

# 不同生境条件下西藏原始冷杉林凋落物分解特征与土壤养分的关系

代松家<sup>1,2,4</sup>, 段斐<sup>2,3,4</sup>, 方江平<sup>2,3,4</sup>, 龙春林<sup>1</sup>, 周晨霓<sup>2,3,4</sup>

(1. 中央民族大学 生命与环境科学学院, 北京 100081; 2. 西藏农牧学院 高原生态研究所, 西藏 林芝 860000; 3. 西藏农牧学院 西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 4. 西藏自治区生态安全联合实验室, 西藏 林芝 860000)

**摘要:** [目的] 研究不同生境条件下(林内、林外、林缘)藏东南急尖长苞冷杉林(*Abies georgei* var. *smithii*)凋落物分解特征与土壤养分特征之间的关系, 为深入了解高寒高山森林生态系统物质循环过程提供依据。[方法] 采用野外分解袋法和室内分析相结合, 在林内、林外、林缘3种不同生境条件下对藏东南急尖长苞冷杉林凋落物进行了原位分解试验。[结果] 分解速率总体上呈现出: 林内>林缘>林外的特点, 逐月分解率的变异系数表现为: 林内(34.83%)<林缘(57.35%)<林外(72.09%); Olson指数衰减模型的模拟结果显示不同生境条件下(林内、林缘、林外)凋落物分解50%需要的时间为2.11, 2.52, 2.34 a, 分解95%需要的时间为8.96, 10.01, 10.84 a; 3种不同生境土壤养分在空间上差异显著, 林内生境中与凋落物分解速率呈现极显著相关的土壤养分因子有土壤总有机碳(TOC)含量、N含量、土壤微生物量碳(SMBC)含量、土壤微生物量氮(SMBN)含量以及 $W_C : W_N$ 值; 林外、林缘生境中与凋落物分解速率相关性最大的为土壤TOC含量, 其次为 $W_C : W_N$ 值。[结论] 生境条件的差异对凋落物分解速率有显著影响, 在不同的生境条件下对凋落物分解影响起主导作用的土壤养分因素不同, 凋落物—土壤生物地化循环紧密联系, 相互作用关系复杂, 生境作用效应突出。

**关键词:** 凋落物分解; 土壤养分; 西藏; 急尖长苞冷杉

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2020)03-0056-08

中图分类号: S718.52, Q149

**文献参数:** 代松家, 段斐, 方江平, 等. 不同生境条件下西藏原始冷杉林凋落物分解特征与土壤养分的关系[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 56-63. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.009; Dai Songjia, Duan Fei, Fang Jiangping, et al. Relationship between decomposition characteristics of litters and soil nutrients in Tibetan fir forest under different habitat conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(3): 56-63.

## Relationship Between Decomposition Characteristics of Litters and Soil Nutrients in Tibetan Fir Forest Under Different Habitat Conditions

Dai Songjia<sup>1,2,4</sup>, Duan Fei<sup>2,3,4</sup>, Fang Jiangping<sup>2,3,4</sup>, Long Chunlin<sup>1</sup>, Zhou Chenni<sup>2,3,4</sup>

(1. College of Life and Environmental Sciences, Minzu University of China,

Beijing 100081, China; 2. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agriculture & Animal

Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China; 3. Key Laboratory of Forest Ecology in Tibet

Plateau, Ministry of Education, Tibet Agriculture & Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000, China; 4. United Key Laboratories of Ecological Security, Tibet Autonomous Region, Nyingchi, Tibet 860000, China)

**Abstract:** [Objective] The relationship between litter decomposition characteristics and soil nutrient characteristics of *Abies georgei* var. *smithii* forest in Southeastern Tibet under different habitat conditions, i. e., in forest (IF), outside forest (OF), and beside forest (BF) was studied to provide basic data for further understanding the material circulation process of the alpine forest ecosystem. [Methods] Based on field decomposition bag method and indoor analysis, in situ decomposition experiments were conducted on *A. georgei* forest litters in

收稿日期: 2019-12-08

修回日期: 2020-01-07

资助项目: 西藏自治区重大科技专项“藏东南典型林分可燃物空间分布格局及潜在火行为研究”(XZ201901-GA-03); 西藏自治区科技厅—西藏农牧学院厅校联合基金(XZ2019ZR-G-70)

第一作者: 代松家(1983—), 男(汉族), 河南省新蔡县人, 博士研究生, 研究方向为高原生态学。Email: daisongjia@163.com。

通讯作者: 周晨霓(1984—), 女(汉族), 四川省成都市人, 硕士, 副教授, 主要从事森林土壤生态研究。Email: chenni2018@126.com。

Southeast Tibet under three different habitats. [Results] The decomposition rate showed the characteristics of  $IF > BF > OF$ , and the variation coefficient of the monthly decomposition rate represented the characteristics of  $IF (34.83\%) < BF(57.35\%) < OF (72.09\%)$ . According to the simulation results of the Olson exponential decay model, the decomposition times of litters in different habitat conditions (IF, BF, and OF) were 2.11, 2.52, and 2.34 years, respectively, and 95% of decomposition times were 8.96, 10.01, and 10.84 years, respectively. Soil nutrients in the three different habitats were significantly different in space. The soil nutrient factors in the forest habitats with significant correlation with the litter decomposition rate were soil total organic carbon (TOC) content, N content, soil microbial biomass carbon content, soil microbial biomass nitrogen content, and  $W_C:W_N$  value. The soil TOC content was maximum correlated with the decomposition rate of litter in the habitats outside and at forest margins, followed by  $W_C:W_N$  value. [Conclusion] The difference of habitat conditions had a significant impact on the decomposition rate and nutrient release rate of litters, and different soil nutrient factors played a leading role in the decomposition of litters under different habitat conditions. The litter-soil biogeochemical cycle was closely related to complex interaction and a prominent habitat effect.

