋落物袋2袋, 其中1袋用于收集土壤动物, 另一袋用于测定质量损失, 均为5个重复). 将收集的凋落物袋装入密封透气的收集袋中低温保存, 迅速带回室内. 去除凋落物中的泥土和外来杂质, 装入信封, 于65℃烘干至恒量, 测定其质量损失率.

#### 1.4 样地温度特征

根据前期研究结果和当地历年气象资料, 研究区每年11月至次年4月为季节性冻融期, 5至10月为生长季节<sup>[6]</sup>. 2011年11月埋样后, 在特定凋落物袋内放置一支纽扣式温度计(iButton DS1923-F5, Maxim Com. USA), 设定为每60 min记录一次数据. 2011年11月至2012年10月样地土壤温度变化特征如图1所示.

为表征样地温度的整体动态, 计算了不同关键时期的时期均温(average temperature, AT)、正积温(positive accumulated temperature, PAT)、负积温(negative accumulated temperature, NAT)(表2). 时期均温为各关键时期内逐日日均温的平均值, 正积温为各关键时期内高于0℃的逐日日均温的总和, 负积温为各关键时期内低于0℃的逐日日均温的总和<sup>[20-21]</sup>.

#### 1.5 数据处理

各孔径内凋落物的质量损失率( $L_t$ )、土壤动物作用的凋落物质量损失率( $C_{fau}$ )及土壤动物对各阶段凋落物质量损失的贡献率( $P_{fau}$ )计算公式<sup>[22-23]</sup>:

$$L_t = (M_{t-1} - M_t) / M_0 \times 100\%$$

$$C_{fau} = L_{bt} - L_{st}$$

$$P_{fau} = C_{fau} / L_{bt} \times 100\%$$

表2 不同时期样地的温度特征

Table 2 Temperature characteristics of sampled plots at different periods (℃)

样地 Plots	参数 Parameter	OF	DF	TS	EGS	MGS	LGS	FTS	GS	WFY
1	AT	-1.4	-1.4	1.9	8.3	11.6	6.9	-0.3	9.1	4.7
	PAT	1.1	34.2	103.8	414.1	815.1	446.6	139.2	1675.9	1815.0
	NAT	-51.2	-135.0	-6.9	0.0	0.0	0.0	-193.1	0.0	-193.1
2	AT	-2.6	-5.4	2.6	8.9	15.1	7.8	-2.2	10.9	4.9
	PAT	4.8	1.1	150.4	444.0	1059.8	503.9	157.9	2007.7	2165.6
	NAT	-95.6	-383.5	-18.8	0.0	0.0	0.0	-497.9	0.0	-497.9

OF:冻结初期 Onset of freezing period (2011-11-13—2011-12-26); DF:冻结期 Deep freezing period (2011-12-27—2012-03-06); TS:融化期 Thawing stage (2012-03-07—2012-04-26); EGS:生长季初期 Early growing season (2012-04-27—2012-06-15); MGS:生长季中期 Middle growing season (2012-06-16—2012-08-24); LGS:生长季末期 Late growing season (2012-08-25—2012-10-30); FTS:季节性冻融期 Freeze-thaw season (2011-11-13—2012-04-26); GS:生长季节 Growing season (2012-04-27—2012-10-30); WFY:第一年全年 The whole first year (2011-11-13—2012-10-30). AT:均温 Average temperature; PAT:正积温 Positive accumulated temperature; NAT:负积温 Negative accumulated temperature. 下同 The same below.

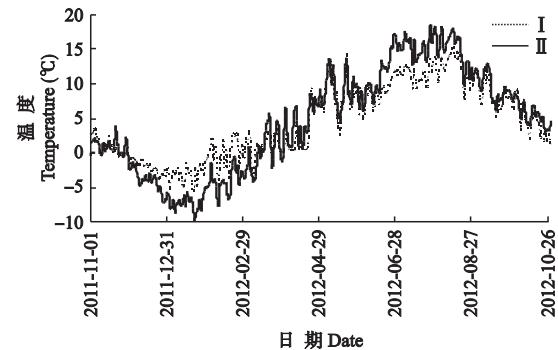


图1 试验期间样地的温度动态

Fig. 1 Temperature dynamics of sampled plots.

