

# 季节性雪被对天山雪岭云杉凋落叶分解和碳氮磷释放的影响

陈文静 贡璐\* 刘雨桐

新疆大学资源与环境科学学院, 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

**摘要** 季节性雪被下显著的冻融格局差异可能对干旱区山地森林凋落叶分解过程产生重要影响, 但一直未见深入研究。2015年10月至2016年10月, 采用凋落物分解袋法, 研究了天山典型树种雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)凋落叶在季节性雪被覆盖下的3个关键时期(冻融期、深冻期、融冻期)以及生长季(生长季早期和生长季末期)的分解动态和碳、氮、磷释放特征。结果表明: (1)经过一年的分解, 不同雪被厚度下雪岭云杉凋落叶分解率为24.6%–29.2%, 且存在显著性差异。分解系数 $k$ 值厚雪被覆盖最大, 无雪被覆盖最小。(2)冬季雪被覆盖期雪岭云杉凋落叶分解对当年分解总量的贡献达46.0%–48.5%, 其中对冻融期凋落叶分解影响较为明显。(3)随着凋落叶的分解, 雪岭云杉凋落叶氮含量总体呈增加趋势; 碳含量和碳氮比大致呈下降趋势, 在深冻期和生长季末期不同雪被处理下碳含量呈显著性差异; 而凋落叶磷含量呈不规则变化趋势, 且在冻融期和融冻期不同雪被厚度下呈显著性差异。(4)整个雪被覆盖季节凋落叶氮元素表现为富集, 碳和磷元素表现为释放; 其中, 在融冻期薄雪被和中雪被处理下碳元素富集率最大, 在冻融期薄雪被、中雪被和厚雪被处理下, 融冻期无雪被和厚雪被下以及生长季早期中雪被和厚雪被下氮元素富集率最大, 而雪被对凋落叶磷释放的影响不显著。

**关键词** 天山; 凋落叶分解; 雪岭云杉; 雪被厚度

陈文静, 贡璐, 刘雨桐 (2018). 季节性雪被对天山雪岭云杉凋落叶分解和碳氮磷释放的影响. 植物生态学报, 42, 487–497. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0298

## Effects of seasonal snow cover on decomposition and carbon, nitrogen and phosphorus release of *Picea schrenkiana* leaf litter in Mt. Tianshan, Northwest China

CHEN Wen-Jing, GONG Lu\*, and LIU Yu-Tong

College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Key Laboratory of Oasis Ecology, Ministry of Education, Ürümqi 830046, China

### Abstract

**Aims** The effects of freeze-thaw cycles on seasonal snow thickness may play a significant role in the decomposition process of forest litter in arid areas, whereas the understanding on this issue remains poor. Therefore, our objective was to understand the effects of snow cover on the decomposition and the carbon, nitrogen and phosphorus release of *Picea schrenkiana* leaf litter, the representative species in arid areas in northwest China.

**Methods** A field experiment was conducted in Mt. Tianshan of Xinjiang from October 2015 to October 2016 using litterbag method. Air-dried leaf litter of *P. schrenkiana* was put into nylon litterbags and the litterbags were placed on the forest floor along the gradient of snow cover depth from forest gap to full canopy. Mass loss rates and carbon, nitrogen and phosphorus release of *P. schrenkiana* leaf litter were measured at three critical stages (freeze-thaw period, deep-freeze period, thawing period) under snow cover and the growing seasons (early growing season and late growing season) during one year of decomposition.

**Important findings** The results showed that (1) after one year's decomposition, the decomposition rates of the *P. schrenkiana* leaf litter under different snow depths were 24.6%–29.2%, and there were significant difference ( $p < 0.05$ ) between the decomposition rates under different snow depths. The decomposition constant ( $k$ ) was highest under thick snow cover and lowest under no snow cover. (2) The decomposition during the winter snow cover period contributed 46.0%–48.5% of total decomposition of *P. schrenkiana* leaf litter in the whole year, and the litter decomposition was the fastest during the freeze-thaw cycles. (3) With the decomposition of leaf litter, the nitrogen content of *P. schrenkiana* leaf litter increased while the content of carbon and C:N decreased roughly.

收稿日期Received: 2017-11-15 接受日期Accepted: 2018-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(31760142). Supported by the National Natural Science Foundation of China (31760142).

\* 通信作者Corresponding author (gonglu721@163.com)

There was a significant difference ( $p < 0.05$ ) in carbon content between different snow treatments in the deep freezing period and late growing season. The phosphorus content in leaf litter is irregular with the decomposition of leaf litter. Snow thickness significantly influenced the phosphorus content in leaf litter during freeze-thaw period and thawing period ( $p < 0.05$ ). (4) Net N immobilization during leaf litter decomposition was observed in the whole snow cover season, C and P were mainly released. Among them, thin and medium snow patches showed higher carbon enrichment rates in the thawing period. Thin, medium and thick snow treatments in the freeze-thaw period, no and thick snow treatments in the thawing period and medium and thick snow patches in the late growing season showed higher nitrogen enrichment rates. In contrast, the effect of snow cover on the release of leaf litter phosphorus was not significant ( $p > 0.05$ ).

**Key words** Mt. Tianshan; leaf litter decomposition; *Picea schrenkiana*; snow cover thickness

Chen WJ, Gong L, Liu YT (2018). Effects of seasonal snow cover on decomposition and carbon, nitrogen and phosphorus release of *Picea schrenkiana* leaf litter in Mt. Tianshan, Northwest China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 42, 487–497. DOI: 10.17521/cjpe.2017.0298

凋落物分解阶段是森林生态系统物质循环和能量流动的关键阶段, 对森林生态系统的碳循环和氮周转具有决定性作用(贾丙瑞等, 2016; Paudel *et al.*, 2016)。迄今为止, 国内外专家已经对凋落物分解进行了大量研究(Parton *et al.*, 2007; Barrett, 2008; Zhang & Wang, 2015; 刘涛等, 2017), 研究对象包括不同气候带和植被类型, 所涉及的环境因素有光照、大气氮沉降、土壤温湿度、土壤类型以及雪被斑块等(Parton *et al.*, 2007; Berg & McClaugherty, 2008; Baptist *et al.*, 2010)。已有研究表明, 气候主要控制区域尺度的凋落物分解速率, 而小尺度的凋落物分解过程则由不同物种凋落物基质质量所控制(Aerts, 2006)。传统观点认为, 凋落叶分解速率随温度和湿度的升高而加快, 冬季冻结环境下凋落叶分解缓慢甚至停滞(Vitousek *et al.*, 1994)。然而越来越多的冬季凋落物分解实验表明, 高寒山地森林生态系统中雪被下的绝热保温环境以及由气温变化等因素产生的冻融循环作用成为影响凋落物分解过程的重要因素(Bleak, 1970; Taylor & Parkinson, 1988; Wu *et al.*, 2010; 胡霞等, 2012b; Saccone *et al.*, 2013; 武启骞等, 2013), 因此, 冬季雪被斑块下凋落物质量损失在年际分解率中可能占较大比例。当前关于季节性雪被下凋落物分解研究主要集中在青藏高原中高海拔山地森林生态系统(胡霞等, 2012b; 吴启骞等, 2013; 刘涛等, 2017), 而对于干旱区山地温带针叶林凋落物分解及其碳氮磷释放影响的研究鲜有报道。