**Keywords:** litter decomposition; soil nutrients; Tibet; *Abies georgei* var. *smithii*

森林凋落物的生产与分解不仅是森林生态系统中物质循环的主要途径,同时作为植物生长发育过程中新陈代谢的产物,凋落物在森林生态系统养分循环中也是链接植物与土壤的“纽带”<sup>[1-2]</sup>。而凋落物的分解最重要的功能之一就是将植物吸收的养分重新释放回土壤,形成土壤养分库<sup>[3]</sup>,凋落物—土壤生物地化循环相辅相成,相互作用十分复杂,“凋落物—土壤”连续体中两者的相互关系十分紧密<sup>[4]</sup>。首先,凋落物分解过程中的养分释放对保持土壤肥力、维持土壤结构稳定性、增强土壤微生物活性等方面均具有重要作用<sup>[5-6]</sup>,提高凋落物分解速率,能够加快土壤营养循环、改善土壤质量。前人相关研究表明,森林年凋落物量显著提高土壤含水量、土壤 P 和 K 的含量<sup>[7]</sup>,而土壤 pH 值和电导率与凋落物量呈显著负相关<sup>[8]</sup>。然而,土壤质量的不同必然引起植物生长状况的差异,而这种差异可能首先反应在各个植物器官部位养分元素含量的不同,进而造成凋落物基质质量的差异<sup>[9]</sup>,而且凋落物基质质量可以显著地影响其分解速率和养分释放动态<sup>[2,8-9]</sup>。前人在关于土壤立地条件对凋落物分解速率的影响研究中发现,土壤养分含量高的地区凋落物基质 N、P 易于富集<sup>[7]</sup>,且土壤理化性质不同,使得土壤中作为分解者的微生物种类、数量也有差异,进而在一定程度上影响凋落物分解<sup>[10]</sup>,且土壤养分供应和养分循环的正反馈作用是通过凋落物产量的增加而增加<sup>[11]</sup>。可见,凋落物数量及分解快慢在一定程度上代表了土壤的营养状况<sup>[12]</sup>,而土壤养分状况又直接或间接地影响着凋落物的生产及分解<sup>[13]</sup>,深刻剖析森林凋落物分解特征与土壤养分的相互影响机制对于阐明森林生态系统养分循环机理具有重要意义。

目前对于凋落物分解的影响因素的研究,国内外学者多集中在气候<sup>[14-15]</sup>、凋落物质量<sup>[2,8-9]</sup>和土壤状况<sup>[7-8]</sup>等方面,但对于不同立地条件(生境)下凋落物分解特征的研究较少,仅有的少量相关文献也仅限于林窗大小对凋落物分解的影响<sup>[16-17]</sup>、不同植被类型<sup>[3]</sup>或不同演替阶段植被凋落物分解特征的差异<sup>[9]</sup>等。与青藏高原的隆升和地质时期的冷暖变化关系密切的西藏亚高山暗针叶林在西藏分布很广<sup>[18]</sup>,占全区森林总面积的 43%,总蓄积量的 61%,是西藏森林资源中最重要的组成部分,具有重要的经济、生态和理论研究价值<sup>[19]</sup>。海拔高度 3 600~4 400 m,冷杉是该区森林群落的主要建群种,是阴坡高山林线的优势树种。由于独特的地理环境和水热条件,该林分表现为树木高大,生长周期持续时间长,林下植物丰富,林分蓄积量高等特征,同时该区域极少受到人类活动的干扰,林分保持了完整性和系统的连续性,是进行天然林凋落物基础研究的“天然实验地”。目前关于西藏原始暗针叶林凋落物的报道仅见于林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)凋落物的生产及养分归还<sup>[20]</sup>,而关于西藏急尖长苞冷杉林(*Abies georgei* var. *smithii*)凋落物分解的相关研究还未见报道。本研究以藏东南色季拉山为研究区域,以该区域典型亚高山暗针叶林—尖长苞冷杉原始林凋落物为研究对象,分别研究了在不同生境类型下(林内、林外、林缘)凋落物分解动态及养分释放特征,分析在不同的生境条件下凋落物分解速率与土壤养分之间的关系,探讨土壤养分特征对凋落物分解的影响机制,旨在为深入了解高寒高山森林生态系统物质循环过程研究提供基础数据和理论依据。

## 1 研究区概况

西藏色季拉山位于西藏东南部雅鲁藏布江大拐弯西北侧、念青唐古拉山与喜马拉雅山接合处的林芝县境内,属念青唐古拉山余脉,山体位于  $93^{\circ}12' - 95^{\circ}35'E, 29^{\circ}10' - 30^{\circ}15'N$ 。山体走向主要为西北—东南,形成较大范围的東西坡面。大部分区域处于海拔 3 000 m 以上,最高峰色季拉山顶海拔 5 300 m,最低处位于东坡泊隆藏布峡谷,海拔 2 100 m 左右。受印度洋季风的影响,气候具有冬温夏凉、干湿季分明的特点。年均降水量 1 134 mm,蒸发量 544.0 mm,

雨季为 6—9 月份,其中以 8 月份最为集中,占全年降水的 30%。年平均气温  $6.5^{\circ}C$ ,最冷月平均气温  $0 \sim 2.8^{\circ}C$ ,最热月平均气温  $11.5 \sim 18.2^{\circ}C$ ,无霜期 180 d,平均相对湿度 60%~80%。土壤以山地棕壤和酸性棕壤为主。急尖长苞冷杉林平均树高 33.4 m,平均胸径 37 cm,郁闭度 0.6~0.8。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置