I:海拔3600 m Elevation 3600 m; II:海拔3000 m Elevation 3000 m.

式中: $M_0$ 为凋落物初始质量; $M_{t-1}$ 为前一次凋落物残留量; $M_t$ 为当次凋落物残留量; $L_{bt}$ 为当次3 mm孔径凋落物袋内凋落物的质量损失率; $L_{st}$ 为当次0.04 mm孔径凋落物袋内凋落物的质量损失率.

采用SPSS 17.0和Excel软件进行数据统计与分析, 采用多变量方差分析(GLM Multivariate)和最小显著差异法(LSD)比较不同时期、不同孔径凋落物袋内凋落物的质量损失率, 以及不同时期土壤动物对凋落物质量损失的贡献率;用Pearson相关系数评价不同因子间的相关关系;显著性水平设定为 $\alpha=0.05$ .

## 2 结果与分析

### 2.1 不同物种凋落物的分解动态

经过一年的分解, 3 mm孔径凋落物袋中康定柳、方枝柏、红桦和岷江冷杉凋落物分别完成了50.1%、39.4%、44.0%和40.1%的分解, 0.04 mm孔径凋落物袋中康定柳、方枝柏、红桦和岷江冷杉凋落物分别完成了43.5%、28.9%、37.1%和32.6%

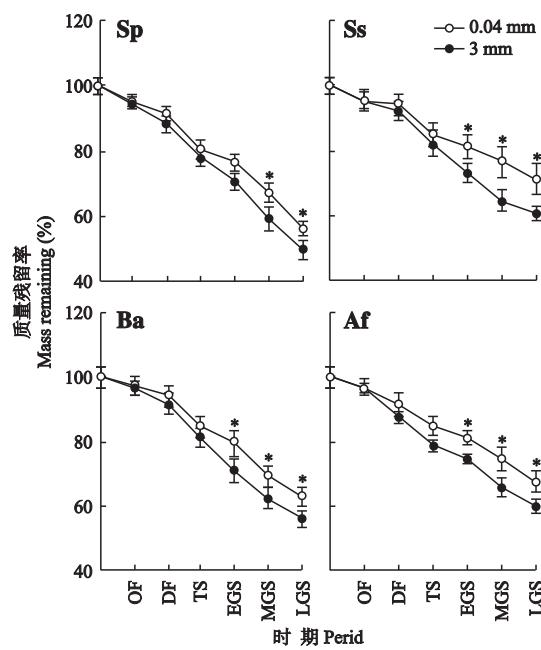


图 2 不同时期物种凋落物的质量损失率

**Fig. 2** Mass remaining of leaf litter at different periods (mean $\pm$ SE, n=5).

Sp:康定柳 *Salix paraplesia*; Ss:方枝柏 *Sabina saltuaria*; Ba:红桦 *Betula albosinensis*; Af:岷江冷杉 *Abies faxoniana*. OF:冻结初期 Onset of freezing period; DF:冻结期 Deep freezing period; TS:融化期 Thawing stage; EGS:生长季初期 Early growing season; MGS:生长季中期 Middle growing season; LGS:生长季末期 Late growing season. 下同. “\*”表示不同处理间差异显著“\*” indicated significance between the different meshes.

的分解;不同孔径凋落物分解速率均表现为康定柳>红桦>岷江冷杉>方枝柏(图 2)。

## 2.2 土壤动物作用的凋落物质量损失率

在凋落物第一年的分解过程中,土壤动物作用的不同物种凋落物质量损失率( $C_{fau}$ )大小依次为方枝柏(10.5%)>岷江冷杉(7.5%)>红桦(6.9%)>康定柳(6.6%),且4个物种均表现为生长季节大于冻融季节,但冻融季节 $C_{fau}$ 仍占全年的21.1%~45.7%(图3)。

## 2.3 土壤动物对凋落物质量损失的贡献率

研究期间,土壤动物对不同物种凋落物分解的贡献率( $P_{fau}$ )大小表现为方枝柏(26.7%)>岷江冷杉(18.8%)>红桦(15.7%)>康定柳(13.2%)。其

