

# 季节性冻融期间亚高山森林凋落物的 质量损失及元素释放

邓仁菊, 杨万勤\*, 冯瑞芳, 胡建利, 秦嘉励, 熊雪晶

(四川农业大学林学院, 四川雅安 625014)

**摘要:**季节性冻融期间的凋落物分解对季节性冻土区的森林生态系统过程可能具有重要的影响,但已有的研究报道很少。因此,采用凋落物分解袋法研究了岷江冷杉 (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) 林和白桦 (*Betula platyphylla* Sukaczew) 林凋落叶的分解。一个季节性冻融期间,冷杉林和白桦林凋落物的质量损失率分别为  $(19.4 \pm 2.0)\%$  和  $(21.5 \pm 3.5)\%$ , 约为 1a 中凋落物分解的 64.5% 和 65.6%, 表明季节性冻融对亚高山森林凋落物分解影响显著。冷杉凋落物中 C、N、P、K、Ca 和 Mg 的释放率为  $(15.0 \pm 1.0)\%$ 、 $(34.1 \pm 3.6)\%$ 、 $(17.0 \pm 0.9)\%$ 、 $(22.8 \pm 5.9)\%$ 、 $(20.1 \pm 0.1)\%$  和  $(36.3 \pm 2.1)\%$ , 白桦凋落物中 C、N、P、K、Ca 和 Mg 的释放率为  $(20.7 \pm 0.1)\%$ 、 $(29.4 \pm 3.4)\%$ 、 $(15.7 \pm 1.3)\%$ 、 $(16.8 \pm 5.1)\%$ 、 $(21.3 \pm 1.8)\%$  和  $(20.5 \pm 2.8)\%$ 。结合叶凋落物产量可以推断,冷杉林凋落物在一个季节性冻融期间释放到土壤的 N、P、K、Ca、Mg 为  $(10.17 \pm 1.14)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(0.68 \pm 0.08)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(4.08 \pm 0.46)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(0.46 \pm 0.05)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(0.09 \pm 0.01)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 白桦林为  $(5.61 \pm 1.12)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(0.34 \pm 0.07)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(1.21 \pm 0.24)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(0.300 \pm 0.059)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $(0.051 \pm 0.010)$   $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , 这对于春季亚高山森林植物生长具有重要的生态学意义。

**关键词:**季节性冻融;凋落物分解;元素释放;亚高山森林

文章编号:1000-0933(2009)10-5730-06 中图分类号:Q142,Q948,S718.5 文献标识码:A

## Mass loss and element release of litter in the subalpine forest over one freeze-thaw season

DENG Ren-Ju, YANG Wan-Qin\*, FENG Rui-Fang, HU Jian-Li, QIN Jia-Li, XIONG Xue-Jing

Faculty of Forestry, Sichuan Agricultural University, Ya'an 625014, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5730 ~ 5735.

**Abstract:** As one of the most important forest ecosystem processes, litter decomposition is controlled by integrated biotic and abiotic factors such as climate change, species composition, litter quality, soil temperature and moisture, as a consequence of which more attentions have been given to the decomposition process of litters in different forest ecosystems and their relations with biotic and abiotic factors over the past decades. As yet, numerous experiments on litter decomposition were carried out at 3—25 °C, far less information is available on mass loss and element releases in litters of the subalpine forest during a freezing-thawing season. A simple experiment on leaf litter decomposition was therefore carried out in fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson) and birch (*Betula platyphylla* Sukaczew) forests in order to character the litter decomposition process during a freezing-thawing season and their ecological significance. Litter bags were put on the forest floor and in 10 cm soil layer beneath fir and birch forests before soil freezing in October 2006, and sampled after thawing in April and October 2007. Rates of litter decomposition and releases of carbon and nutrients were measured in different soil depths and forest stands during a freezing and following season. Over one freeze-thaw season,  $(19.4 \pm 2.0)\%$