凋落物分解试验选取林内(IF)、林缘(BF)、林外(OF)共 3 块样地,每一种样地的生境特征及位置详见表 1。

表 1 样地设置及特征

样地编号	生境类型	生境特征及位置
IF	林内	西藏林芝高山森林生态国家级野外生态观测研究站冷杉标准样地,郁闭度 0.7
BF	林缘	位于 IF 样地上方的冷杉林林缘,主要植被为高山柳灌丛,土壤为山地暗棕壤
OF	林外	位于距离 BF 样地 400 米处空旷地,土壤仍为暗棕壤,砾石含量较多,雨季分布少量当年生草本植物

### 2.2 凋落物分解试验

凋落物的分解采用网袋法。于 2016 年 11 月在 1 号样地收集新鲜的冷杉林凋落物,在  $80^{\circ}C$  烘干至恒重。取 15 g 的左右凋落物粉碎、过筛,用作化学元素分析(C, N, P, K)以了解冷杉林凋落物养分初始含量。取 15 g 装入孔径为 0.2 mm 尼龙纱布制成的分解袋(15 cm×15 cm)内,装入的样品厚度不超过 0.5 cm,尽量平铺在网袋里面。将分解袋于 2016 年 12 月 1 号一次性随机放置于这 3 块试验样地中,埋入地表下 15 cm 处,如果遇到苔藓层,剥开苔藓层,将分解袋接触土壤,使其尽可能接近自然分解状态。凋落物分解试验需要  $3 \times 5 \times 12 = 180$  袋,考虑到试验进行中分解袋可能损坏,所以预埋分解袋 200 袋,并依次编号 1, 2, 3……200。在 2017 年每月月初收回,每个样地收回 5 袋,每月总共收回  $3 \times 5 = 15$  袋。将收回的样品进行清理,而后置于  $80^{\circ}C$  下烘干 48 h 至恒重,称重计算出凋落物干物质失重率(用留存率表示)及逐月分解率。

在取回凋落物分解袋的同时采集土壤样品,在每种生境类型样地内放置凋落物分解袋处,用  $100\text{ cm}^3$  环刀测定土壤容重,按 0—10, 10—20, 20—40 cm 深度采集土壤约 200 g,分别装入自封袋中并做好标记。按土层每 3 个点混合为 1 份,均为 3 次重复。拣除石块等杂物后,每份土样又均匀分成两部分,一部分放入冰箱(温度  $4^{\circ}C$ )用于测定土壤微生物量碳和微生物量氮;另一部分装在土样袋中,运回实验室自然风干用于测定土壤有机碳、全氮、全磷。

### 2.3 土壤性质测定

土壤容重采用环刀法测定,土壤总有机碳采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法,凯氏定氮法测土壤 N 含量,钼蓝比色分光光度法测定土壤 P 含量,火焰光度法测定土壤 K 含量,土壤微生物量碳、氮的测定采用氯仿熏蒸浸提法<sup>[21-22]</sup>,且所有样品在 48 h 内测定。

### 2.4 数据处理与分析

根据收集器面积的凋落物质量换算为每公顷的凋落量( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),根据逐次测定的数据分析凋落物量的月动态和年总凋落物量;凋落物干物质留存率  $d_w = M_t/M_0 \times 100\%$ ,式中:  $M_t$  为  $t$  月时样品的干物质质量;  $M_0$  为初始样品干物质质量;逐月分解率  $DR = d_{w-1} - d_w$ ;应用 Olson 指数衰减模型  $\ln(M_t/M_0) = -kt$ 拟合求得分解速率常数  $k(d^{-1})$ ,  $t$  为分解时间。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同生境凋落物留存率、逐月分解率、元素释放率差异是否显著;采用相关分析探讨土壤养分与凋落物分解速率间的关系;采用回归法分析不同生境下凋落物分解过程中逐月分解率与分解时间的关系以及建立不同生境条件下土壤养分影响凋落物分解速率的主导因子方程。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同生境条件下冷杉凋落物的分解特征