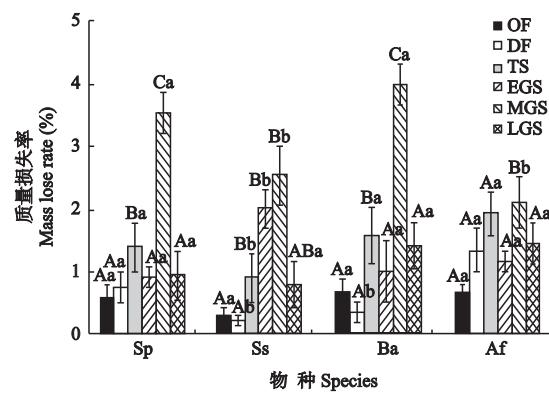


图 3 不同时期土壤动物作用的凋落物质量损失率

**Fig. 3** Mass loss rates driven by soil fauna at different periods (mean $\pm$ SE, n=5).

大写字母表示不同时期的差异显著,小写字母表示不同物种间的差异显著 Different capital letters indicated significant difference among different decomposition stages, and different small letters indicated significant difference among different species.

中,季节性冻融期 $P_{fau}$ 以岷江冷杉最大,康定柳最小;生长季节 $P_{fau}$ 则表现为方枝柏>康定柳>红桦>岷江冷杉。4个物种 $P_{fau}$ 均以生长季节中期最大,方枝柏以生长季节后期最小,康定柳、红桦和岷江冷杉均以冻结期最小。岷江冷杉 $P_{fau}$ 在各关键时期的差异均最小,而康定柳的差异最大(表3)。

## 2.4 温度和凋落物质量对土壤动物贡献率的影响

温度因子和凋落物质量显著影响土壤动物对凋落物分解的贡献率( $P_{fau}$ )。相关分析表明,除康定柳的 $P_{fau}$ 与负积温没有相关性之外,其余物种的 $P_{fau}$ 均与温度因子(包括时期均温、正积温和负积温)极显著相关(表4)。此外,整个凋落物分解的第一年, $P_{fau}$ 与C、N、木质素、纤维素、C/N、N/P、木质素/纤维素均表现出显著的相关关系,但季节性冻融期 $P_{fau}$ 仅与C、P、N/P极显著相关,生长季节 $P_{fau}$ 仅与N、木质素、C/N、木质素/纤维素显著相关。尽管冻结前期 $P_{fau}$ 与所调查的凋落物质量因子均无显著的相关关系,融化期 $P_{fau}$ 仅与P显著相关,但冻结期 $P_{fau}$ 与C、N、P、C/N、C/P和木质素/N显著相关。除N和C/P外,生长季节初期 $P_{fau}$ 与所调查的凋落物质量因子均显著相关,但生长季节中期 $P_{fau}$ 仅与N、P、C/P和

表 3 不同时期土壤动物对凋落物质量损失的贡献率

**Table 3** Contribution rates of soil fauna to mass loss at different periods (% , mean $\pm$ SE, n=5)

物种 Species	OF	DF	TS	EGS	MGS	LGS	FTS	GS	WFY
Sp	8.5 $\pm$ 1.0	6.5 $\pm$ 1.8	8.8 $\pm$ 0.9	24.3 $\pm$ 5.6	29.8 $\pm$ 3.4	15.5 $\pm$ 1.1	10.2 $\pm$ 1.4	15.5 $\pm$ 2.4	13.2 $\pm$ 1.4
Ss	11.4 $\pm$ 0.6	15.9 $\pm$ 2.6	11.9 $\pm$ 1.4	15.0 $\pm$ 3.6	27.3 $\pm$ 2.1	10.1 $\pm$ 2.4	15.2 $\pm$ 1.9	36.5 $\pm$ 1.1	26.7 $\pm$ 2.3
Ba	13.6 $\pm$ 0.7	6.7 $\pm$ 1.8	14.3 $\pm$ 0.6	16.2 $\pm$ 5.2	29.1 $\pm$ 2.7	18.3 $\pm$ 2.5	16.8 $\pm$ 1.6	14.8 $\pm$ 2.5	15.7 $\pm$ 2.9
Af	18.6 $\pm$ 0.3	15.7 $\pm$ 3.2	21.6 $\pm$ 2.1	23.5 $\pm$ 2.0	24.2 $\pm$ 2.1	21.9 $\pm$ 0.8	27.7 $\pm$ 2.1	8.6 $\pm$ 1.8	18.8 $\pm$ 1.1