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(30771702, 30471378); 国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-07-0592); 国家“十一五”重大科技支撑计划课题资助项目(2006BAC01A11); 四川省杰出青年学科带头人培养基金资助项目(07ZQ026-022)

收稿日期:2008-06-06; 修订日期:2009-03-02

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scyangwq@163.com; ywq918@yahoo.com

and  $(21.5 \pm 3.5)\%$  leaf litters were decomposed in fir and birch forests, and accounted for 64.5% and 65.6% of the annual mass loss of the corresponding litters, respectively, implying that litter decomposition was influenced significantly by seasonal freeze-thaw cycle in the subalpine forest. During the freeze-thaw period,  $(15.0 \pm 1.0)\%$  of C,  $(34.1 \pm 3.6)\%$  of N,  $(17.0 \pm 0.9)\%$  of P,  $(22.8 \pm 5.9)\%$  of K,  $(20.1 \pm 0.1)\%$  of Ca and  $(36.3 \pm 2.1)\%$  of Mg were released from fir needle litter, and  $(20.7 \pm 0.1)\%$  of C,  $(29.4 \pm 3.4)\%$  of N,  $(15.7 \pm 1.3)\%$  of P,  $(16.8 \pm 5.1)\%$  of K,  $(21.3 \pm 1.8)\%$  of Ca and  $(20.5 \pm 2.8)\%$  of Mg released from birch leaf litter, respectively. Consequently, calculated by the leaf litter production in the corresponding forest, fresh leaf litter released  $(10.17 \pm 1.14) \text{ kg hm}^{-2}$  and  $(5.61 \pm 1.12) \text{ kg hm}^{-2}$  of N,  $(0.68 \pm 0.08) \text{ kg hm}^{-2}$  and  $(0.34 \pm 0.07) \text{ kg hm}^{-2}$  of P,  $(4.08 \pm 0.46) \text{ kg hm}^{-2}$  and  $(1.21 \pm 0.24) \text{ kg hm}^{-2}$  of K,  $(0.46 \pm 0.05) \text{ kg hm}^{-2}$  and  $(0.300 \pm 0.059) \text{ kg hm}^{-2}$  of Ca, and  $(0.09 \pm 0.01) \text{ kg hm}^{-2}$  and  $(0.051 \pm 0.010) \text{ kg hm}^{-2}$  of Mg into soil in fir and birch forests over one freeze-thaw season, respectively. Nutrients released from litters during soil freeze-thaw period are favorable for plant nutrition and growth in the next growing season, which are of ecological importance for maintaining the subalpine forest ecosystem process.

**Key Words:** seasonal freeze-thaw; litter decomposition; element release; subalpine forest

地球上受冻融作用的土壤约占全球陆地总面积的 70%<sup>[1]</sup>,季节性冻土面积约 45%<sup>[2]</sup>,是全球中高纬度和高海拔地区普遍存在的自然现象<sup>[3]</sup>。中国受冻融作用的陆地面积约占国土陆地总面积的 98%,季节性冻土面积约为 53.5%<sup>[4]</sup>。因此,季节性冻融是影响中高纬度和高海拔地区的森林生态系统过程的重要生态因子。作为最为重要的森林生态系统过程之一,凋落物分解由降水淋溶、动物的咀嚼和啃食、土壤干湿交替和冻融循环、生物代谢等相互联系的物理、化学和生物作用共同完成<sup>[5]</sup>,但已有的大多数凋落物分解实验的温度范围为 3~25℃<sup>[6]</sup>,有关季节性冻融期间亚高山森林凋落物分解的研究报道相当少见<sup>[6]</sup>,这很难揭示高寒地区森林生态系统过程。

作为我国第二大林区的主体,川西亚高山森林位于长江上游和青藏高原东缘,其在区域气候调节、水土保持、水源涵养和生物多样性保育等方面具有不可替代的作用和地位,因而其森林生态系统过程及其对全球气候变化的响应等受到普遍关注<sup>[7~10]</sup>,但迄今为止的研究均忽视了长达 5~6 个月的季节性冻融期对该区森林生态系统过程的影响。因此,本文报道了季节性冻融期间亚高山冷杉林和白桦林叶凋落物分解过程中的质量损失和养分释放,以期为深入揭示亚高山森林生态系统过程提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与样地概况