天山森林在涵养水源、保育土壤、固碳释氧以及保护生物多样性、维持绿洲稳定性等方面发挥着不可替代的作用(宋新章等, 2008; 许文强等, 2016)。

在新疆天山地区, 季节性积雪是最活跃且敏感的环境要素, 雪被覆盖期长达5–6个月, 并在林窗-林下形成天然雪被梯度(Tan *et al.*, 2010)。而该区域雪被期雪岭云杉(*Picea schrenkiana*)凋落叶分解特征如何? 碳氮磷释放呈现何种规律? 仍未见报道。本文以天山北麓中山带优势物种雪岭云杉凋落叶为研究对象, 采用凋落物分解袋法, 探讨季节性雪被对凋落叶分解和碳氮磷释放特征的影响, 以期深入了解中高海拔山地森林物质循环等过程对气候变暖的响应提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于新疆天山北麓中山带, 横跨83°–94° E, 纵贯42°–45° N, 距乌鲁木齐市61 km的水西沟。其海拔1 300–4 200 m, 属于温带大陆性气候, 年总辐射量达 $5.85 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$ , 年平均气温为2–3 °C, 历年最高气温为30.5 °C, 最低气温为–30.2 °C, 年降水量400–600 mm, 雨季集中在6–8月份, 年蒸发量150–980 mm, 年平均相对湿度65%, 干燥度1.4, 无霜期89天, 积温1 170.5 °C, 最大积雪深度为65 cm。塔里木河和伊犁河是天山南北坡最重要的两条水系。林下土壤为山地灰褐色森林土, 腐殖质层较厚。当地主要森林类型为北方温带针叶林, 其中雪岭云杉是研究区域数量最多、分布最广的物种, 主要见于中高海拔地区的背阴面。

### 1.2 实验设计和方法

于实验区内选取具有代表性的雪岭云杉纯林作为实验样地, 并在样地内分别选取环境(坡向、坡度相似, 树龄、海拔相同等)相对一致的大约400 m<sup>2</sup>的

林窗, 每个林窗间隔大于1 km, 同时沿顺风方向从林窗中央至林下依次设置4个4 m × 4 m的小样方, 每个样方间距为5 m左右, 以保证在冬季可以形成从厚到无4个雪被梯度, 分别记作厚雪被、中雪被、薄雪被、无雪被, 雪被厚度变化见图1。于2015年9月下旬在雪岭云杉林中采集地表新鲜凋落叶带回实验室, 彻底风干后称取5份质量为10 g的凋落物, 于65 °C烘箱烘干至恒质量, 用以计算凋落物初始质量。称取相当于烘干质量为10 g的凋落物装入大小为400 cm<sup>2</sup>、孔径为0.1 mm的尼龙网袋中备用, 共计300袋(3个样地×4个样方×1个物种×5次采样×5个重复)。在2015年10月下旬, 将凋落叶袋平铺于提前划分标记好的样方上, 袋间距为5 cm左右, 以免其相互影响。同时, 在每种雪被处理下设置纽扣式温度记录器(iButton DS1923-F5, Maxim/Dallas Semiconductor, Sunnyvale, USA), 将其放置于相应的凋落叶分解袋内, 每隔2 h记录一次土壤温度数据(图2)。

为探究雪被形成、覆盖、融化以及生长季凋落叶分解和碳氮磷释放特征, 在前期观测基础上, 将冬季分为3个阶段, 生长季分为2个阶段。即2015-10-30–2015-12-29 (冻融期, FTP)、2015-12-29–2016-02-28 (深冻期, DFP)、2016-02-28–2016-04-25 (融冻期, TP)、2016-04-25–2016-07-26 (生长季早期, EGS)和2016-07-26–2016-10-20 (生长季末期, LGS)。

每次采样随机从每个样方内采集雪岭云杉凋落叶分解袋各5袋, 采样时测量林窗至林下不同位置的雪被厚度, 由于样地处于中高海拔森林, 无法进行实时监测, 雪被厚度用钢卷尺多点测量, 并读取各样方下的土壤温度数据。

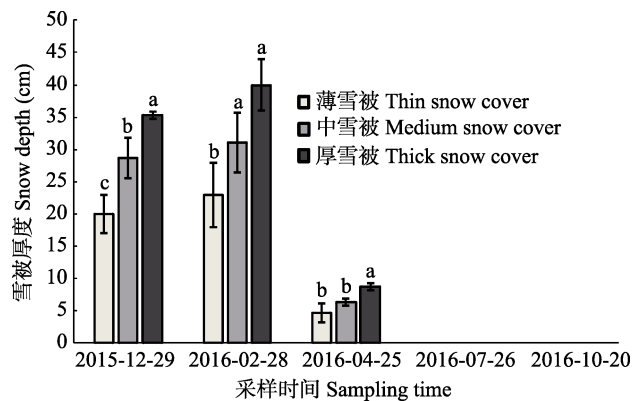


图1 不同采样时间雪被厚度变化动态(平均值±标准偏差,  $n = 5$ )。小写字母表示相同采样日期不同雪被厚度间的差异性 ( $p < 0.05$ )。

Fig. 1 Thickness changes of snow cover in different sampling time (mean ± SD,  $n = 5$ ). The lowercase letters indicate significant difference among different snow cover thickness for the same sampling date ( $p < 0.05$ ).

