

西藏原始暗针叶林凋落物有机碳释放特征与土壤有机碳库关系研究

段斐^{1,2}, 方江平³, 周晨霓^{1,2}

(1.西藏农牧学院高原生态研究所,西藏 林芝 860000; 2.西藏高原森林生态教育部重点实验室, 西藏 林芝 860000; 3.西藏自治区生态安全联合重点实验室,西藏 林芝 860000)

摘要: 结合野外凋落物分解袋法和室内分析试验,对藏东南2种典型暗针叶林—急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *Smithii*)和林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)凋落物的分解和有机碳释放特征进行研究,分析了2种亚高山暗针叶林凋落物有机碳释放速率与土壤有机碳及其组分之间的关系。结果表明:藏东南2种原始暗针叶林凋落物分解均呈现出雨季分解快(4—9月)、旱季分解慢(10—翌年3月),前期分解快(3—9月)、后期分解慢(10—翌年2月)的特征,且冷杉(PLLF)分解速率大于云杉(AGSF),Olson指数衰减模型能够较好地模拟2种暗针叶林凋落物的分解,冷杉(PLLF)和云杉(AGSF)凋落物半分解时间为2.11,2.52年;分解95%时间为8.96,10.84年;2种暗针叶林凋落物中有机碳含量表现出先上升后下降,再平稳降低的趋势,而2种暗针叶林凋落物中有机碳释放速率表现出先短暂富集再释放的模式;2种暗针叶林土壤总有机碳(TOC)及其活性组分(MBC、POC、LOC)含量都具有明显的表聚性($p < 0.01$),且同一土壤层次内TOC、MBC、POC、LOC互相之间均呈极显著正相关关系($p < 0.01$);2种暗针叶林凋落物分解进程中有机碳的释放速率与表层土(0—10 cm)中TOC、MBC、POC、LOC含量、10—20 cm土层中的TOC、MBC含量以及20—40 cm土层中MBC含量之间呈现显著的正相关($p < 0.05$)。

关键词: 凋落物分解; 有机碳释放; 土壤有机碳; 西藏

中图分类号: Q14

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)03-0349-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2020.03.050

Study on the Relationship Between the Release Characteristics of Organic Carbon from Litters and Soil Organic Carbon Pool in Tibetan Primitive Dark Coniferous Forest

DUAN Fei^{1,2}, FANG Jiangping³, ZHOU Chenni^{1,2}

(1. Res. Institute of Tibet Plateau Ecology, Tibet Agricultural & Animal Husbandry University, Nyingchi, Tibet 860000; 2. Tibet Key Laboratory of Forest Ecology in Plateau Area, Ministry of Education, Nyingchi, Tibet 860000; 3. United Key Laboratories of Ecological Security, Tibet Autonomous Region, Nyingchi, Tibet 860000)

Abstract: The decomposition and organic carbon release characteristics of litters of *Abies georgei* var. *smithii* and *Picea likiangensis* var. *linzhiensis* in two typical dark coniferous forests in southeastern Tibet were studied by combining the method of litter decomposition bag and laboratory analysis, the relationship between organic carbon release rate and soil organic carbon and its components in two subalpine dark coniferous forests was analyzed, the results showed that the decomposition of litters in the two original dark coniferous forests in southeastern Tibet showed the characteristics of fast decomposition in rainy season (April to September), slow decomposition in dry season (October to march), fast decomposition in early stage (march to September) and slow decomposition in late stage (October to February). The decomposition rate of fir (PLLF) was higher than that of spruce (AGSF). Olson exponential decay model could well model the decomposition of litter in two dark coniferous forests. The half-decomposition time of litter in fir (PLLF) and spruce (AGSF) were 2.11 and 2.52 years. The 95% of decomposition time were 8.96 and 10.84 years. The organic carbon content in the litters of the two dark coniferous forests showed a trend of first rising, then

收稿日期: 2019-11-24

资助项目: 国家自然科学基金项目(31960256); 西藏自治区重大科技专项(XZ201901-GA-08); 西藏自治区自然科学基金项目(XZ 2019 ZR G-70)