研究区域位于王朗国家级自然保护区( $103^{\circ}55' \sim 104^{\circ}10' \text{E}$ ,  $32^{\circ}49' \sim 33^{\circ}2' \text{N}$ ,海拔 2300~4980 m),地处青藏高原——四川盆地的过渡地带,属丹巴-松潘半湿润气候。受季风影响,形成干湿季节差异,干季(当年 11 月至翌年 4 月份)表现为日照强烈、降水少、气候寒冷、空气干燥;湿季(5~10 月份)表现为降雨集中、多云雾、日照少、气候暖湿。年平均气温 2.5~2.9℃,7 月平均气温 12.7℃,1 月平均气温 -6.1℃,多年平均降水量 805 mm,土壤冻结时间长达 5~6 个月,主要植被为针阔混交林和针叶林<sup>[13]</sup>。以岷江冷杉(*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson)(FF)为优势树种的冷杉林位于牧羊场,坡向和坡度分别为 NS170°和 4°(海拔 2600 m)。年均温 2.9℃,多年平均降雨量 801 mm,棕色冲积土,微酸性,土层浅薄,土体结构简单,表层土壤有机质含量高。白桦(*Betula platyphylla* Sukaczew)纯林(BF)位于七坪沟,坡向和坡度分别为 NS120°和 40°(海拔 2540m)。年均温为 3.2℃,多年平均降雨量 801 mm,棕壤,酸性,土层深厚,表层土壤有机质含量高。有关其植被群落特征和土壤理化性质见文献<sup>[7, 11, 12]</sup>。

### 1.2 样地设计和处理

2006 年 10 月下旬(土壤冻结前)将凋落物袋埋于每个冷杉和白桦林地表和土壤 10 cm 处。凋落袋大小约为 20 cm×20 cm,孔径 0.5 mm(底面)和 1 mm(上面),每袋装有一定量烘干的凋落物样(冷杉叶凋落物

30g,白桦叶凋落物 20g)并做好标记。凋落物的初始元素含量见表 1。经过一个自然的季节性冻融期后,于 2007 年 4 月~10 月期间每月中旬取样。同时,于 2007 年 4 月中旬将相应的冷杉和白桦叶凋落物分解袋埋入对应的森林和土层(对照实验),2007 年 5 月~10 月期间每月中旬取样。不同样地冻融与对照实验各取 7 个凋落物袋,小心去掉泥土和新长入的细根,装入保鲜袋后迅速带回实验室,称其鲜重。取少部分样品在 70℃ 烘干至恒重,供养分和失重率的测定用。根据凋落物含水量计算分解后的凋落物干重。

表 1 冷杉林(FF)和白桦林(BF)叶凋落物分解前的初始元素浓度( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Table 1 Initial concentrations (means  $\pm$  SD,  $n=3$ ) of carbon and nutrients in leaf litters of fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) and birch (*Betula platyphylla* Sukaczew, BF) forests

| 样地 Sites | C                | N                 | P                | K                | Ca                 | Mg                 |
|----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|
| FF       | 515.6 $\pm$ 5.5a | 9.19 $\pm$ 0.22a  | 1.33 $\pm$ 0.06a | 5.52 $\pm$ 0.22a | 0.712 $\pm$ 0.014a | 0.086 $\pm$ 0.019a |
| BF       | 472.2 $\pm$ 0.9b | 11.13 $\pm$ 0.35b | 1.39 $\pm$ 0.03a | 3.49 $\pm$ 0.18b | 0.827 $\pm$ 0.059b | 0.152 $\pm$ 0.005b |