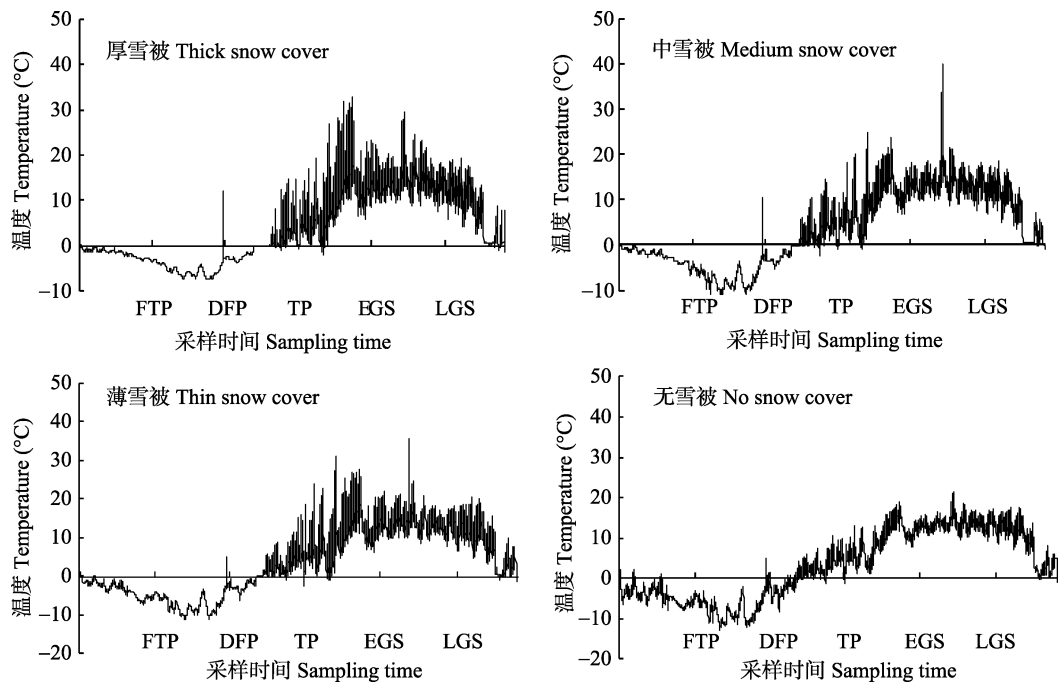


图2 研究样地不同雪被厚度下土壤温度动态。DFP, 深冻期; EGS, 生长季早期; FTP, 冻融期; LGS, 生长季末期; TP, 融冻期。  
Fig. 2 Dynamics of soil temperature under different depths of snow cover in the sampling forest. DFP, deep-freeze period; EGS, early growing season; FTP, freeze-thaw period; LGS, late growing season; TP, thawing period.

### 1.3 样品分析

将已采集到实验室的凋落叶分解袋打开, 小心去除泥土杂物及新生根系, 于65 °C烘干至恒质量, 称量并计算凋落叶质量损失率。氮含量采用半微量凯氏定氮法测定, 磷含量采用钼锑抗比色法测定, 碳含量采用硫酸-重铬酸钾外加热法测定。

### 1.4 计算公式及数据分析

质量损失贡献率公式为:

$$G(\%) = \frac{M_{i-1} - M_i}{M_0 - M_l} \times 100\%$$

其中 $G$ 为质量损失率(%),  $M_0$ 为凋落叶初始质量(g),  $M_i$ 为第 $i$ 次回收凋落叶袋时凋落叶烘干质量(g),  $M_l$ 为最后一次回收凋落叶袋时凋落叶烘干质量(g) (Zhu *et al.*, 2012)。

凋落物质量损失率( $M$ )公式为:

$$M(\%) = \frac{M_0 - M_i}{M_0} \times 100\%$$

养分释放率公式( $E$ )为:

$$E(\%) = \frac{E_{i-1} - E_i}{E_0} \times 100\%$$

式中 $E_0$ 为凋落叶初始元素含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),  $E_i$ 为第 $i$ 次回收凋落叶袋时凋落叶元素含量( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), 元素表现为净释放时 $E$ 为正值, 元素为净富集时 $E$ 为负值。

凋落叶分解Olson衰减指数模型为:

$$y = ae^{-kt}$$

其中 $y$ 为 $t$ 时间回收凋落叶袋的残留率(%),  $k$ 为分解系数,  $t$ 为回收凋落叶袋时间(a) (Olson, 1963)。

分解半衰期(50%分解):  $t_{0.05} = \ln 0.5 / (-k)$

完全分解时间(95%分解):  $t_{0.95} = \ln 0.05 / (-k)$  (宋新章等, 2009)

数据统计与分析使用SPSS 19.0和Excel完成, 采用单因素方差分析和最小显著差异法(LSD)比较不同雪被下调落叶分解率以及雪被斑块对凋落叶元素释放的影响。

## 2 结果分析

### 2.1 不同雪被下雪岭云杉凋落叶的分解率

经过一年的分解, 不同雪被覆盖下雪岭云杉凋落叶分解率达24.6%–29.2%, 且存在显著性差异( $p < 0.05$ ), 各时期雪岭云杉凋落叶分解率随雪被厚度的减小而降低, 即厚雪被中质量损失最大, 无雪被中质量损失最小(图3)。同一时期, 厚雪被下调落

叶分解率均显著高于无雪被和中雪被( $p < 0.05$ ); 除生长季后期外, 薄雪被和中雪被下调落叶分解率在其余4个时期中无明显差异( $p > 0.05$ ); 厚雪被与中雪被下调落叶分解率在冻融期、生长季前期和生长季后期中呈显著性差异( $p < 0.05$ ); 在生长季后期, 厚雪被下调落叶分解率远大于无雪被下调落叶分解率; 在深冻期和融冻期, 无雪被、薄雪被和中雪被下调落叶分解率均无显著差异, 而在厚雪被下存在显著性差异( $p < 0.05$ )。

利用Olson指数衰减模型对雪岭云杉凋落叶分解过程的残留率(1–质量损失率%)进行拟合(Olson, 1963), 并估算完成50%和95%分解所需的时间。天山雪岭云杉的 $k$ 值以厚雪被覆盖为最大(0.310), 完成50%和95%分解所需时间较短, 而无雪被下的 $k$ 值最小(0.273), 完成50%和95%分解所需时间较长(表1)。

### 2.2 不同雪被下雪岭云杉凋落叶在各时期的质量损失贡献率

雪被覆盖期内凋落叶质量损失贡献率略小于生长季, 实验表明, 雪岭云杉凋落叶质量损失在生长季前期消耗最多(图4)。生长季前期凋落叶质量损失贡献率随雪被厚度增加而降低, 其中无雪被下质量损失贡献率最高, 达到了32.1%; 而在生长季后期, 凋落叶质量损失贡献率随雪被厚度增加而增加; 雪被覆盖期凋落叶质量损失主要发生在冻融期和深冻期, 其中融冻期内凋落叶质量损失明显低于其余两个时期; 冻融期内雪岭云杉凋落叶分解贡献率基本随雪被厚度增加而增加, 且厚雪被下调落叶贡献率要比无雪被下高4%。

### 2.3 不同雪被下雪岭云杉凋落叶养分含量的变化

随着凋落叶分解的进行, 雪岭云杉凋落叶氮含量大体呈增加趋势(图5), 分解实验结束后, 不同雪被厚度下氮含量为薄雪被>厚雪被>中雪被>无雪被, 且差异不显著( $p > 0.05$ )。碳含量和C:N在不同雪被厚度下大致呈下降趋势(图5); 凋落叶碳含量在生长季后期大致表现为无雪被下最低, 厚雪被下最高, 在深冻期和生长季后期不同雪被处理下存在显著性差异( $p < 0.05$ ); 而在生长季后期, 碳氮比在薄雪被下明显降低, 其他雪被厚度下基本一致。不同雪被梯度下调落叶磷含量呈不规则变化(图5), 其中冻融期内4种雪被厚度下磷含量均高于初始值, 之后无雪被和薄雪被下磷含量随着时间的变化表现为逐渐