将西藏色季拉山冷杉原始林凋落物分别在 3 种不同生境中〔林内(IF)、林外(OF)、林缘(BF)〕进行分解试验,结果如图 1 所示。

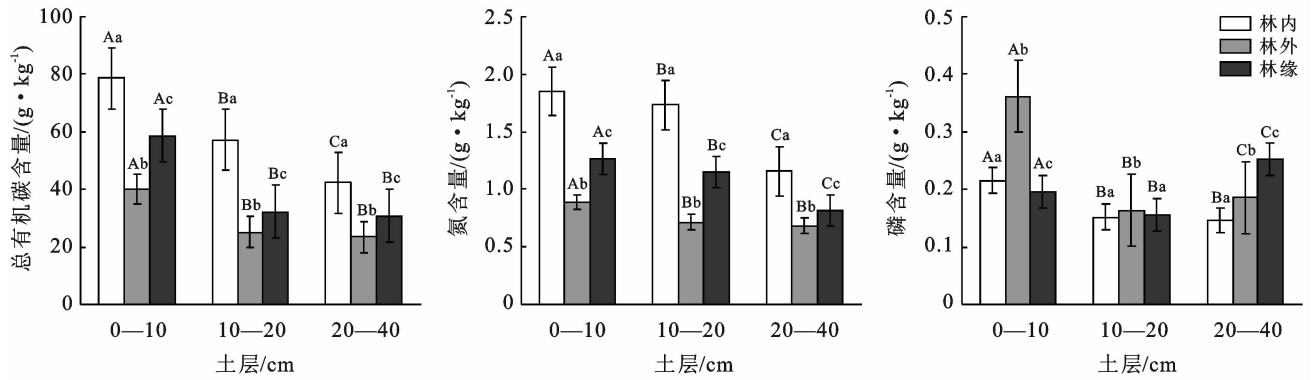


图 1 不同生境条件下凋落物留存率及逐月分解率动态

不同生境下调落物分解留存率呈现逐渐下降的趋势,且留存率在不同生境间差异极显著( $F=42.166, p=0.000$ ),总体呈现出林内( $59.827 \pm 9.69\%$ ) $<$ 林缘( $67.456 \pm 7.23\%$ ) $<$ 林外( $86.222 \pm 12.94\%$ )的趋势。留存率与分解时间呈现极显著负相关关系( $r=-0.472, p=0.004$ ),本研究共采用 9 种模型来拟合不同生境样品留存率与分解时间的关系,最终一元多项式方程拟合度最优,拟合方程为: $y=99.629-1.587x-0.152x^2+0.01x^3$ ( $R^2=0.966, p=0.001$ )。凋落物的逐月分解速率在不同生境间差异极显著( $F=38.21, p=0.007$ )。不同生境下调落物的逐月分解速率与分解时间呈显著负相关( $r=-0.473, p=0.039$ )、与生境极显著正相关( $r=0.784, p=0.009$ ),3 种生境类型下逐月分解率最大值均出现在 5 月份,在冬季 10—12 月分解率较低;而从 3 个生境条件下凋落物逐月分解率的变异系数( $C_v$ )来看,林内( $34.83\%$ ) $<$ 林缘( $57.35\%$ ) $<$ 林外( $72.09\%$ )。经回归分析,不同生境下调落物的逐月分解速率与分解时间的拟合关系为: $y=1.943+0.126x-0.014x^2$ ( $R^2=0.967, p=0.003$ )。

分别采用 Olson 指数衰减模型对不同生境条件下冷杉凋落物分解过程进行了模拟,拟合效果较好

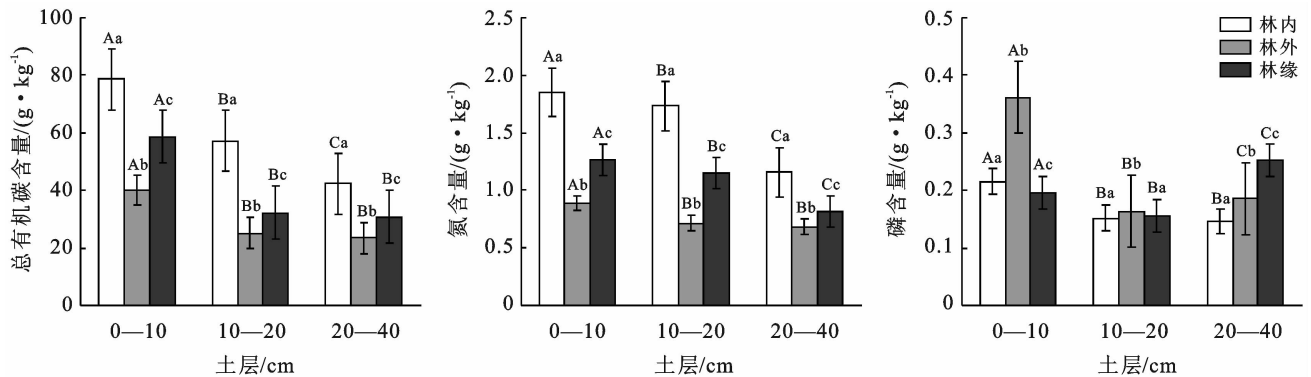
(相关系数均在 0.975 以上),同时计算了在不同生境条件下凋落物分解 50% 和 95% 的时间(见表 2),结果显示:不同生境条件下(林内、林缘、林外)凋落物分解常数分别为 0.028, 0.025, 0.023;不同生境条件下(林内、林缘、林外)凋落物分解 50% 需要的时间为 2.11, 2.52, 2.34 a, 分解 95% 需要的时间为 8.96, 10.01, 10.84 a。

表 2 不同生境条件下冷杉凋落物分解过程模拟(Olson 模型)

生境	模拟方程	$R^2$	$k$	$t_{0.5}$	$t_{0.95}$
林内	$y=16.078e^{-0.028t}$	0.9893	0.028	2.11 <sup>a</sup>	8.96 <sup>a</sup>
林外	$y=15.832e^{-0.023t}$	0.9951	0.023	2.52 <sup>a</sup>	10.84 <sup>a</sup>
林缘	$y=16.016e^{-0.025t}$	0.9754	0.025	2.34 <sup>a</sup>	10.01 <sup>a</sup>

### 3.2 不同生境条件下土壤养分特征

如图 2 所示,3 种生境条件下土壤总有机碳(TOC)含量总体看来表现出林内( $58.197 \pm 10.237$  g/kg) $>$ 林缘( $39.107 \pm 8.614$  g/kg) $>$ 林外( $28.197 \pm 6.227$  g/kg)的趋势,同一土层不同生境间差异极显著( $p<0.01$ ),而在同一生境条件下不同土层间除了林内 0—10 cm 土壤 TOC 差异极显著外( $p<0.01$ ),其他两种生境类型下表层土(0—10 cm)与下层土壤(10—40 cm)之间差异不显著( $p>0.05$ )(见图 3)。



注:图中不同小写字母表示同一土层不同生境间差异显著;不同大写字母表同一生境不同土层间差异显著。下同。

图 2 不同生境条件下土壤总有机碳、氮和磷含量特征

土壤 N 含量总体趋势与 TOC 相似,林内( $1.415 \pm 0.06 \text{ g/kg}$ ) > 林缘( $1.006 \pm 0.04 \text{ g/kg}$ ) > 林外( $0.715 \pm 0.01 \text{ g/kg}$ ),同一土层不同生境间差异极显著( $p < 0.01$ ),同一生境条件下不同土层间差异也极显著( $p < 0.01$ )(见图 3)。土壤 P 含量总体大小呈现林外( $0.236 \pm 0.012 \text{ g/kg}$ ) > 林缘( $0.198 \pm 0.008 \text{ g/kg}$ ) > 林内( $0.168 \pm 0.003 \text{ g/kg}$ ),最大值出现在林外生境 0—10cm( $0.212 \pm 0.011 \text{ g/kg}$ ),表层土(0—10cm)中林外生境极显著高于其他两种生境( $p < 0.01$ ),10—20 cm 土层林外生境显著高于其他两种生境类型( $p < 0.05$ ),20—40 cm 土层中林缘生境极显著高于其他两种生境类型( $p < 0.01$ );从同一生境