\* 每一栏中不同的上标代表不同森林群落之间的差异性是否显著( $T$  测验,  $P<0.05$ ); 下同 \* Different superscript within a column indicate denote the significant differences among different stands ( $T$  test,  $P<0.05$ ); FF, The Fir Forest, BF, The Birch Forest; the same below

### 1.3 实验方法

$\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$  消煮后,全氮含量采用半微量凯氏定氮法测定;全磷含量采用钼锑钒比色法测定,钾、钙、镁含量采用原子吸收法测定;有机碳含量采用重铬酸钾外加热法测定。

### 1.4 计算与统计分析

凋落物质量损失率的计算公式如下:

$$D_w = (\Delta M / M_0) \times 100\%$$

式中,  $D_w$  为一个季节性冻融期内凋落物的质量损失率(%),  $\Delta M$  为一个季节性冻融期内所取样品的损失质量(g),  $M_0$  为投放时分解袋内样品质量(g)。

元素释放率的计算公式如下:

$$E = [(e_0 - e) / e_0] \times 100\%$$

式中,  $E$  为一个季节性冻融期的元素释放率(%),  $e$  为一个季节性冻融期后凋落物的养分量(g),  $e_0$  为凋落物初始养分量(g)。

所有数据用 SPSS 12.0 进行统计分析,  $T$  测验法检验不同森林类型、土层之间的差异。

## 2 结果

### 2.1 冻融期间的凋落物质量损失

表 2 所示为冷杉林和白桦林的叶凋落物在一个季节性冻融期间的质量损失率。表 2 显示,一个季节性冻

表 2 一个季节冻融期间冷杉林(FF)和白桦林(BF)叶凋落物的质量损失率

Table 2 Mass loss rates (means  $\pm$  SD,  $n=5$ ) of fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) and birch (*Betula platyphylla* Sukaczew, BF) litters over one freeze-thaw season

| 样地 Sites | 置放位置 Location | 质量损失率 Mass loss rate (%)     |
|----------|---------------|------------------------------|
| FF       | 森林地表 AG       | 18.9 $\pm$ 1.0 <sup>aA</sup> |
|          | 土壤层 BG (10cm) | 19.8 $\pm$ 2.8 <sup>aA</sup> |
|          | 平均 Average    | 19.4 $\pm$ 2.0 <sup>aA</sup> |
| BF       | 森林地表 AG       | 20.2 $\pm$ 3.1 <sup>aA</sup> |
|          | 土壤层 BG (10cm) | 22.6 $\pm$ 2.7 <sup>aA</sup> |
|          | 平均 Average    | 21.5 $\pm$ 3.5 <sup>aA</sup> |

\* 每一栏中不同的上标代表不同森林群落之间(第一个字母)和不同土层之间(第二个字母)的差异性是否显著( $T$  检验,  $P<0.05$ ). AG 表示地表凋落物, BG 表示地下 10cm 土壤层凋落物,下同 \* Different superscripts within a column denote the significant differences among different stands (the first letter) and soil layers (the second letter) ( $T$  test,  $P<0.05$ ); AG indicates aboveground litter; BG indicates 10cm belowground litter; the same below

融期间,冷杉林和白桦林的叶凋落物的平均质量损失分别为 19.4% 和 21.5%。白桦林叶凋落物的质量损失高于冷杉林,但其差异性并不显著( $P > 0.05$ )。同一林分内,森林地表层的叶凋落物的质量损失小于土壤层,但差异性不显著( $P > 0.05$ )。这表明,季节性冻融期间,凋落物质量和埋葬深度对叶凋落物分解的影响并不显著。

表 3 可见,一个季节性冻融期(2006 年 10 月下旬至 2007 年 4 月中下旬),冷杉林和白桦林地表的叶凋落物的失重率分别为(18.9 ± 1.1)% 和(20.2 ± 2.3)%,约为一年中凋落物分解的 64.5% 和 65.6%,显著高于生长季节内的凋落物分解速率。这表明,季节性冻融对亚高山森林凋落物分解具有十分显著的影响。这与季节性冻融期间,凋落物中大量的生物元素被淋洗和物理结构被破坏有关。