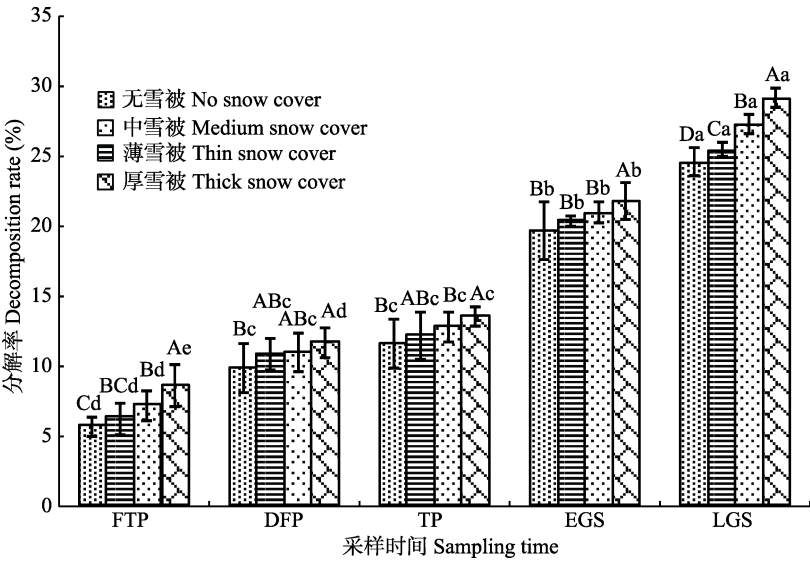


图3 不同雪被厚度下雪岭云杉凋落叶质量损失率(平均值±标准偏差,  $n = 5$ )。DFP, 深冻期; EGS, 生长季早期; FTP, 冻融期; LGS, 生长季末期; TP, 融冻期。大写字母表示相同时期不同雪被厚度差异性; 小写字母表示相同雪被厚度不同时期差异性 ( $p < 0.05$ )。

Fig. 3 Mass loss rates of *Picea schrenkiana* leaf litter under different depths of snow cover (mean  $\pm$  SD,  $n = 5$ ). DFP, deep-freeze period; EGS, early growing season; FTP, freeze-thaw period; LGS, late growing season; TP, thawing period. The capital letters indicate the difference of same period in different snow thickness. The lowercase letters indicate the difference of same snow thickness in different periods ( $p < 0.05$ ).

表1 雪岭云杉凋落叶非线性回归拟合Olson指数模型  
Table 1 Non-linear regression fitting Olson exponent model for leaf litter of *Picea schrenkiana*

雪被 Snow cover	回归方程 Regression model	分解系数 $k$ Decomposition constant $k$	相关系数 $r$ Correlation coefficient $r$	半分解时间 Time of half decomposition (a)	95%分解时间 Time of 95% decomposition (a)
厚雪被 Thick snow cover	$y = 98.009e^{-0.310x}$	0.310	0.97	2.336	9.664
中雪被 Medium snow cover	$y = 98.592e^{-0.296x}$	0.296	0.98	2.342	10.121
薄雪被 Thin snow cover	$y = 98.556e^{-0.277x}$	0.277	0.98	2.502	10.815
无雪被 No snow cover	$y = 99.251e^{-0.273x}$	0.273	0.98	2.539	10.973

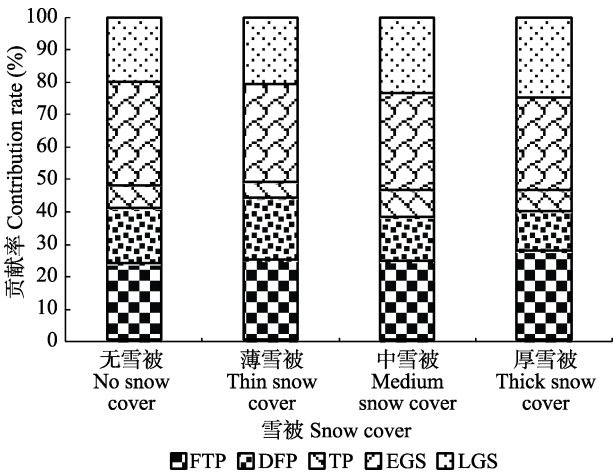


图4 不同雪被厚度下不同时期对雪岭云杉凋落叶质量损失的贡献率。DFP, 深冻期; EGS, 生长季早期; FTP, 冻融期; LGS, 生长季末期; TP, 融冻期。

Fig. 4 Proportional contribution (%) of the decomposition in different periods to the total decomposition of *Picea schrenkiana* leaf litter under different depths of snow cover. DFP, deep-freeze period; EGS, early growing season; FTP, freeze-thaw period; LGS, late growing season; TP, thawing period.

降低趋势, 且无雪被下磷含量始终低于有雪被下磷含量, 在冻融期和融冻期不同雪被厚度下具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

2.4 不同雪被厚度下雪岭云杉凋落叶养分释放动态

在雪岭云杉凋落叶分解过程中, 不同雪被厚度下碳元素经历了富集-释放-再富集-再释放的过程(图6), 且在融冻期, 凋落叶碳富集率以薄雪被和中雪被处理下最大。在冬季雪被覆盖期, 冻融期和融冻期中不同雪被梯度下调落叶氮表现为富集状态, 深冻期则表现为释放状态, 到生长季时期又表现为富集状态(图6); 其中在冻融期的薄雪被、中雪被和厚雪被处理下氮元素富集率最大, 而在融冻期则是无雪被和厚雪被下氮元素富集率最大, 在生长季前期氮元素富集率以中雪被和厚雪被处理下最大。凋落叶磷在冻融期不同雪被梯度下表现为富集现象, 到深冻期和融冻期时, 不同雪被厚度下磷元素表现

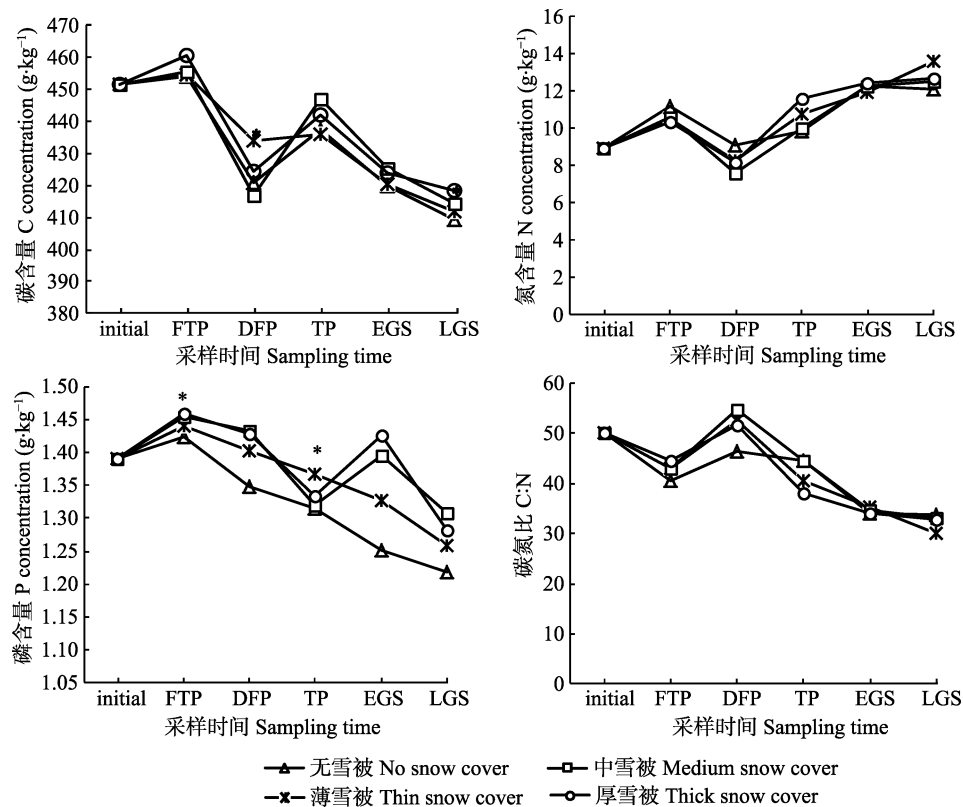


图5 不同雪被厚度下雪岭云杉凋落叶氮、磷、碳含量及碳氮比的动态变化。DFP, 深冻期; EGS, 生长季早期; FTP, 冻融期; LGS, 生长季末期; TP, 融冻期。initial, 初始期。\*, 同一时期不同厚度雪被斑块间差异显著( $p < 0.05$ )。