不同土层来看,林内和林缘生境下不同土层间差异均为极显著( $p < 0.01$ ),林外生境仅有表层土(0—10 cm)与下层土壤(10—40cm)差异极显著( $p < 0.01$ ),其他两种生境条件下不同土层间差异均极显著( $p < 0.01$ )(见图 2)。而土壤微生物量碳 SMBC 林内生境下含量显著高于林缘和林外生境( $p < 0.01$ ),从不同土层来看,3 种生境类型表层土(0—10 cm)SMBC 含量( $388.017 \pm 56.94 \text{ mg/kg}$ )显著高于 10—40 cm 土壤( $p < 0.01$ )(见图 3)。3 种生境条件下土壤微生物量氮 SMBN 含量在不同土层间差异均极显著( $p < 0.01$ ),同一土层 3 种生境条件间差异也极显著( $p < 0.01$ )(见图 3)。

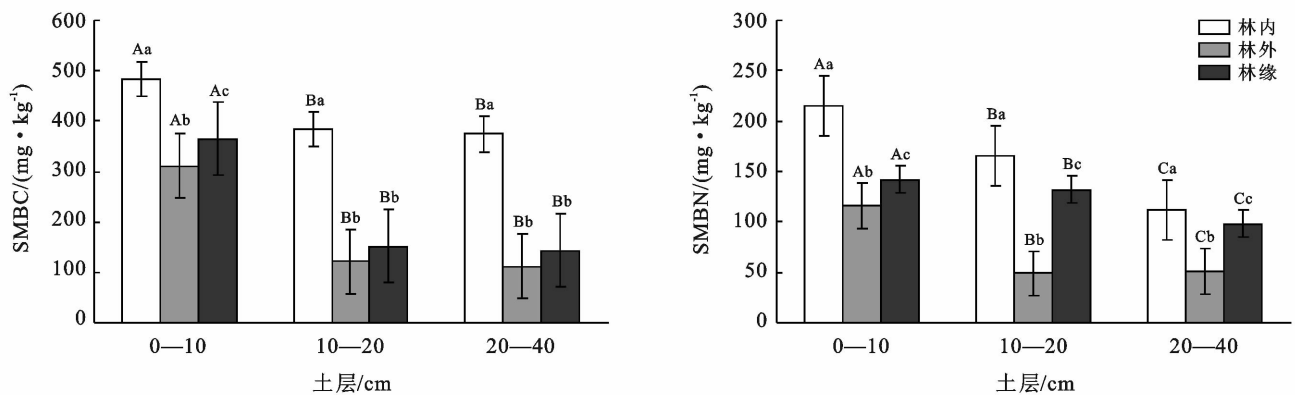


图 3 不同生境条件下土壤微生物量碳(SMBC)、土壤微生物量氮(SMBN)含量特征

### 3.3 不同生境条件下凋落物分解与土壤养分库之间的关系

设林内凋落物分解速率(DRIF)为  $Y_1$ ,林外凋落物分解速率(DROF)为  $Y_2$ ,林缘凋落物分解速率(DRBF)为  $Y_3$ ;设土壤总有机碳含量(TOC)为  $x_1$ ,土壤全 N 含量为  $x_2$ ,土壤全 P 含量为  $x_3$ ,土壤微生物量

碳(SMBC)含量为  $x_4$ ,土壤微生物量氮(SMBN)含量为  $x_5$ , $W_C : W_N$  值为  $x_6$ , $W_C : W_P$  值为  $x_7$ , $W_N : W_P$  值为  $x_8$ ,然后分别将  $Y_1, Y_2, Y_3$  与  $x_1—x_7$  进行 Spearman 秩相关分析(如表 3 所示)。不同生境条件下凋落物分解速率与其对应的土壤养分特征之间关系紧密。

表 3 不同生境条件下凋落物分解速率与土壤养分之间 Spearman 秩相关系数

项目	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$	$x_7$	$x_8$
$Y_1$	0.302 2**	0.268 6**	0.228 4*	0.274 9**	0.367 0**	0.002 9**	-0.474 8*	-0.610 6ns
$Y_2$	0.512 8**	0.198 9*	0.321 7**	0.142 6*	0.216 3*	0.114 6**	-0.394 4**	-0.401 2ns
$Y_3$	0.491 1**	0.234 8*	0.298 5*	0.189 9**	0.269 7*	0.136 9**	-0.433 6**	-0.472 9ns

注: \* 表示  $p < 0.05$ , \*\* 表示  $p < 0.01$ , ns 表示不相关  $p > 0.05$ ;  $Y_1$  为林内凋落物分解速率(DRIF),  $Y_2$  为林外凋落物分解速率(DROF),  $Y_3$  为林缘凋落物分解速率(DRBF);  $x_1$  为土壤总有机碳含量(TOC),  $x_2$  为土壤全 N 含量,  $x_3$  为土壤全 P 含量,  $x_4$  为土壤微生物量碳(SMBC)含量,  $x_5$  为土壤微生物量氮(SMBN)含量,  $x_6$  为  $W_C : W_N$  值,  $x_7$  为  $W_C : W_P$  值,  $x_8$  为  $W_N : W_P$  值。