**表4 不同物种土壤动物贡献率与温度因子的相关系数**  
**Table 4 Correlation coefficients between  $P_{fa}$  and temperature of species ( $n=30$ )**

物种 Species	AT	PAT	NAT
Sp	0.590 **	0.713 **	0.082
Ss	0.953 **	0.939 **	0.630 **
Ba	0.921 **	0.945 **	0.719 **
Af	0.944 **	0.803 **	0.907 **

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

木质素/N 显著相关, 生长季节后期  $P_{fa}$  仅与 C 和 C/N 显著相关(表5).

### 3 讨 论

土壤动物对森林凋落物分解具有重要贡献<sup>[7]</sup>. 但由于食性的差异及其对温度等环境因子的敏感性<sup>[14,17]</sup>, 使得已有研究结论还不足以深入认识土壤动物对高寒森林凋落物分解的影响特征. 本研究发现, 在川西高山/亚高山森林凋落物分解过程中, 阔叶凋落物的分解速率显著大于针叶凋落物的分解速率; 而土壤动物对针叶凋落物分解的贡献率更大. 高寒地区的温度严重制约了土壤动物的活动, 进而影响凋落物的分解进程, 且这些过程往往受控于凋落物质量的动态变化.

凋落物分解速率与其质量特征显著相关. 本研究表明, 川西高山/亚高山森林凋落物在第一年的分解过程中, 阔叶凋落物较针叶凋落物更易分解, 分解速率依次为康定柳>红桦>岷江冷杉>方枝柏, 与以往多数研究结论一致. 这进一步证实了在特定环境条件下, 凋落物基质是影响凋落物分解速率最主要的因素. 气候条件、凋落物质量及分解者活动是控制凋落物分解的关键因素, 且三者之间密切相关<sup>[11]</sup>. 本研究表明, 川西高山/亚高山森林凋落物分解的第一年, 土壤动物作用的凋落物质量损失率( $C_{fa}$ )依

次为方枝柏(10.5%)>岷江冷杉(7.5%)>红桦(6.9%)>康定柳(6.6%). 这主要是因为针叶凋落物的C/N相对较高, 抑制了微生物在凋落物分解过程中的作用<sup>[24]</sup>, 导致土壤动物的作用更大. 此外, 生长季节土壤动物作用的凋落物质量损失率大于冻融季节, 但冬季土壤动物作用的凋落物质量损失率仍占全年的21.1%~45.8%, 这主要是因为冬季低温往往限制了土壤动物的活动<sup>[25]</sup>.

本研究表明, 土壤动物对凋落物质量损失的贡献率为13.2%~26.7%, 且土壤动物对针叶凋落物质量损失的贡献大于阔叶凋落物. 其原因主要是: 1) 阔叶凋落物有着相对更大的叶表面积及更易分解的物质成分, 大大增强了微生物在分解过程中的直接作用; 而针叶凋落物则需要土壤动物的破碎作用才能进行下一步分解. 2) 相对稳定的物质组成使针叶凋落物分解较慢, 而凋落物分解前期主要是土壤动物在发挥作用. 此外, 针叶凋落物相对较高的C/N会抑制微生物的活性<sup>[26]</sup>, 使土壤动物的相对作用更大. 3) 冻融循环过程可能会抑制土壤动物对凋落物质量损失的贡献, 而阔叶凋落物受到的影响更大, 从而降低了土壤动物的贡献作用.