**Fig. 5** Dynamics of C, N, P contents and C:N in *Picea schrenkiana* leaf litter under different depths of snow cover. DFP, deep-freeze period; EGS, early growing season; FTP, freeze-thaw period; LGS, late growing season; TP, thawing period. initial, initial period. \*, significant difference among different snow cover thickness in the same period ( $p < 0.05$ ).

为释放状态; 生长季节前期, 无雪被和薄雪被梯度下磷元素表现为释放状态, 而中雪被和厚雪被梯度下磷元素则表现为富集状态, 进入生长季后期, 4种雪被梯度下磷元素均表现为释放状态, 至分解实验结束, 各雪被处理下凋落叶磷释放率无显著差异( $p > 0.05$ )。

### 3 讨论和结论

#### 3.1 不同雪被下雪岭云杉凋落叶在各时期的分解速率及其质量损失贡献率

以冬季变暖和极端气候事件等为主要特征的全球气候变化可能显著影响高纬度地区森林凋落叶分解等关键生态学过程(Makoto *et al.*, 2014)。一年的凋落叶分解实验表明, 季节性雪被不仅显著影响冻融期、深冻期和融冻期凋落叶分解, 而且持续影响生长季时期凋落叶分解。冬季分解时期, 雪岭云杉凋落叶分解率随雪被厚度增加而增加, 与前人的研究结论一致(Preston *et al.*, 2009; Aerts *et al.*, 2012; 何伟等, 2013), 这一结果表明凋落物分解对季节性

雪被响应较大, 同时气候变暖情景下季节性雪被变化也会进一步影响凋落物分解等山地森林物质循环过程(吴启骞等, 2013)。Olson凋落物分解系数( $k$ )常用来表示凋落物分解速率(Olson, 1963), 本研究中,  $k$ 值对雪被厚度变化具有明显的响应。可能因为温度波动幅度随着冬季雪被厚度的减小而逐渐增大(图2), 厚雪被具有隔热保温作用, 所提供的稳定环境更益于雪岭云杉凋落叶分解(吴启骞等, 2013)。此外, 各雪被斑块下的土壤动物群落和水热条件有所不同(Colbeck, 1983; Clein & Schimel, 1995; Uchida *et al.*, 2005), 使得起关键作用的微生物群落和数量亦有所差异; 一般分解者群落随雪被厚度的增加而愈加丰富, 生物种群活动及活性也更强(Tomaselli, 1991; Uchida *et al.*, 2005; 胡霞等, 2012a; Zhu *et al.*, 2012)。在生长季, 由于地形地貌和林窗格局等异质性因素导致阳光对样地照射的角度以及对林窗中心的辐射强度不同(He *et al.*, 2016), 因此不同雪被厚度下土壤温度产生了较大波动, 且波动幅度从厚雪被到无雪被逐渐减小, 使得昼夜温差产生较大差异,



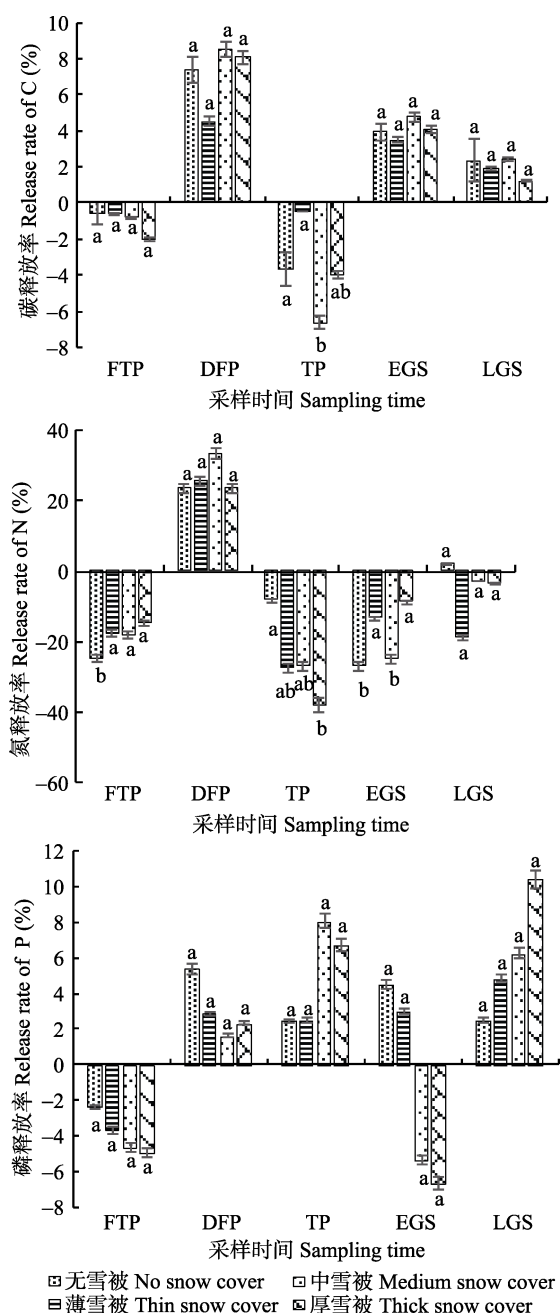


图6 不同时期不同雪被厚度下调落叶分解过程中碳、氮、磷的释放率(平均值 $\pm$ 标准偏差,  $n = 4$ )。DFP, 深冻期; EGS, 生长季早期; FTP, 冻融期; LGS, 生长季末期; TP, 融冻期。不同小写字母表示同一时期不同雪被厚度间差异显著( $p < 0.05$ )。

**Fig. 6** Release rates of C, N, P in leaf litter during decomposition under snow cover with different depths in different period (mean  $\pm$  SD,  $n = 4$ ). DFP, deep-freeze period; EGS, early growing season; FTP, freeze-thaw period; LGS, late growing season; TP, thawing period. Different small letters meant significant difference among different snow thickness in the same period ( $p < 0.05$ ).