第一作者: 段斐(1990—)女, 甘肃民勤人, 硕士, 助教, 主要从事森林生态研究。E-mail: duanfei901017@Sina.com

通信作者: 周晨霓(1984—), 女, 四川崇州人, 硕士, 副教授, 主要从事高原土壤生态研究。E-mail: chenni2018@126.com

falling, and then steadily declining, while the release rate of organic carbon in the litters showed a pattern of first brief enrichment and then release. The contents of total organic carbon (TOC) and its active components (MBC, POC and LOC) in the soil of the two dark coniferous forests were obviously surficial ($p<0.01$), and the contents of TOC, MBC, POC and LOC in the same soil layer were significantly positively correlated with each other ($p<0.01$). There was a significant positive correlation between the release rate of organic carbon in the decomposition process of litters of the two dark coniferous forests and the contents of TOC, MBC, POC and LOC in the topsoil (0—10 cm), TOC and MBC in the soil layer of 10—20 cm and MBC in the soil layer of 20—40 cm ($p<0.05$).

Keywords: litter decomposition; organic carbon release; soil organic carbon; Tibet

土壤总有机碳含量的变化主要取决于植被归还和土壤有机碳自身分解 2 个过程^[1-2],而植被归还的 2 个最主要途径则是凋落物和细根的生产的周转^[3]。其中凋落物归还还是土壤有机碳积累的重要来源,是土壤和植物间物质交换的枢纽^[4],是维持植物—土壤共生体系中地上、地下部分碳库的重要生态过程。高寒森林由于其处于独特的低温、季节性冻融等自然条件下,森林土壤发育缓慢,森林凋落物的分解是其土壤有机质形成和碳固定的重要过程^[5]。全球变化条件下,对于气候变化极端敏感的西藏森林凋落物分解过程及其特征值得关注^[6-7]。目前国内外关于西藏森林凋落物分解特征及土壤碳库特征的研究^[8-11]虽有一些,但将两者结合起来并探讨二者相互关系及内在关联机制的研究还非常缺乏。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—急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *Smithii*)和林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)凋落物为研究对象,分析 2 种亚高山暗针叶林凋落物在分解进程中的有机碳释放动态,探索凋落物有机碳释放与土壤有机碳碳库之间的相互关系,旨在为进一步探讨高寒高山森林生态系统地下碳循环机制提供基础数据和理论依据。

1 材料与方法

1.1 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°12′—95°35′E,29°10′—30°15′N。山体走向主要为西北—东南,形成较大范围的东西坡面。大部分区域处于海拔 3 000 m 以上,最高峰色季拉山海拔 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 mm,雨季为 6—9 月,其中以 8 月份最为集中,占全年降水的 30%。年平均气温 6.5 ℃,最冷月平均气温 0~2.8 ℃,最热月平均气温 11.5~18.2 ℃,无霜期 180 天,平均相对湿度 60%~80%。土壤以山地棕壤和酸性棕壤为主。色季拉山主要森林植被类型为山地温带暗针叶林,以急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*)为建群种,并有林芝云杉林(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis*)、云冷杉混交林及冷杉、方枝柏(*Sabina saltuaria*)混交林等,急尖长苞冷杉和方枝柏分别为阴坡和阳坡的林线群落优势树种。

1.2 研究方法

本研究区域位于色季拉山西坡,选择海拔、坡度、坡向相近的林芝云杉(*Picea likiangensis* var. *linzhiensis* forest)群落(以下简称“云杉林”PLL F)和急尖长苞冷杉(*Abies georgei* var. *smithii* forest)群落(以下简称“冷杉林”AGSF)为研究对象,在每种暗针叶林中设置了 3 个 20 m×20 m 的固定样地进行研究。2 种原始暗针叶林样地及凋落物基本情况见表 1。

表 1 2 种暗针叶林样地及凋落物基本概况

群落	海拔/m	坡度/(°)	坡向	年凋落量/(t·hm ⁻²)	w(C)/(g·kg ⁻¹)	w(N)/(g·kg ⁻¹)	w(P)/(g·kg ⁻¹)
AGSF	3980	44	东北	3.56±0.25	467.35±17.96	14.68±3.21	1.66±0.81
PLL F	3610	38	西北	3.40±0.19	409.76±12.55	11.15±2.76	1.22±0.54