3 种生境条件下除了  $W_N : W_P$  值与分解速率不相关外,其他土壤养分指标均与凋落物分解速率呈现显著( $p < 0.05$ )或极显著相关( $p < 0.01$ )关系。其中除了  $W_C : W_P$  值与凋落物分解速率呈现负相关关系外,其余土壤养分指标与凋落物分解速率间均呈现正相关关系。从不同生境分别看来,林内生境中与凋落

物分解速率呈现极显著相关的土壤养分因子有土壤 TOC 含量( $r = 0.302 2, p < 0.01$ ), N 含量( $r = 0.268 6, p < 0.01$ ), SMBC 含量( $r = 0.274 9, p < 0.01$ ), SMNB 含量( $r = 0.367 0, p < 0.01$ )以及  $W_C : W_N$  值( $r = 0.002 9, p < 0.01$ );林外生境中与凋落物分解速率相关性最大的为土壤 TOC 含量( $r = 0.512 8, p < 0.01$ ),

其次为  $W_C : W_P$  值 ( $r = -0.3944, p < 0.01$ ); 林缘生境中与凋落物分解速率相关性最大的也是土壤 TOC 含量 ( $r = 0.4911, p < 0.01$ ), 其次为  $W_C : W_P$  值 ( $r = -0.4336, p < 0.01$ )。根据相关分析结果, 选择与凋落物分解速率极显著相关或者显著相关的土壤养分因子进行逐步回归分析, 得到 3 种生境条件下凋落物分解速率受土壤养分影响的主导因子方程 (见表 4), 均达到极显著水平。

表 4 不同生境条件下凋落物分解特征主导因子方程

主导因子方程	$r$	$p$
$Y_1 = 12.845 + 21.021x_1 + 9.387x_4 + 4.449x_5$	0.965	0.006
$Y_2 = 25.957 + 19.446x_1 + 8.766x_3 - 21.465x_7$	0.948	0.003
$Y_3 = 19.769 + 15.864x_1 + 2.453x_3 - 17.864x_7$	0.988	0.000

## 4 讨论与结论

### 4.1 讨论

(1) 不同生境条件下冷杉凋落物分解特征。本研究中 3 种生境类型下凋落物逐月分解速率均呈现出雨季分解快 (5—9 月)、旱季分解慢 (10—1 月), 前期分解快 (2—9 月), 后期分解慢 (10—1 月) 的特征。这与前人相关研究结果基本一致<sup>[9]</sup>。在分解前期, 特别是旱季的 12 至翌年 1 月, 为藏东南一年中最冷时节, 温度低, 降雨量少, 微生物活性低, 因淋溶作用和微生物代谢引起的凋落物质量损失少; 而在高温多雨的夏季 (7—9 月), 生物代谢和淋溶作用增强, 凋落物分解速率加大; 而在分解后期 (10—1 月), 随着凋落物中易分解物质的消耗殆尽, 难分解的物质大量积累, 分解者可利用的物质减少, 同时凋落物中的生物开始出逃或者死亡, 分解速率进一步降低<sup>[23]</sup>。从凋落物分解过程中干物质留存率来看, 总体呈现出林内 ( $59.827 \pm 9.69\%$ ) < 林缘 ( $67.456 \pm 7.23\%$ ) < 林外 ( $86.222 \pm 12.94\%$ ) 的趋势, 可以看出总体分解速率呈现林内 > 林缘 > 林外的趋势, 这可能与不同生境条件下微气候环境 (光照、温度、湿度)、土壤生物及土壤肥力不同有关。吴鹏等<sup>[15]</sup>对东北地区森林凋落叶分解速率与气候、林型、林分光照的关系研究中发现, 气候因子 (热量和水分) 对分解速率有较强的解释力, 但是气候对分解速率的影响很大程度上是通过与林型、林冠透光率的协同作用而实现的, 所以在考虑凋落物分解速率影响因素时应尽可能考虑生物因素和非生物因素以及它们之间的共同作用<sup>[16]</sup>。而从 3 个生境条件下凋落物逐月分解率的变异系数 ( $C_V$ ) 来看, 林内 ( $34.83\%$ ) > 林缘 ( $57.35\%$ ) > 林外 ( $72.09\%$ ), 可见凋落物分解在林内生境下的稳定性要好于林缘和林

外, 凋落物稳定分解, 说明其分解所需的各方面环境条件 (热量、水分、土壤生物及其活性等) 变动不剧烈, 而林缘和林外生境中由于林冠覆盖度的不同, 直接导致水热条件的不同, 进而影响凋落物分解特征, 特别是林外生境变异程度最大, 是因为该生境条件下几乎为裸地, 没有林冠覆盖, 加之高原天气多变导致其微气候条件也多变。根据前人的研究结果, 林分生境对凋落物分解的影响在生长季和非生长季有不同的效果, 吴庆贵等<sup>[16]</sup>在对川西亚高山森林林窗对凋落物分解影响的研究中发现, 总体上林窗加快了岷江冷杉凋落叶的分解, 在生长季节凋落物分解速率随林窗面积增大而减慢, 非生长季则刚好相反。在本研究中, 3 种不同林分生境可类比为林窗面积大小不同的环境条件, 林内、林缘、林外生境中林窗面积逐渐增大, 则藏东南亚高山暗针叶林和川西亚高山暗针叶林研究结果基本一致。本研究中根据 Olson 指数衰减模型对不同生境条件下冷杉凋落物分解过程的模拟结果, 凋落物半衰期和周转期均表现为: 林下 < 林缘 < 林外的趋势, 这与前面不同生境下的总体分解速率变化规律一致。徐波等<sup>[24]</sup>对九寨沟 4 种典型树种凋落叶在林下及高山湖泊中的分解研究中发现, 凋落物在林下分解速率要显著高于水体生境, 这与本研究中林下生境分解速度最快的结果一致。本研究中藏东南急尖长苞冷杉林凋落物在林内分解 50% 和分解 95% 的时间分别为 2.11 a 和 8.96 a, 低于四川贡嘎山峨眉冷杉<sup>[3]</sup> (3.69, 15.93 a)、九寨沟油松<sup>[24]</sup> (4.07, 27.21 a)、四川阿坝州毕棚沟岷江冷杉<sup>[25]</sup> (3.27, 14.12 a), 可见由于凋落物分解是一个受自身性质和外界环境因素共同作用的复杂过程<sup>[24]</sup>, 不同区域的针叶林均呈现不同的分解特征, 今后应加强对不同地区、不同环境条件下凋落物分解的影响机制研究。