表 3 季节性冻融期间和生长季节内冷杉林(FF)和白桦林(BF)叶凋落物的质量损失率

Table 3 Mass loss rates (means ± SD,  $n=5$ ) of fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) and birch (*Betula platyphylla* Sukaczew, BF) litters over one freeze-thaw season and one growing season

| 样地<br>Sites | 取样时间<br>Sampling time | 凋落物干物质残留量<br>Dry weight of residual litter (g) | 失重率<br>Mass loss rate (%) |
|-------------|-----------------------|------------------------------------------------|---------------------------|
| FF          | 4 月 April             | 24.322 ± 0.167                                 | 18.9 ± 1.1                |
|             | 10 月 October          | 21.220 ± 1.454                                 | 29.3 ± 1.2                |
| BF          | 4 月 April             | 15.958 ± 0.612                                 | 20.2 ± 2.3                |
|             | 10 月 October          | 13.835 ± 0.744                                 | 30.8 ± 0.6                |

## 2.2 季节性冻融对凋落物元素浓度的影响

表 4 显示,经过一个季节性冻融期后,冷杉和白桦林的叶凋落物的元素浓度表现为  $C > N > K > P > Ca > Mg$ 。与初始元素浓度相比(表 1),白桦林凋落物中 K 的浓度增加了 30.6%,N 的浓度降低了 10.5%;冷杉林凋落物中 Ca 的浓度降低了 36.7%,而 N 的浓度降低了 17.6%。C、P 和 Mg 的浓度则无明显变化。这表明季节性冻融对叶凋落物中元素浓度具有不同程度的影响,且受到埋葬深度的影响。但有关季节性冻融后白桦叶凋落物中 K 浓度增加的原因还有待深入研究。

表 4 一个冻融期间后冷杉林(FF)和白桦林(BF)凋落物的元素浓度 ( $g \cdot kg^{-1}$ )

Table 4 Element concentrations (means ± SD,  $n=5$ ) in litters of fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) and birch (*Betula platyphylla* Sukaczew, BF) forests after one freeze-thaw season

| 样地<br>Sites | 置放位置<br>Location | C                         | N                          | P                         | K                         | Ca                          | Mg                          |
|-------------|------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| FF          | AG               | 543.4 ± 1.9 <sup>aB</sup> | 7.86 ± 0.31 <sup>aA</sup>  | 1.35 ± 0.02 <sup>aB</sup> | 5.62 ± 0.45 <sup>aA</sup> | 0.518 ± 0.041 <sup>aA</sup> | 0.075 ± 0.000 <sup>aA</sup> |
|             | BG               | 552.6 ± 3.0 <sup>aA</sup> | 7.28 ± 0.10 <sup>aB</sup>  | 1.40 ± 0.05 <sup>aA</sup> | 5.05 ± 0.44 <sup>aB</sup> | 0.524 ± 0.059 <sup>aB</sup> | 0.058 ± 0.000 <sup>aB</sup> |
| BF          | AG               | 467.4 ± 4.0 <sup>bB</sup> | 10.15 ± 0.06 <sup>bA</sup> | 1.48 ± 0.04 <sup>bB</sup> | 4.79 ± 0.07 <sup>bA</sup> | 0.789 ± 0.027 <sup>aB</sup> | 0.155 ± 0.005 <sup>bA</sup> |
|             | BG               | 483.6 ± 4.6 <sup>bA</sup> | 9.78 ± 0.31 <sup>bB</sup>  | 1.52 ± 0.04 <sup>bA</sup> | 4.34 ± 0.29 <sup>bB</sup> | 0.912 ± 0.040 <sup>bA</sup> | 0.153 ± 0.005 <sup>bB</sup> |