而土壤动物和微生物活性易受温度的影响(曹宏杰和倪红伟, 2015), 能间接影响凋落物分解速率。武启骞等(2013)对川西高山森林季节性雪被下调落叶

分解动态的研究也得到了相同的结论。

雪被下不同时期对凋落叶分解具有不同的作用机制, 因此不同凋落物分解阶段或许对雪被覆盖表现出不同的响应机制。本研究中, 在冬季3个关键时期, 厚雪被处理下调落叶分解贡献率总是大于无雪被处理下调落叶分解贡献率, 冬季雪被覆盖显著提高了凋落叶的分解贡献率。可能由于地表雪被为土壤动物以及微生物活性提供了隔热保温且相对稳定的环境(Clein & Schimel, 1995; 夏磊等, 2011), 同时雪被在冻融期和融冻期有更强的淋洗作用。进入生长季前期, 无雪被厚度下调落叶分解贡献率明显高于有雪被覆盖下调落叶分解贡献率, 且随雪被厚度增加而降低。可能因为面对冬季严酷环境和频繁的温度变化, 无雪被梯度下的冻融循环更为剧烈, 进而破坏凋落叶物理结构, 提高凋落叶可分解程度(徐李亚等, 2015)并促进下一阶段的分解过程。另外, 由于冬季雪被覆盖期凋落叶分解速度加快, 易分解组分大量消耗, 导致生长季时期雪被覆盖下调落叶分解缓慢(Tan *et al.*, 2014)。

### 3.2 不同雪被下雪岭云杉凋落叶碳、氮、磷含量的变化

天山地区频繁的降雪、融化以及冻融循环作用可能对凋落叶质量产生一定的影响, 继而影响整个分解过程。本研究表明, 雪岭云杉凋落叶碳、氮、磷含量对不同雪被厚度均产生了各自的响应。在冻融期, 不同雪被厚度下调落叶碳含量表现为上升趋势且各雪被厚度间无明显差异, 可能因为冬季初期不同雪被厚度下雪岭云杉凋落叶质量完全相同, 且环境条件基本一致, 雪被厚度对凋落叶碳含量无明显影响。而凋落叶碳含量有升高趋势说明在这一时期发生了大量的质量损失, 导致不同雪被厚度下调落叶碳含量表现出略微增加的现象。进入深冻期, 各雪被处理下调落叶碳含量达到最低且存在显著性差异, 这是因为土壤中的分解者随雪被厚度的增加而变得更为活跃(何伟等, 2013), 该时期凋落叶碳含量降低与分解者有关(Aerts *et al.*, 2012)。进入融冻期后, 土壤温度变化剧烈, 强烈的冻融循环和淋洗作用对凋落物碳含量产生影响, 到生长季时期, 凋落叶碳含量有所减少, 且不同雪被处理下调落叶碳含量在生长季后期存在明显差异, 可能与气温逐渐升高所导致的淋溶作用以及更为活跃的分解者有关。

凋落叶分解过程中氮、磷元素的释放通常被认为是为分解者提供良好底物的过程, 并从营养方面对凋落物分解过程进行调控。虽然其释放特征能够根据土壤营养情况分别表现为富集和释放, 但释放出来的氮、磷元素常被看作是凋落物对于分解者的可食性指标(Preston *et al.*, 2009; Hobbie *et al.*, 2012)。本研究结果表明, 随着凋落叶分解的进行, 氮含量总体表现为上升趋势; 且雪被覆盖下氮含量基本表现为增加, 这与Sing等(1999)和胡霞等(2012a)的研究结论一致, 这一结果与两个原因有关: 一是冬季无雪被梯度下昼夜热量变化在土壤表层及以下产生反复的冻结-解冻过程, 严重影响了微生物活性以及微生物种群数量和群落结构; 二是当积雪融化时, 雪被中的可溶性无机氮、有机污染物等氮源会释放大量的氮元素(胡霞等, 2012b), 造成凋落叶氮含量增加。凋落叶磷含量在冻融初期表现为上升趋势, 可能因为凋落叶中的磷含量过低导致微生物难以利用, 只能先从土壤中富集, 才能进一步分解。整个时期无雪被和薄雪被下磷含量呈逐渐降低趋势, 而中雪被和厚雪被下磷含量在生长季初期呈上升趋势, 随后在生长季后期表现为下降趋势, 这与人所得研究结果(武启寿等, 2015)一致。在凋落叶分解过程中, 凋落叶磷含量的动态变化与凋落叶质量损失率有很强的相关性(何洁等, 2014), 凋落叶干质量损失大于磷元素释放率时, 磷含量表现出上升趋势。另外, 本研究中雪被斑块显著影响冻融期和融冻期凋落叶磷含量, 可能由于磷是易于淋溶损失的元素, 不同雪被厚度下这两个时期的淋溶差异导致凋落叶磷的快速损失。

### 3.3 不同雪被厚度下雪岭云杉凋落叶碳、氮、磷释放动态

凋落叶分解过程中碳释放是区域内碳循环中重要的组成过程。不同时期影响凋落叶碳释放的因素不同。以往很多学者认为冬季冻结情况下凋落叶分解处于“停滞”状态, 然而近年来, 已有不少研究指出冬季冻结环境中凋落叶分解仍在进行(Mendonça & Stott, 2003; 胡霞等, 2012b; 何伟等, 2013; 刘涛等, 2017)。深冻期的温度相对较低, 淋溶作用比较弱, 因此土壤动物、微生物等分解者的活动是这一时期凋落叶碳释放的主要贡献者(Mendonça & Stott, 2003; 殷秀琴等, 2007; 李俊等, 2016)。本研究中融冻期凋落叶碳富集率以薄雪被和中雪被处理下最大,

可能因为淋溶作用导致凋落叶结构松散、团粒化, 更易被微生物侵入, 且微生物主导的纯分解过程比较复杂, 有时为维持自身浓度平衡, 会向凋落物分解部分输送一些元素, 导致元素发生富集现象, 表现为残留物有所增加或减少缓慢。冬季不同雪被厚度下凋落叶经历了冻融循环以及淋溶作用, 即使不易分解物质不断累积, 物理和化学过程对凋落叶表面结构的破坏也加速了凋落叶分解, 因此很大程度上冬季雪被影响着凋落叶碳释放。