(2) 不同生境条件下冷杉凋落物分解特征与土壤养分的关系。凋落物的分解过程是联系植被和土壤的纽带, 在分解过程中植物养分需求量、土壤养分供应量及养分的归还量之间可以进行相互调节, 从而加剧了凋落物—土壤养分之间的相互关系的复杂性<sup>[26-27]</sup>。本研究表明, 3 种不同生境条件下由于成土条件、微环境气候等差异, 造成了土壤养分在空间上的显著差异 (图 2—3)。而凋落物分解进程中分解者 (土壤动物和微生物) 必需的能量来自于凋落物本身或土壤<sup>[28]</sup>, 同时土壤养分还间接改变凋落物分解时的微环境进而影响凋落物分解<sup>[29]</sup>。本研究中, 3 种生境条件下, 土壤总有机碳含量 (TOC),  $W_C : W_N$  值与凋落物分解速率关系最为紧密, 这与前人相关研究结果一致<sup>[8-9]</sup>, 原因是 C 是组成有机质的主要元素, 为分解

者提供可利用的能源,而  $W_C : W_N$  值从理论上是控制凋落物分解进程中 N 释放与否的关键因素,土壤  $W_C : W_N$  值通常能反映土壤 N 矿化的能力及土壤微生物群落结构<sup>[30]</sup>,因为只有当微生物的 N 需求被满足以后才可能释放 N 元素<sup>[2]</sup>。特别指出的是,本研究中在林外和林缘生境中, $W_C : W_P$  值与凋落物分解速率的相关性要大于林内生境,说明在林外和林缘生境中  $W_C : W_P$  值更能影响凋落物的分解,因为林外和林缘土壤 P 元素含量相对林内更高,有研究表明在分解过程中养分更容易从高质量的凋落物转移到低质量的生境中<sup>[31-32]</sup>,相反地,凋落物在 P 元素含量较高的生境中分解,养分释放速率肯定要低于元素含量低的生境,故而也更能影响凋落物分解速率。土壤微生物量碳(SMBC)在林内和林缘生境中和凋落物分解速率均呈现极显著正相关的关系( $p < 0.01$ ),在林外生境中与凋落物分解速率呈现显著正相关关系( $p < 0.05$ );而土壤微生物量氮(SMBN)在林内生境中与凋落物分解速率呈现极显著正相关关系( $p < 0.01$ ),在林外和林缘生境中与凋落物分解速率呈现显著正相关关系( $p < 0.05$ ),且平均相关系数表现为  $r_{SMBN} (0.2843) > r_{SMBC} (0.2025)$ ,可见土壤微生物的活动对凋落物分解有显著的影响,特别是微生物量氮(SMBN)。

#### 4.2 结论

通过对藏东南急尖长苞冷杉林凋落物在 3 种生境条件下(林内、林外、林缘)的分解试验发现,3 种生境下调落物分解均符合 Olson 指数衰减模型,且分解速率总体上呈现出林内 > 林缘 > 林外的特点,生境类型对凋落物分解进程中元素释放速率有显著影响。3 种不同生境土壤养分在空间上差异显著,土壤总有机碳含量(TOC), $W_C : W_N$  值与凋落物分解速率关系最为紧密, $W_N : W_P$  值与分解速率不相关,总之,凋落物分解环境条件的差异显著地影响着凋落物的分解特征,凋落物—土壤生物地化循环紧密联系,土壤养分作为凋落物分解环境的关键因子,其与凋落物分解特征之间的相互作用的复杂性使得生境的作用效应亦变得更加复杂。