## 2.3 冻融时期凋落物的元素释放

图 1 显示,一个季节性冻融期间,冷杉林凋落物的 C、N、P、K、Ca 和 Mg 释放率分别为(15.0 ± 1.0)%、(34.1 ± 3.6)%、(17.0 ± 0.9)%、(22.8 ± 5.9)%、(20.1 ± 0.1)% 和(36.3 ± 2.1)%,而白桦林分别为(20.7 ± 0.1)%、(29.4 ± 3.4)%、(15.7 ± 1.3)%、(16.8 ± 5.1)%、(21.3 ± 1.8)% 和(20.5 ± 2.8)%。结合 Yang 等<sup>[7, 11]</sup>对该区相同的两个样地(冷杉林和白桦林)的叶凋落物产量可以计算出,冷杉林的新鲜叶凋落物在一个季节性冻融期间释放到土壤的 N、P、K、Ca、Mg 分别为(10.17 ± 1.14)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(0.68 ± 0.08)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(4.08 ± 0.46)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(0.46 ± 0.05)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(0.09 ± 0.01)  $kg \cdot hm^{-2}$ ,白桦林分别为(5.61 ± 1.12)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(0.34 ± 0.07)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(1.21 ± 0.24)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(0.300 ± 0.059)  $kg \cdot hm^{-2}$ 、(0.051 ± 0.010)  $kg \cdot hm^{-2}$ 。

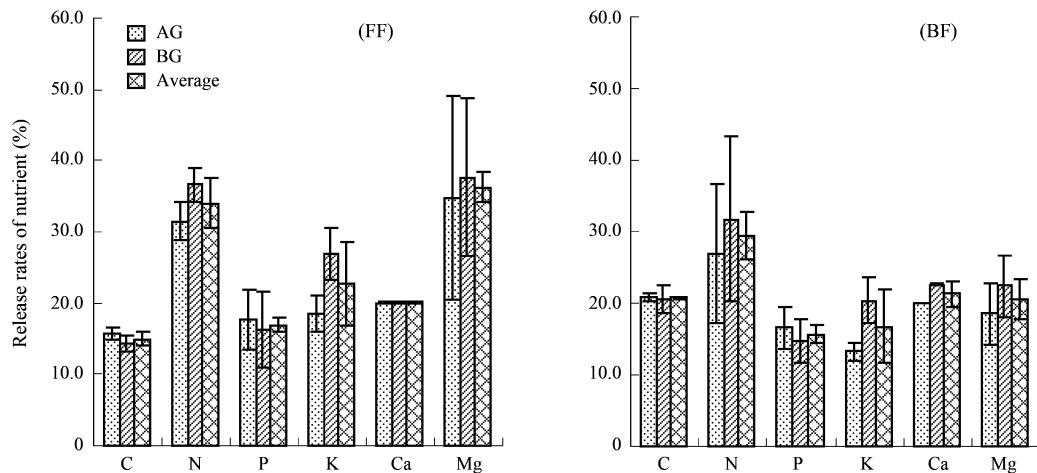


图1 季节性冻融期间冷杉林(FF)和白桦林(BF)凋落物分解过程中的养分释放率

Fig. 1 Release rates of carbon and nutrients in litters of fir (*Abies faxoniana* Rehder & E. H. Wilson, FF) and birch (*Betula platyphylla* Sukaczew, BF) forests over one seasonal freeze-thaw period

横条表示标准偏差 Bars indicate standard error (SD)

### 3 讨论与结论

普遍认为,凋落物分解受到生物因素和非生物因素的综合调控,凋落物分解的速率随着温度的增加而增加,低温能降低与凋落物分解有关的微生物活性,从而导致较低的凋落物分解速率<sup>[13~15]</sup>。但本项研究表明,在一个季节性冻融期间,亚高山地区普遍分布的冷杉和白桦凋落物的质量损失率分别为 $(19.4 \pm 2.0)\%$ 和 $(21.5 \pm 3.5)\%$ ,约为全年中凋落物分解的64.5%和65.6%,显著高于生长季节内的凋落物分解速率,表明季节性冻融对亚高山森林凋落物分解产生了显著的影响。这与过去有关“凋落物分解速率随着温度的增加而增加”的研究结果不一致,原因是过去的绝大多数凋落物分解实验的温度范围为 $3 \sim 25^\circ\text{C}$ ,而高纬度和高海拔地区森林地表的凋落物长时期处于季节性冻融状态,冻融作用通过机械破碎作用和淋溶作用对凋落物物理结构的破坏和生物元素的淋洗作用而影响凋落物的分解<sup>[16,17]</sup>。此外,冻融循环引起的凋落物物理结构破坏有利于分解者接触,增加了分解生物的活性,提高了叶凋落物的可降解性<sup>[6]</sup>,有利于凋落物的分解。可见,季节性冻融期间的凋落物分解是季节性冻土区重要的生态系统过程之一。