凋落叶分解过程中氮的变化状态分为3个过程: 淋溶(释放)、固定(N吸收)、矿化(N释放)(胡霞等, 2012b); 在Berg和McClaugherty (2008)的研究中, 早期凋落叶氮先被固定, 随后表现为净释放; 而在Bosatta和Staaf (1982)的研究中, *Pinus sylvestris*在分解过程中凋落叶氮表现为先释放再富集, 本研究结论与Berg和McClaugherty (2008)的研究结果不一致, 可能与凋落叶物种和土壤分解者群落的不同有关; 本研究中冻融期有雪被下氮元素富集率最大, 融冻期无雪被和厚雪被下氮元素富集率最大, 到生长季前期氮元素富集率以中雪被和厚雪被处理下最大, 出现这一现象的原因是雪岭云杉凋落叶中碳氮比的初始值为50.278, 远远大于氮元素固定和释放的临界值25 (Chapin *et al.*, 2002), 不足以满足凋落叶中微生物分解代谢的需求, 因此微生物开始从外界土壤吸收氮元素, 大量的氮元素从土壤向凋落叶转移, 从而导致凋落叶氮表现为富集现象。在融冻期和生长季时期凋落叶氮发生富集现象, 可能是冻融期和深冻期强烈的冻融循环作用以及土壤动物破碎作用使微生物更易附着在物理结构受到破坏的凋落叶上(Cragg & Bardgett, 2001), 从而加强氮元素的固持。凋落叶磷在分解过程中不仅表现出释放规律, 而且亦被微生物所固持, 甚至从土壤中富集, 呈现释放和富集两种模式(Hobbie *et al.*, 2012), 可能因为微生物需求和土壤养分不同。本研究中, 凋落叶磷在冻融期呈现富集状态, 这表明在早期分解者数量和活性受到冻融破碎和土壤动物取食的影响, 导致外界环境中的磷元素被分解者固持(何洁等, 2014); 而后期凋落叶磷表现为释放状态可能因为雪被具有绝热保温的功能, 为微生物活动提供了相对稳定的分解环境(Wu *et al.*, 2010), 同时新鲜凋落叶也为微生物提供分解原料。在生长季前期中雪被和厚雪被下磷元素表现为富集状态, 可能因为林窗内强烈的阳



光辐射蒸发了凋落叶表面的水分, 而水分作为凋落物分解的关键因子, 对微生物赖以生存的环境起着决定性作用, 从而抑制了凋落叶磷的释放。

综上所述, 本研究初步表明季节性雪被对中高山森林生态系统凋落叶分解过程具有显著影响。雪岭云杉凋落叶分解速率随雪被厚度的增加而增加, 由于受到不同雪被覆盖时期特有作用特征的影响, 不同雪被厚度下凋落叶碳、氮、磷含量变化特征明显不同。在全球气候变暖的背景下, 雪被厚度减小使得凋落物分解过程氮元素释放得到促进, 而磷元素释放却被抑制。这些结果为深入了解物质循环等关键生态过程在全球变化情景下对冬季环境条件改变的响应提供了一定的基础数据。

## 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.
- Aerts R, Callaghan TV, Dorrepaal E, van Logtestijn RSP, Cornelissen JHC (2012). Seasonal climate manipulations have only minor effects on litter decomposition rates and N dynamics but strong effects on litter P dynamics of sub-arctic bog species. *Oecologia*, 170, 809–819.
- Baptist F, Yoccoz NG, Choler P (2010). Direct and indirect control by snow cover over decomposition in alpine tundra along a snowmelt gradient. *Plant and Soil*, 328, 397–410.
- Barrett K (2008). *Carbon Accumulation and Storage in Amazonian Ecosystems*. PhD dissertation, Clark University, Worcester, USA.
- Berg B, McClaugherty C (2008). *Plant Litter. Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*, 2nd edn. Springer, New York.
- Bleak AT (1970). Disappearance of plant material under a winter snow cover. *Ecology*, 51, 915–917.
- Bosatta E, Staaf H (1982). The control of nitrogen turn-over in forest litter. *Oikos*, 39, 143–151.
- Cao HJ, Ni HW (2015). Research advances in soil microbial diversity and its impact factors. *Territory & Natural Resources Study*, 3, 85–88. [曹宏杰, 倪红伟 (2015). 土壤微生物多样性及其影响因素研究进展. 国土与自然资源研究, 3, 85–88.]
- Chapin FS, Matson PA, Mooney HA (2002). Carbon input to terrestrial ecosystems. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology*, 97–122.
- Clein JS, Schimel JP (1995). Microbial activity of tundra and taiga soils at sub-zero temperatures. *Soil Biology and Biochemistry*, 27, 1231–1234.
- Colbeck SC (1983). Theory of metamorphism of dry snow. *Journal of Geophysical Research Oceans*, 88, 5475–5482.
- Cragg RG, Bardgett RD (2001). How changes in soil faunal diversity and composition within a trophic group influence decomposition processes. *Soil Biology and Biochemistry*, 33, 2073–2081.
- He J, Jiang XM, Yang WQ, Ni XY, Xu LY, Li H, Wu FZ (2014). Effects of snow patches on the release of N and P during foliar litter decomposition in an alpine forest of western Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 2158–2166. [何洁, 蒋先敏, 杨万勤, 倪祥银, 徐李亚, 李晗, 吴福忠 (2014). 雪被斑块对川西高山森林凋落叶N和P释放的影响. 应用生态学报, 25, 2158–2166.]
- He W, Wu FZ, Yang WQ, Tan B, Zhao YY, Wu QQ, He M (2016). Lignin degradation in foliar litter of two shrub species from the gap center to the closed canopy in an alpine fir forest. *Ecosystems*, 19, 115–128.
- He W, Wu FZ, Yang WQ, Wu QQ, He M, Zhao YY (2013). Effect of snow patches on leaf litter mass loss of two shrubs in an alpine forest. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 306–316. [何伟, 吴福忠, 杨万勤, 武启骞, 何敏, 赵野逸 (2013). 雪被斑块对高山森林两种灌木凋落叶质量损失的影响. 植物生态学报, 37, 306–316.]
- Hobbie SE, Eddy WC, Buyarski CR, Adair EC, Ogdahl ML, Weisenhorn P (2012). Response of decomposing litter and its microbial community to multiple forms of nitrogen enrichment. *Ecological Monographs*, 82, 389–405.
- Hu X, Wu N, Wang Q, Wu Y (2012a). Effects of snowpack and litter input on soil nitrogen dynamics in the Eastern Tibetan Plateau. *Ecology and Environmental Sciences*, 21, 1789–1794. [胡霞, 吴宁, 王乾, 吴彦 (2012a). 青藏高原东缘雪被覆盖和凋落物添加对土壤氮素动态的影响. 生态环境学报, 21, 1789–1794.]
- Hu X, Wu N, Wu Y, Zuo WQ, Guo HX, Wang JN (2012b). Effects of snow cover on the decomposition and nutrient dynamics of *Sibiraea angustata* leaf litter in western Sichuan Plateau, Southwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 23, 1226–1232. [胡霞, 吴宁, 吴彦, 左万庆, 郭海霞, 王金牛 (2012b). 川西高原季节性雪被覆盖对窄叶鲜卑花凋落物分解和养分动态的影响. 应用生态学报, 23, 1226–1232.]
- Jia BR, Zhou GS, Liu YZ, Jiang YL (2016). Spatial pattern and environmental controls of annual litterfall production in natural forest ecosystems in China. *Scientia Sinica Vitae*, 46, 1304–1311. [贾丙瑞, 周广胜, 刘永志, 蒋延玲 (2016). 中国天然林凋落物量的空间分布及其影响因子分析. 中国科学: 生命科学, 46, 1304–1311.]
- Li J, Wu FZ, Yang WQ, Tan B, Peng Y, Wang B, Chang CH (2016). Effects of soil fauna on microbial community structure in foliar litter during winter decomposition in an alpine meadow. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 22, 27–34. [李俊, 吴福忠, 杨万勤, 谭波, 彭艳, 王滨, 常晨晖 (2016). 高山草甸冬季凋落物