注:表中数据为平均值±标准误差。

1.3 凋落物分解试验

凋落物的分解采用网袋法。于 2016 年 11 月分别在 2 种暗针叶林样地收集新鲜凋落物,在 80 ℃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含量的初始动态。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 日一次性随机放置于这 2 种暗针叶林样地中,埋入地表下 15cm 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每种林型 3×5×

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 年每月初收回,每个样地收回 5 袋,每月总共收回 3×5=15 袋。将收回的样品进行清理,而后置于 80 ℃ 下烘干至恒重,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,在每种林型样地内放置凋落物分解袋处,用 100 cm³ 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 2 部分:一部分放入冰箱(温度 4 ℃)用于测定土壤微生物量碳及其他活性有机碳组分;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总有机碳。

1.4 养分元素的测定

凋落物初始养分和分解养分动态的测定中,样品均经过粉碎机磨碎,过筛,保存,于 2017 年 12 月统一测定有机碳的含量。土壤总有机碳(TOC)的测定采用高温外热重铬酸钾氧化—容量法,土壤轻组有机碳(LOC)分离采用碘化钠浸提法、元素分析仪测定;土壤颗粒有机碳(POC)用 0.5 mol/L 六偏磷酸钠浸提法、元素分析仪测定;土壤微生物量碳(MBC)用氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定。活性有机碳组分测定的操作过程在新鲜土壤采样后 48 h 内完成。

1.5 数据处理与分析

凋落物干物质留存率 $dw = M_t / M_0 \times 100\%$ 。式中: M_t 为 t 月时样品的干物质质量(g); M_0 为初始样品干物质质量(g); 逐月分解率 $= d_{wt} - d_{wt-1}$; 养分释放率 $NR = ((C_0 \times M_0) - (C_t \times M_t)) / (C_0 \times M_0) \times 100\%$ 。式中: C_0 为初始元素含量(mg/g); C_t 为 t 时凋落物元素含量(mg/g); 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), t 为分解时间。

采用单因素方差分析(one way ANOVA)检验 2 种暗针叶林凋落物留存率、逐月分解率、有机碳释放率以及不同土层间 TOC、MBC、POC、LOC 差异显著性;采用相关分析探讨不同土层间土壤有机碳及其组分间的相互关系;采用回归分析模拟凋落物分解过程中有机碳释放速率与土壤有机碳及其组分间的关系以及建立回归模型并检验。

2 结果与分析

2.1 藏东南原始暗针叶林凋落物分解特征

从藏东南 2 种原始暗针叶林凋落物分解进程中的干物质留存率和逐月分解率的动态特征(图 1、图 2)可以看出,2 种原始暗针叶林凋落物干物质留存率随着分解时间的推移均呈现逐渐降低的趋势,总体上

看,冷杉(PLLF)留存率小于云杉(AGSF),到分解末期冷杉(PLLF)留存率为 73.41%,云杉(AGSF)留存率为 77.46%。而从分解进程来看,凋落物干物质留存率表现出分解前期(1—3 月)缓慢下降,分解中期(4—9 月)迅速降低,分解后期(10—12 月)又缓慢下降的趋势。从图 2 可以看出,逐月分解率较大的月份在 4,7,9 月,最大值出现在 4 月(冷杉为 4.01%,云杉为 3.76%)。而从逐月分解率的变异系数(CV)来看,冷杉(26.87%)小于云杉(37.55%),说明冷杉(PLLF)的分解进程总体比云杉(AGSF)更稳定。而根据 Olson 指数衰减模型对 2 种暗针叶林凋落物干物质残留率和分解时间的拟合结果(表 2)来看,模型拟合效果较好(决定系数均在 98% 以上),凋落物半分解时间为冷杉 2.11 年,云杉 2.52 年;凋落物分解 95% 时间为冷杉 8.96 年,云杉 10.84 年。