埋藏深度是影响凋落物分解的重要因素<sup>[18]</sup>。本项研究表明,季节性冻融期间,埋于同一森林地表和10cm土壤层的凋落物的质量损失没有显著差异,说明季节性冻融期间,凋落物的埋藏深度对凋落物分解影响不显著。导致这一现象的可能原因是土壤冻结和融化期间,凋落物分解受冻融循环等物理过程的机械破坏和化学淋溶作用的影响更大,而此期间的地表和土壤温度较低,土壤微生物活性和土壤动物啃食作用较弱,对凋落物的生物降解作用较小。这也表明,季节性冻融期间的物理分解和化学淋溶作用对亚高山森林凋落物分解具有重要的影响。

凋落物分解过程中养分的释放在维持林木自身生长、森林生态系统养分循环及林地生产力维护等方面起着十分重要的作用<sup>[19]</sup>。目前,有关生长季节期凋落物的元素释放动态研究较多<sup>[20,21]</sup>,但有关季节性冻融期间凋落物的元素释放率和释放量的研究文献相当缺乏。本项研究表明,季节性冻融期间,冷杉和白桦凋落物的元素浓度较初始值发生了较大的变化,具有较大的生物元素释放率和养分释放量。川西亚高山森林土壤融化期间的微生物活性较低,对土壤养分有效性的作用较小<sup>[22]</sup>,而此时的植物已经进入萌芽生长状态,因而季节性冻融期间凋落物释放的养分可为春季亚高山森林植物的生长发育提供一定的养分,具有十分重要的生态学意义。

### References:

- [1] Xu D Z, Ding D W. Activities and prospects of alteration and utilization on frozen soil. The Fourth Academic Conference Symposium of Frozen Soil