- 分解过程中土壤动物对微生物群落结构的影响. 应用与环境生物学报, 22, 27–34.]
- Liu T, Sun SQ, Qiu Y (2017). Dynamic characteristics of litter decomposition of three typical plant species in subalpine ecosystem of western Sichuan, China. *Mountain Research*, 5, 663–668. [刘涛, 孙守琴, 邱阳 (2017). 川西亚高山生态系统三种典型植物凋落物分解动态特征. 山地学报, 5, 663–668.]
- Makoto K, Kajimoto T, Koyama L, Kudo G, Shibata H, Yanai Y, Cornelissen JHC (2014). Winter climate change in plant-soil systems: Summary of recent findings and future perspectives. *Ecological Research*, 29, 593–606.
- Mendonça ES, Stott DE (2003). Characteristics and decomposition rates of pruning residues from a shaded coffee system in Southeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, 57, 117–125.
- Olson JS (1963). Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 44, 322–331.
- Parton W, Silver WL, Burke IC, Grassens L, Harmon ME, Currie WS, King JY, Adair EC, Brandt LA, Hart SC (2007). Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 315, 361–364.
- Paudel E, Dossa GG, de Blécourt M, Beckschäfer P, Xu JC, Harrison RD (2016). Quantifying the factors affecting leaf litter decomposition across a tropical forest disturbance gradient. *Ecosphere*, 6, 1–20.
- Preston CM, Nault JR, Trofymow JA (2009). Chemical changes during 6 years of decomposition of 11 litters in some Canadian forest sites. Part 2.  $^{13}\text{C}$  abundance, solid-state  $^{13}\text{C}$  NMR spectroscopy and the meaning of “lignin”. *Ecosystems*, 12, 1078–1102.
- Saccone P, Morin S, Baptist F, Bonneville JM, Colace MP, Domine F, Faure M, Geremia R, Lochet J, Poly F, Lavorel S, Clément JC (2013). The effects of snowpack properties and plant strategies on litter decomposition during winter in subalpine meadows. *Plant and Soil*, 363, 215–229.
- Sing 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 Soil*, 29, 371–378.
- Song XZ, Jiang H, Ma YD, Yu SQ, Zhou GM, Peng SL, Dou RP, Guo PP (2009). Litter decomposition across climate zone in Eastern China: The integrated influence of climate and litter quality. *Acta Ecologica Sinica*, 29, 5219–5226. [宋新章, 江洪, 马元丹, 余树全, 周国模, 彭少麟, 窦荣鹏, 郭培培 (2009). 中国东部气候带凋落物分解特征——气候和基质质量的综合影响. 生态学报, 29, 5219–5226.]
- Song XZ, Jiang H, Zhang HL, Yu SQ, Zhou GM, Ma YD, Chang SX (2008). A review on the effects of global environment change on litter decomposition. *Acta Ecologica Sinica*, 28, 4414–4423. [宋新章, 江洪, 张慧玲, 余树全, 周国模, 马元丹, Scott X. Chang (2008). 全球环境变化对森林凋落物分解的影响. 生态学报, 28, 4414–4423.]
- Tan B, Wu FZ, Yang WQ, He XH (2014). Snow removal alters soil microbial biomass and enzyme activity in a Tibetan alpine forest. *Applied Soil Ecology*, 76, 34–41.
- 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.
- Taylor BR, Parkinson D (1988). Does repeated freezing and thawing accelerate decay of leaf litter? *Soil Biology and Biochemistry*, 20, 657–665.
- Tomaselli M (1991). The snow-bed vegetation in the Northern Apennines. *Vegetatio*, 94, 177–189.
- Uchida M, Mo W, Nakatsubo T, Tsuchiya Y, Horikoshi T, Koizumi H (2005). Microbial activity and litter decomposition under snow cover in a cool-temperate broad-leaved deciduous forest. *Agricultural & Forest Meteorology*, 134, 102–109.
- Vitousek PM, Turner DR, Parton WJ, Sanford RL (1994). Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: Patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, 75, 418–429.
- 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.
- Wu QQ, Wu FZ, Yang WQ, Xu ZF, He W, He M, Zhao YY, Zhu JX (2013). The effects of seasonal snow cover on litter decomposition in alpine forest. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 296–305. [武启骞, 吴福忠, 杨万勤, 徐振锋, 何伟, 何敏, 赵野逸, 朱剑霄 (2013). 季节性雪被对高山森林凋落物分解的影响. 植物生态学报, 37, 296–305.]
- Wu QQ, Wu FZ, Yang WQ, Zhao YY, He W, He M, Zhu JX (2015). Effect of snow cover on phosphorus release from leaf litter in the alpine forest in eastern Qinghai-Tibet Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4115–4127. [武启骞, 吴福忠, 杨万勤, 赵野逸, 何伟, 何敏, 朱剑霄 (2015). 冬季雪被对青藏高原东缘高海拔森林凋落叶P元素释放的影响. 生态学报, 35, 4115–4127.]
- Xia L, Wu FZ, Yang WQ (2011). Contribution of soil fauna to mass loss of *Abies faxoniana* leaf litter during the freeze-thaw season. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 1127–1135. [夏磊, 吴福忠, 杨万勤 (2011). 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. 植物生态学报, 35, 1127–1135.]
- Xu LY, Yang WQ, Li H, Ni XY, He J, Wu FZ (2015). Effects of forest windows on soluble carbon in litter decomposition process in the upper reaches of the Yangtze River. *Resource and Environment in the Yangtze Basin*, 24, 882–891. [徐李亚, 杨万勤, 李晗, 倪祥银, 何洁, 吴福忠 (2015). 长江上游高山森林林窗对凋落物分解过程中可溶性碳的影响. 长江流域资源与环境, 24,

882–891.]

- Xu WQ, Yang L, Chen X, Gao YQ, Wang L (2016). Carbon storage, spatial distribution and the influence factors in Tianshan forests. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 364–373. [许文强, 杨辽, 陈曦, 高亚琪, 王蕾 (2016). 天山森林生态系统碳储量格局及其影响因素. 植物生态学报, 40, 364–373.]
- Yin XQ, Song B, Qiu LL (2007). Dynamic characteristics of N, P, K in the litter-soil fauna-soil system of mixed *Pinus koraiensis* and broad-leaved forest. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 128–134. [殷秀琴, 宋博, 邱丽丽 (2007). 红松阔叶混交林凋落物-土壤动物-土壤系统中N、P、K的动态特征. 生态学报, 27, 128–134.]
- Zhang X, Wang W (2015). Control of climate and litter quality on leaf litter decomposition in different climatic zones. *Journal of Plant Research*, 128, 791–802.
- Zhu JX, He XH, Wu FZ, Tan B (2012). Decomposition of *Abies faxoniana* litter varies with freeze-thaw stages and altitudes in subalpine/alpine forests of southwest China. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 27, 586–596.

特邀编委: 李胜功 责任编辑: 王 葳



扫码加入读者圈  
听语音, 看问答