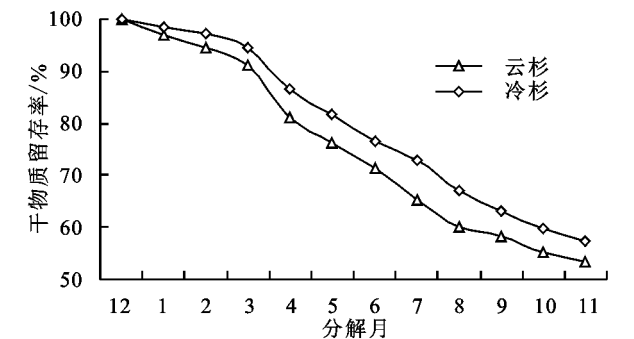


图 1 2 种原始暗针叶林凋落物分解干物质残留率动态

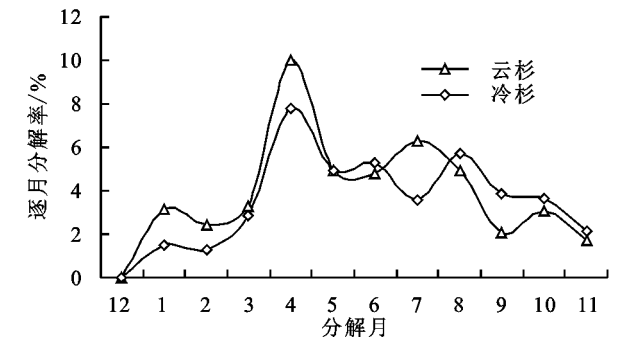


图 2 2 种原始暗针叶林凋落物逐月分解率动态

表 2 2 种暗针叶林凋落物分解过程模拟(Olson 模型)					
林型	模拟方程	R^2	k	$t_{0.5}$	$t_{0.95}$
PLLF	$y = 16.078e^{-0.028x}$	0.9893	0.028	2.11a	8.96a
AGSF	$y = 15.832e^{-0.023x}$	0.9951	0.023	2.52a	10.84a

2.2 藏东南原始暗针叶林凋落物有机碳释放特征

从图 3、图 4 可以看出,藏东南 2 种原始暗针叶林凋落物具有相似的养分动态规律,即 C 元素含量在分解前期(0—90 天)有小幅上升,分解中期(90—270 天)则表现为快速下降,在分解后期(270—365 天)继续小幅度降低,总体云杉(AGSF)凋落物 C 含量(平均含量(413.92±10.65)g/kg)大于冷杉(PLLF)(平均含量(383.62±8.66)g/kg);而从有机碳的释放速率来看,2 种暗针叶林凋落物在分解进程

中有机碳均呈现先短暂富集再释放的模式,但是富集的幅度均较小($<10\%$),总体上看,冷杉(PLL F)凋落物有机碳释放速率高于云杉(AGSF),到分解末期,冷杉(PLL F)凋落物有机碳释放速率为 33.68% ,云杉(AGSF)为 30.31% ;一元多项式方程模型可以很好地拟合 2 种暗针叶林凋落物分解过程中有机碳释放速率随时间的变化过程($R^2=0.962,0.969$),有机碳释放速率随时间的变化均为极显著($p<0.01$)。

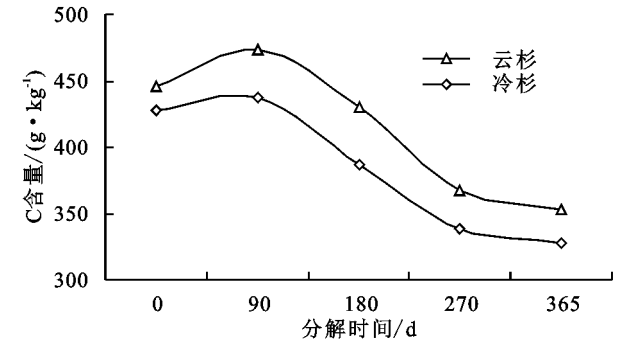


图 3 2 种原始暗针叶林凋落物分解有机碳含量动态变化

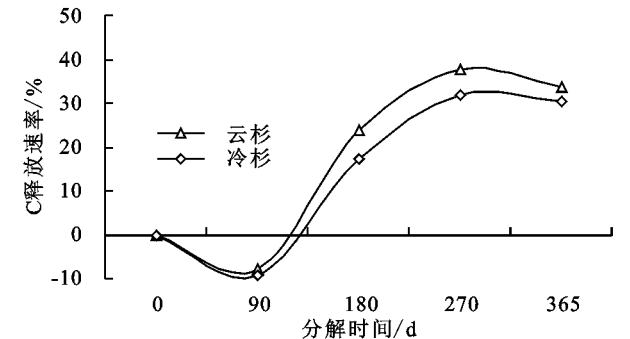


图 4 2 种原始暗针叶林凋落物分解有机碳释放率动态

表 3 2 种原始暗针叶林凋落物分解过程中有机碳释放速率多项式模型拟合

林型	拟合模型	<i>F</i>	Sig.	<i>R</i> ²
PLL F	$y=-90.58x^2+182.26x-8.35$	17.92	0.005	0.962
AGSF	$y=-76.92x^2+166.79x-9.56$	18.36	0.002	0.969