研究表明, 不同时期土壤动物对凋落物质量损失的贡献率差异显著. 首先, 尽管新鲜凋落物往往具有丰富的养分资源<sup>[27]</sup>, 但土壤动物进入凋落物需要一定时间, 因而冻结初期土壤动物对凋落物质量损失的贡献率较小. 其次, 虽然冻结期仍有相当数量的土壤动物存在<sup>[17]</sup>, 但对凋落物质量损失的贡献率相对较小, 这主要是因为低温不仅明显限制了土壤动物活动, 而且可能通过冻结凋落物养分资源, 使得土壤动物难以取食<sup>[28~29]</sup>. 再次, 随着温度的回升, 融化期土壤动物的活性增强, 使得土壤动物对凋落物质量损失的贡献率显著增加; 同时, 土壤动物对凋落物

**表5 不同时期土壤动物贡献率与凋落物质量的相关系数**

**Table 5 Correlation coefficients between  $P_{fa}$  and litter quality at different periods ( $n=20$ )**

时期 Period	C	N	P	Lig	Cel	C/N	C/P	N/P	Lig/N	Lig/Cel
OF	0.176	0.245	0.398	0.159	0.054	-0.065	-0.153	-0.173	-0.031	0.204
DF	-0.499 *	0.739 **	0.478 *	0.054	0.342	-0.721 **	-0.725 **	-0.236	-0.577 **	-0.181
TS	0.223	0.231	0.475 *	0.079	0.011	-0.026	-0.216	-0.261	-0.099	0.120
EGS	0.781 **	-0.363	0.775 **	-0.828 **	-0.572 **	0.689 **	-0.434	-0.911 **	-0.512 *	-0.759 **
MGS	0.023	-0.483 *	-0.670 **	0.074	-0.099	0.302	0.609 **	0.439	0.474 *	0.173
LGS	0.765 **	-0.331	0.403	-0.179	-0.364	0.623 **	0.118	-0.372	0.125	0.033
FTS	0.635 **	-0.100	0.650 **	-0.282	-0.301	0.418	-0.219	-0.564 **	-0.176	-0.164
GS	0.289	-0.477 *	-0.037	-0.527 *	-0.359	0.476 *	0.027	-0.248	-0.133	-0.499 *
WFY	0.724 **	-0.561 *	0.429	-0.787 **	-0.589 **	0.776 **	-0.167	-0.679 **	-0.310	-0.692 **

Lig: 木质素 Lignin; Cel: 纤维素 Cellulose.

质量损失的贡献率与 P 显著相关, 表明 P 可能是该区生态系统的关键限制养分之一。这与 Wu 等<sup>[6]</sup>对植物养分利用的研究结果基本一致。此外, 生长季节气温高、湿度大, 有利于土壤动物生存, 土壤动物数量和类群达到最多, 活动最频繁, 导致土壤动物对凋落物质量损失的贡献率显著增加, 进一步证实了温度是制约土壤动物对高山/亚高山森林凋落物分解贡献的主要因子之一。此外, 相对于其他物种, 土壤动物对岷江冷杉凋落物的贡献率在各个时期的差异最小, 而康定柳的差异最大。同时, 生长季节土壤动物贡献率与 N、木质素和 C/N 显著相关, 冻融季节土壤动物贡献率主要与 C、P 和 N/P 显著相关。

综上所述, 土壤动物对川西高山/亚高山森林凋落物分解具有显著贡献。相对于阔叶凋落物, 土壤动物对针叶凋落物分解的贡献率更大。尽管生长季节土壤动物的作用大于冻融季节, 但冻融季节土壤动物对红桦和岷江冷杉凋落物分解的贡献率大于生长季节。各时期土壤动物对凋落物分解的贡献率也受到凋落物质量的调控, 但由于温度的差异和前期分解对凋落物质量的影响, 不同时期质量因子的作用具有较大的差异, 其机理还有待于进一步研究。