#### [ 参 考 文 献 ]

- [1] Bray S R, Kitajima K, Mack M C. Temporal dynamics of microbial communities on decomposing leaf litter of 10 plant species in relation to decomposition rate [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 49: 30-37.
- [2] 刘晶,谢婉余,张巧明,等. 黄土丘陵区不同植物凋落叶片的分解及养分释放特性[J]. 草业学报, 2018, 27(9): 25-33.
- [3] 刘涛,孙守琴,邱阳. 川西亚高山生态系统三种典型植物凋落物分解动态特征[J]. 山地学报, 2017, 35(5): 663-668.
- [4] Moore T R, Group C W, Trofymow J A, et al. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests [J]. Plant and Soil, 2011, 339(1/2): 163-175.
- [5] 曲浩,赵学勇,赵哈林,等. 陆地生态系统凋落物分解研究进展[J]. 草业科学, 2010, 27(8): 44-51.
- [6] Hobbie S E. Plant species effects on nutrient cycling: Revisiting litter feedbacks [J]. Trends in Ecology & Evolution, 2015, 30(6): 357-363.
- [7] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, et al. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests [J]. Ecosystems, 2006, 9(1): 46-62.
- [8] 丁新景,解国磊,敬如岩,等. 黄河三角洲不同人工刺槐混交林凋落物分解特性[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 249-253.
- [9] 金龙,吴志祥,杨川,等. 不同林龄橡胶凋落物叶分解特性与有机碳动态研究[J]. 热带作物学报, 2015, 36(4): 698-705.
- [10] 刘秉儒,张秀珍,胡天华,等. 贺兰山不同海拔典型植被带土壤微生物多样性[J]. 生态学报, 2013, 33(22): 7211-7220.
- [11] Aerts R, de Caluwe H. Nutritional and plant-mediated controls on leaf litter decomposition of Carex species [J]. Ecology, 1997, 78(1): 244.
- [12] 裴蓓,高国荣. 凋落物分解对森林土壤碳库影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, 34(26): 58-64.
- [13] Wardle D A. Ecological linkages between aboveground and belowground biota [J]. Science, 2004, 304(5677): 1629-1633.
- [14] 徐胜,付伟,平琴,等. 气候变化对树木凋落物分解的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3266-3272.
- [15] 吴鹏,王襄平,张新平,等. 东北地区森林凋落叶分解速率与气候、林型、林分光照的关系[J]. 生态学报, 2016, 36(8): 2223-2232.
- [16] 吴庆贵,吴福忠,谭波,等. 高山森林林窗对凋落叶分解的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(12): 3537-3545.
- [17] 吴庆贵,谭波,杨万勤,等. 亚高山森林林窗大小对凋落叶木质素降解的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(18): 5701-5711.
- [18] 李文华. 西藏暗针叶林概论[J]. 资源科学, 1982, 4(2): 1-16.
- [19] 徐凤翔. 西藏森林的特点、规律及其生态成因初析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 1982, 6(3): 84-96.
- [20] 方江平,巴青翁姆. 西藏原始林芝云杉林凋落物养分归还规律[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1139-1145.

- [21] Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987,19(6):703-707.
- [22] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1985,17(6):837-842.
- [23] Moro M. Litter decomposition in four woody species in a mediterranean climate: Weight loss, N and P dynamics [J]. *Annals of Botany*, 2000,86(6):1065-1071.
- [24] 徐波,朱忠福,李金洋,等. 九寨沟国家自然保护区4个典型树种叶片凋落物在林下及高山湖泊中的分解及养分释放特征 [J]. *植物生态学报*, 2016,40(9):883-892.
- [25] 武启骞,吴福忠,杨万勤,等. 季节性雪被对高山森林凋落物分解的影响 [J]. *植物生态学报*, 2013,37(4):296-305.
- [26] Ladanai S, Ågren G I, Olsson B A. Relationships between tree and soil properties in *Picea abies* and *Pinus sylvestris* forests in Sweden [J]. *Ecosystems*, 2010,13(2):302-316.
- [27] 张泰东,王传宽,张全智. 帽儿山5种林型土壤碳氮磷化学计量关系的垂直变化 [J]. *应用生态学报*, 2017,28(10):3135-3143.
- [28] 罗佳,周小玲,陈建华,等. 桉树人工林土壤养分对凋落物分解的影响 [J]. *中南林业科技大学学报*, 2017,37(11):132-139.
- [29] Gartner T B, Cardon Z G. Site of leaf origin affects how mixed litter decomposes [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006,38(8):2307-2317.
- [30] Nottingham A T, Turner B L, Whitaker J, et al. Soil microbial nutrient constraints along a tropical forest elevation gradient: A belowground test of a biogeochemical paradigm [J]. *Biogeosciences*, 2015,12(20):6071-6083.
- [31] Boerner R E J. Foliar nutrient dynamics and nutrient use efficiency of four deciduous tree species in relation to site fertility [J]. *The Journal of Applied Ecology*, 1984,21(3):1029.
- [32] 葛晓改,肖文发,曾立雄,等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系 [J]. *生态学报*, 2012,32(3):852-862.

(上接第55页)

- [5] 曲杭峰,董希斌,张甜,等. 大兴安岭白桦低质林补植改造后枯落物水文效应变化 [J]. *东北林业大学学报*, 2017,45(8):14-19.
- [6] 庞梦丽,朱辰光,翟博超,等. 河北省太行山区3种人工水土保持林枯落物及土壤水文效应 [J]. *水土保持通报*, 2017,37(1):51-56.
- [7] 黄岩,剪文灏,黄永辉,等. 冀北山地落叶松林枯落物层水文效应研究 [J]. *防护林科技*, 2017(9):14-17.
- [8] Beasley R S, Granillo A B. Soil protection by natural vegetation on clearcut forest land in Arkansas [J]. *Journal of soil and Water Conservation (USA)*, 1985,40(4):379-382.
- [9] 胡静霞,杨新兵,朱辰光,等. 冀西北地区4种纯林枯落物及土壤水文效应 [J]. *水土保持研究*, 2017,24(4):304-310.
- [10] 王安宁,蔺鑫,穆枫,等. 冀北木兰围场沙荒坡地不同坡位黄柳沙障内枯落物的持水性能 [J]. *北京林业大学学报*, 2018,40(1):98-107.
- [11] 王忠禹,刘国彬,王兵,等. 黄土丘陵区典型植物枯落物凋落动态及其持水性 [J]. *生态学报*, 2019,39(7):2416-2425.
- [12] 田耀武,黄志霖,肖文发,等. 三峡库区防护林林分结构特征与径流、泥沙输出的关系 [J]. *西北林学院学报*, 2018,33(5):44-50.
- [13] 刘泽彬,王彦辉,邓秀秀,等. 六盘山华北落叶松林下穿透雨空间变异特征 [J]. *生态学报*, 2017,37(10):3471-3481.
- [14] 胡淑萍,余新晓,岳永杰. 北京百花山森林枯落物层和土壤层水文效应研究 [J]. *水土保持学报*, 2008,22(1):146-150.
- [15] 剪文灏,李淑春,陈波,等. 冀北山区三种典型森林类型枯落物水文效应研究 [J]. *水土保持研究*, 2011,18(5):144-147.