2.3 藏东南原始暗针叶林土壤有机碳库特征

通过分别测定 2 种原始暗针叶林 0—10, 10—20, 20—40 cm 土层中 TOC、MBC、POC、LOC 的含量(图 5、图 6)发现,土壤总有机碳(TOC)及其活性组分(MBC、POC、LOC)都具有明显的表聚性($p<0.01$),即在表层土(0—10 cm)中含量最大,冷杉(PLL F)0—10 cm TOC、MBC、POC、LOC 所占的百分比分别为 48.62% , 56.42% , 58.69% , 67.78% ;云杉(AGSF) TOC、MBC、POC、LOC 所占的百分比分别为 43.69% , 54.71% , 50.00% , 67.62% 。同一植被类型不同土壤层次来看,TOC、POC 含量不同土壤层次间差异均显著($p<0.05$),LOC、MBC 含量在 10—20, 20—40 cm 间差异不显著($p<0.05$);从不同植被类型来看,土壤总有机碳(TOC)及其活性组分(MBC、POC、LOC)均表现为冷杉(PLL F)大于云杉(AGSF)。

2.4 藏东南原始暗针叶林凋落物有机碳释放与土壤有机碳库的关系

由于本研究中 2 种暗针叶林土壤有机碳及其组分含量分布规律较为一致,故将二者数据综合起来进行凋落物有机碳释放速率和土壤有机碳库关系的分析。先对土壤有机碳库指标进行相关分析(表 4),可以看出,同一土壤层次内 TOC、MBC、POC、LOC 互相之间均呈极显著正相关关系($p<0.01$),而 4 个土壤有机碳指标只与相邻土层的相同指标显著正相关($p<0.05$),而与其他指标均不相关。