## 参考文献

- [1] Anderson JM. Succession diversity and trophic relationships of some soil animals in decomposing leaf litter. *Journal of Animal Ecology*, 1975, **44**: 475–495
- [2] Liu CJ, Ilvesniemi H, Berg B, et al. Above ground litterfall in Eurasian forests. *Journal of Forestry Research*, 2003, **14**: 27–34
- [3] Irmler U. Changes in the fauna and its contribution to mass loss and N release during leaf litter decomposition in two deciduous forests. *Pedobiologia*, 2000, **44**: 105–118
- [4] Wu T-J (吴廷娟). Effects of global change on soil fauna diversity: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(2): 581–588 (in Chinese)
- [5] 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
- [6] 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
- [7] Aerts R. The freezer defrosting: Global warming and litter decomposition rates in cold biomes. *Journal of Ecology*, 2006, **94**: 713–724
- [8] Xia L (夏 磊), Wu F-Z (吴福忠), Yang W-Q (杨万勤), et al. Contribution of soil fauna to the mass loss of *Betula albosinensis* leaf litter at early decomposition stage of subalpine forest litter in western Sichuan. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 301–306 (in Chinese)
- [9] Xia L (夏 磊), Wu F-Z (吴福忠), Yang W-Q (杨万勤). Contribution of soil fauna to mass loss of *Abies faxoniana* leaf litter during the freeze-thaw season. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2011, **35**(11): 1127–1135 (in Chinese)
- [10] Bocock KL. Changes in the amount of dry matter, nitrogen, carbon and energy in decomposing woodland leaf litter in relation to the soil fauna. *Journal of Ecology*, 1962, **52**: 273–284
- [11] 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
- [12] Hu X (胡 霞), Wu N (吴 宁), Wu Y (吴 彦), et al. Effects of snow cover on the decomposition and nutrient dynamics of *Sibirea angustata* leaf litter in western Sichuan Plateau, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(5): 1226–1232 (in Chinese)
- [13] Jiang YF, Yin XQ, Wang FB. The influence of litter mixing on decomposition and soil fauna assemblages in a *Pinus koraiensis* mixed broad-leaved forest of the Changbai Mountains, China. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **55**: 28–39
- [14] Wardle DA, Bardgett RD, Klironomos JN, et al. Ecological linkages between aboveground and belowground biota. *Science*, 2004, **304**: 1629–1633
- [15] Yang WQ, Wang KY, Kellomaiki S, et al. Litter dynamics of three subalpine forests in Western Sichuan. *Pedosphere*, 2005, **15**: 653–659
- [16] Yang WQ, Wang KY, Kellomaiki S, et al. Annual and monthly variations in litter macronutrients of three subalpine forests in western China. *Pedosphere*, 2006, **16**: 788–798
- [17] 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
- [18] 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
- [19] 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
- [20] Wang YR. Evolution of the cumulative temperatures in China loess plateau. *Journal of Glaciology and Geocryology*

- logy, 2007, **29**: 119–125
- [21] Tourna M, Freitag TE, Nicol GW, et al. Growth, activity and temperature responses of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in soil microcosms. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**: 1357–1364
- [22] Seastedt TR. The role of microarthropods in decomposition and mineralisation process. *Annual Review of Entomology*, 1984, **29**: 25–46
- [23] Xin WD, Yin XQ, Song B. Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen sandy lands in northeastern China. *Journal of Arid Environments*, 2012, **77**: 90–95
- [24] Brown GG. How do earthworms affect microfloral and faunal community diversity? *Plant and Soil*, 1995, **170**: 209–223
- [25] Berg MP, Kniese JP, Verhoef HA. Dynamics and stratification of bacteria and fungi in the organic layers of a Scots pine forest soil. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, **26**: 313–322
- [26] Anderson JR. A spreading activation theory of memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, 1983, **22**: 261–295
- [27] Hunter MD, Adl S, Pringle CM, et al. Relative effects of macroinvertebrates and habitat on the chemistry of litter during decomposition. *Pedobiologia*, 2003, **47**: 101–115
- [28] Heemsbergen DA, Berg MP, Loreau M, et al. Biodiversity effects on soil processes explained by interspecific functional dissimilarity. *Science*, 2004, **306**: 1019–1020
- [29] 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

---

作者简介 刘瑞龙,男,1988年生,硕士研究生。主要从事土壤生态和森林生态研究。E-mail: liuruilong082088@126.com

责任编辑 李凤琴

---