- in China. Beijing: Science Press, 1990. 191—199.
- [ 2 ] Gavrilova M K. Climate and permafrost. *Permafrost & Periglacial Process*, 1993, 4: 99—112.
- [ 3 ] Yang Z N. Hydrological studies in cold regions of China. Beijing: Science Press, 2000.
- [ 4 ] Guo D X. Frozen soil in China. Lanzhou: Gansu Education Press, 1990.
- [ 5 ] Yang W Q, Deng R J, Zhang J. Forest litter decomposition and its responses to global climate change. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2007, 18(12): 2889—2895.
- [ 6 ] Taylor B R. Does repeated freezing and thawing accelerate decay of leaf litter? *Soil Biology & Biochemistry*, 1988, 20: 657—665.
- [ 7 ] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, *et al.* Litter dynamics of three subalpine forests in Western Sichuan. *Pedosphere*, 2005, 15(5): 653—659.
- [ 8 ] Yang W Q, Feng R F, Zhang J, Wang K Y. Carbon stock and biochemical properties in the organic layer and mineral soil under three subalpine forests in Western China. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4157—4165.
- [ 9 ] Feng R F, Yang W Q, Zhang J, *et al.* Effects of simulated elevated atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and temperature on soil enzyme activity in the subalpine fir forest. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(10): 4019—4026.
- [ 10 ] Wu F Z, Wang K Y, Yang W Q, *et al.* Effects of *Fargesia denudate* density on seasonal changes in litter nutrient concentrations and their potential retranslocation. *Acta Phytocol. Sin.*, 2005, 29(4): 537—542.
- [ 11 ] Yang W Q, Wang K Y, Kellomäki S, *et al.* Annual and monthly variations in litter macronutrients of three subalpine forests in Western China. *Pedosphere*, 2006, 16(6): 788—798.
- [ 12 ] Deng R J, Yang W Q, Zhang J, *et al.* Carbon, nitrogen and phosphorus stocks in soil organic layer beneath the subalpine forests of Western Sichuan. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2007, 13(4): 492—496.
- [ 13 ] Wei J, Wu G, Deng H B. Researches on nutrient return of litterfall in the alpine tundra ecosystem of Changbai Mountains. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2211—2216.
- [ 14 ] Tian X J, Li S G H. Relative roles of microorganisms and fauna on needle litter decomposition in a subalpine coniferous forest. *Acta Phytocol. Sin.*, 2002, 26(3): 257—263.
- [ 15 ] Zhang D L, Mao Z J, Zhang L, *et al.* Advances in enzyme activities in the process of litter decomposition. *Sci. Silvae Sin.*, 2004, 40(2): 152—159.
- [ 16 ] Sulkava P, Huhta V. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralization in boreal forest soil. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22: 225—239.
- [ 17 ] Withington C L, Sanford R L. Decomposition rates of buried substrates increase with altitude in the forest-alpine tundra ecotone. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 68—75.
- [ 18 ] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, *et al.* Advances of forest litter decomposition. *Sci. Silvae Sin.*, 2006, 42(4): 93—100.
- [ 19 ] Swift M J, Heal O W & Anderson J M. Decomposition in terrestrial ecosystems. University of California Press, Berkley, California, USA. 1979.
- [ 20 ] Berg B, McClaugherty C. Plant litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration. Berlin: Springer-Verlag, 2003, 286.
- [ 21 ] Xu X N, Hideaki S, Tsutomu E. Decomposition patterns of leaf litter of seven common canopy species in a subtropical forest: dynamics of mineral nutrients. *J. For. Res.*, 2006, 17(1): 1—6.
- [ 22 ] Yang W Q, Zhang J, Hu T X. Forest Soil Ecology. Chengdu: Sichuan Sci-Tech Publishing House, 2006. 451.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 徐敦祖, 丁德文. 冻土改造和利用的研究现状及展望. 第四届全国冻土学术会议论文集(冻土学). 北京: 科学出版社, 1990. 191~199.
- [ 3 ] 杨针娘, 刘新仁. 中国寒区水文. 北京: 科学出版社, 2000.
- [ 4 ] 郭东信. 中国冻土. 兰州: 甘肃教育出版社, 1990.
- [ 5 ] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对气候变化的响应. *应用生态学报*, 2007, 18(12): 2889~2895.
- [ 10 ] 吴福忠, 王开运, 杨万勤, 等. 密度对缺苞箭竹凋落物生物元素动态及其潜在转移能力的影响. *植物生态学报*, 2005, 29(4): 537~542.
- [ 12 ] 邓仁菊, 杨万勤, 张健, 等. 川西亚高山森林土壤有机层碳、氮、磷储量特征. *应用与环境生物学报*, 2007, 13(4): 492~496.
- [ 13 ] 魏晶, 吴钢, 邓红兵. 长白山高山冻原生态系统的凋落物养分归还功能. *生态学报*, 2004, 24(10): 2211~2215.
- [ 14 ] 田兴军, 立石贵浩. 亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶分解的作用. *植物生态学报*, 2002, 26(3): 257~263.
- [ 15 ] 张东来, 毛子军, 张玲, 等. 森林凋落物分解过程中酶活性研究进展. *林业科学*, 2006, 42(1): 105~109.
- [ 18 ] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展. *林业科学*, 2006, 42(4): 93~100.
- [ 22 ] 杨万勤, 张健, 胡庭兴. 森林土壤生态学. 成都: 四川科技出版社, 2006. 451.