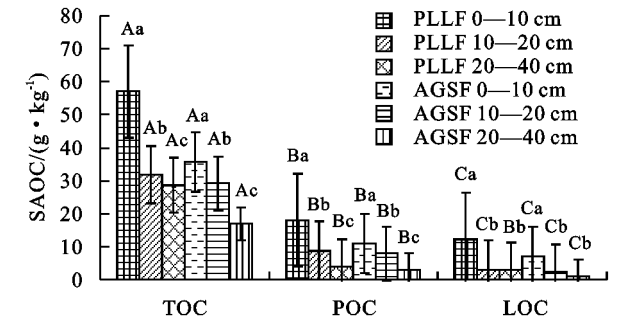


图 5 2 种原始暗针叶林土壤 TOC、POC、LOC 含量分布特征

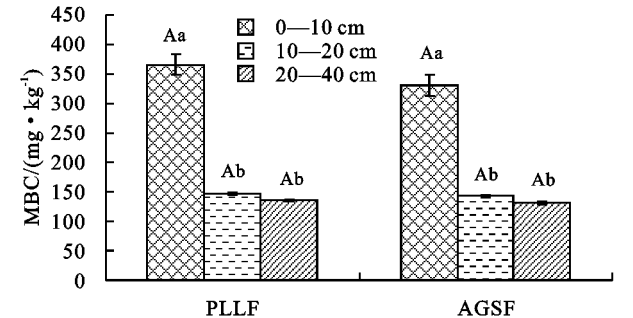


图 6 2 种原始暗针叶林土壤微生物量碳(SMBC)含量分布特征

通过主成分分析,求出相关矩阵特征根、方差贡献率及累积方差贡献率,提取特征根 >1 的成分,本案共提取 2 个主成分,累积贡献率达 86.02% ,说明这 2 个主成分可以包含并解释 86.02% 以上的原始数据信息。经过 Kaiser Varimax 矩阵旋转得到的旋转成分矩阵见表 5,可以看出各个原始变量对于 2 个主成分的因子载荷。结合各因子在主成分上的得分系数,提取各主成分与各因子的关系为: $F_1=0.941x_1+0.904x_2+0.924x_3+0.899x_4+0.871x_6+0.865x_5+0.888x_{10}$; $F_2=0.871x_7+0.905x_8+0.897x_9+0.916x_{10}+0.913x_{11}+0.886x_{12}$ 。从表 5 可以看出,第 1 主成分 F_1 反映了 0—10 cm 土层中土壤有机碳及其组分和 10—20, 20—40 cm 土层中 MBC 6 个指标信息,第 2 主成分 F_2 反映了 20—40 cm 土层中 TOC、POC、LOC 和 10—20 cm 土层中 POC 和 LOC 5 个指标信息。将 F_1 和 F_2 2 个主成分与凋落物有机碳释放速率进行多元线性回归,结果见表 6。凋落物有机碳释放速率 Y 与主成分 F_1 、 F_2 之间的线性回归模型为:

$Y=79.55+14.52F_1+5.69F_2$ ($p<0.05$)。模型中常数和 F_1 的系数是极显著的 ($p<0.01$), F_2 的系数不显著 ($p>0.05$), 且 F_1 系数为正数, 这说明凋落物有机碳释放速率与第 1 主成分呈现显著正相关的关系,

表 4 藏东南原始暗针叶林土壤有机碳及其组分间相关系数矩阵

指标	0—10 cm				10—20 cm				20—40 cm			
	TOC	MBC	POC	LOC	TOC	MBC	POC	LOC	TOC	MBC	POC	LOC
0—10 cm	TOC	1										
	MBC	0.863 * *	1									
	POC	0.912 * *	0.931 * *	1								
	LOC	0.905 * *	0.893 * *	0.952 * *	1							
10—20 cm	TOC	0.962 *	0.796	0.829	0.631	1						
	MBC	0.712	0.919 *	0.754	0.533	0.931 * *	1					
	POC	0.831	0.796	0.905 *	0.559	0.892 * *	0.729 * *	1				
	LOC	0.815	0.829	0.704	0.899 *	0.813 * *	0.886 * *	0.909 * *	1			
20—40 cm	TOC	0.813	0.812	0.429	0.557	0.379 *	0.566	0.771	0.629	1		
	MBC	0.763	0.833	0.615	0.589	0.703	0.681 *	0.735	0.704	0.819 * *	1	
	POC	0.799	0.738	0.596	0.613	0.721	0.694	0.709 *	0.616	0.912 * *	0.905 * *	1
	LOC	0.691	0.710	0.713	0.703	0.805	0.736	0.672	0.735 *	0.935 * *	0.889 * *	0.973 * *

注:表中 TOC、MBC、POC、LOC 分别表示土壤总有机碳、土壤微生物量碳、颗粒有机碳、轻组有机碳含量;* 表示关系显著 ($p<0.05$);* * 表示关系极显著 ($p<0.01$)。

表 5 主成分分析旋转成分矩阵

指标		0—10 cm				10—20 cm				20—40 cm			
		TOC(x_1)	MBC(x_2)	POC(x_3)	LOC(x_4)	TOC(x_5)	MBC(x_6)	POC(x_7)	LOC(x_8)	TOC(x_9)	MBC(x_{10})	POC(x_{11})	LOC(x_{12})
成分	1	0.941	0.904	0.924	0.899	0.865	0.871	0.469	0.391	0.436	0.888	0.306	0.412
	2	0.188	0.324	0.296	0.361	0.479	0.294	0.871	0.905	0.897	0.416	0.913	0.886

表 6 主成分对因变量线性回归方程系数检验

主成分	非标准化系数		标准化系数	t	Sig.
	B	标准误			
常数	79.55	5.21		14.26	0.008<0.01
F_1	14.52	3.88	0.71	3.12	0.009<0.01
F_2	5.69	3.49	0.16	0.71	0.036<0.05

3 讨论

3.1 藏东南 2 种原始暗针叶林凋落物分解特征

从 2 种暗针叶林凋落物在分解进程中的干物质留存率来看,均呈现出雨季分解快(4—9 月)、旱季分解慢(10—翌年 3 月),前期分解快(3—9 月)、后期分解慢(10—翌年 2 月)的特征,这与前人^[12-13]相关研究结果基本一致。而从不同植被类型来看,凋落物干物质留存率总体呈现冷杉(PLLF)小于云杉(AGSF),这与不同植被类型凋落物初始质量差异有关。有研究^[14]表明,凋落物分解速率与初始 C/N 比含量负相关,而与初始 C、N、P 元素含量正相关。本研究中冷杉(PLLF)凋落物 N 含量((14.68±3.21)g/kg)和 P 含量((1.66±0.81)g/kg)均高于云杉(AGSF)(表 1),因为 N、P 是微生物增殖必需元素,凋落物 N、P 元素含量越高,微生物的代谢活性越强,凋落物的分解速率也随之加快^[7,12];而 C/N 比则是云杉(38.54)大

即凋落物有机碳释放速率增加,土壤中 0—10 cm 土层中 TOC、MBC、POC、LOC 含量和 10—20 cm 土层中的 TOC、MBC 含量以及 20—40 cm 土层中的 MBC 含量也增加。

于冷杉(31.84),杨林等^[15]对川西高山林线交错带凋落叶分解速率与初始质量的关系研究结果表明,初始 C 含量与分解速率的正相关关系即使有的没有达到显著水平,但二者间的正相关关系却毋庸置疑,且在 C 源充足的情况下,以 N 为代表营养元素的稀缺便成为凋落物分解快慢的限制因子,因此高的 C/N 限制了微生物利用凋落物的效率,降低了分解速率。

3.2 藏东南 2 种原始暗针叶林凋落物有机碳释放动态特征

由于不同凋落物的有机碳含量的差异,受诸多因素的影响,分解速率也不尽相同,所以用有机碳在分解过程中的相对含量来表征凋落物有机碳的动态变化不太合理^[16],故本研究认为,用凋落物分解过程中的有机碳释放速率来反映有机碳动态变化更为确切。两种暗针叶林凋落物经过 1 年的分解,冷杉(PLLF)凋落物有机碳释放速率为-7.79%~33.68%,云杉(AGSF)凋落物有机碳释放速率为-9.28%~30.31%,且在整个分解进程中均呈现先短暂富集再释放的趋势,这与前人^[17]相关研究结果一致。凋落物的养分释放速率和分解速率一样,受诸多因素影响,不只有已经被业界公认的凋落物初始质量^[14-15]、

气候^[18-19]、植被类型^[20]、植物功能性状^[21]等,本研究中冷杉(PLL F)有机碳释放速率总体大于云杉(AGSF),主要原因还是凋落物初始质量差异引起的,凋落物基质质量高养分释放快,而基质质量低的养分释放慢^[15]。

3.3 藏东南原始暗针叶林土壤有机碳库特征

与同区域之前的相关研究^[9-10]结果一致,本研究发现,土壤总有机碳(TOC)及其活性组分(MBC、POC、LOC)含量都具有明显的表聚性($p < 0.01$),这是由于土壤有机碳的主要来源是地表植被凋落物和植物死亡的根系,而地表是土壤有机碳最初输入界面,随着土层的加深,有机碳的输入量也逐渐减少^[22];同时,土壤表层具有较好的水热条件和通气状况,微生物活动旺盛,导致表层土各活性有机碳组分含量也较高。虽处同一区域,2种林型的土壤总有机碳(TOC)及其活性组分(MBC、POC、LOC)含量差异明显,这是由于不同的植被类型、海拔高度和立地条件导致到达土壤的温度、光照、水分以及凋落物数量和质量存在差异,由此导致土壤中有机碳的矿化和积累程度也不同^[23]。而从不同土壤有机碳及其活性组分间的相互关系来看(表4),同一土壤层次内 TOC、MBC、POC、LOC 互相之间均呈极显著正相关关系($p < 0.01$),这与前人^[7,14]在高寒森林土壤有机碳及其组分含量的研究结果一致。

3.4 藏东南原始暗针叶林凋落物有机碳释放与土壤有机碳库的关系

藏东南2种暗针叶林凋落物分解进程中有有机碳的释放速率与表层土(0—10 cm)中 TOC、MBC、POC、LOC 含量、10—20 cm 土层中的 TOC、MBC 含量以及 20—40 cm 土层中 MBC 含量之间呈现显著的正相关($p < 0.05$),说明凋落物分解过程中的有机碳释放过程对土壤有机碳积累有促进作用,这与 Hu 等^[24]对石漠化脆弱生态区植被凋落物分解的研究结果一致;但也有前人^[25]研究发现,凋落物质量及其养分释放对土壤有机碳的积累起到促进、抑制或者无显著影响的作用,这与植被类型、生境条件等差异有关。本研究发现,凋落物释放速率不仅与表层土中的有机碳指标显著相关($p < 0.05$),还与深层土(10—20, 20—40 cm)中 TOC、MBC 含量显著相关($p < 0.05$),这可能与凋落物输入对深层土壤引发的激发效应有关。原因是深层土壤本身土壤有机碳质量较差,微生物受限于碳源,当凋落物加入后,微生物大量繁殖,产生更多土壤酶对有机碳进行分解,可以较大程度地提升深层土壤的有机碳分解速率^[26]。同时发现,无论

在表层土壤还是深层土壤,凋落物有机碳释放对土壤 MBC 含量均呈显著正相关($p < 0.05$)。一是由于凋落物中可利用的碳被微生物吸收,致使土壤总 MBC 含量升高^[5];二是凋落物通过激发效应促进原有土壤有机碳的分解,增加了原有土壤有机碳的微生物可利用性,促进了微生物生长,从而进一步提高了土壤 MBC 含量^[27]。土壤颗粒有机碳(POC)是影响土壤有机碳稳定强弱的关键因素,本研究中发现,凋落物有机碳释放速率与土壤 POC 含量呈现显著正相关($p < 0.05$),这与前人^[22]相关研究结果一致,因为土壤 POC 有机质重要来源是地表凋落物以及表层土壤中的死亡细根,而下层土壤 POC 的来源则主要为大乔木的木质化根系,且此类根系碳矿化速度缓慢,故下层土壤中 POC 含量显著小于表层土壤(图5)。

4 结论

藏东南2种原始暗针叶林凋落物分解均呈现出雨季分解快(4—9月)、旱季分解慢(10—翌年3月),前期分解快(3—9月)、后期分解慢(10—翌年2月)的特征,且冷杉(PLL F)分解速率大于云杉(AGSF),Olson 指数衰减模型能够较好地模型2种暗针叶林凋落物的分解,冷杉(PLL F)和云杉(AGSF)凋落物半分解时间为2.11,2.52年;分解95%时间为8.96,10.84年;2种暗针叶林凋落物中有机碳含量表现出先上升后下降,再平稳降低的趋势,而2种暗针叶林凋落物中有机碳释放速率表现出先短暂富集再释放的模式;2种暗针叶林土壤总有机碳(TOC)及其活性组分(MBC、POC、LOC)含量都具有明显的表聚性($p < 0.01$),且同一土壤层次内 TOC、MBC、POC、LOC 互相之间均呈极显著正相关关系($p < 0.01$);2种暗针叶林凋落物分解进程中有有机碳的释放速率与表层土(0—10 cm)中 TOC、MBC、POC、LOC 含量、10—20 cm 土层中的 TOC、MBC 含量以及 20—40 cm 土层中 MBC 含量之间呈现显著的正相关($p < 0.05$)。

参考文献:

- [1] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. *Nature*, 2006, 440: 165-173.
- [2] Randerson, James T. Climate science: Global warming and tropical carbon[J]. *Nature*, 2013, 494: 319-341.
- [3] Liu X F, Lin T C, Vadeboncoeur M A, et al. Root litter inputs exert greater influence over soil C than does aboveground litter in a subtropical natural forest[J]. *Plant Soil*, 2019, 444: 489-499.
- [4] Wei X R, Wang X, Ma T A, et al. Distribution and mineralization of organic carbon and nitrogen in forest

- soils of the southern Tibetan Plateau[J]. *Catena*, 2017, 156:298-304.
- [5] Zheng H F, Chen Y M, Liu Y, et al. Litter quality drives the differentiation of microbial communities in the litter horizon across an alpine treeline ecotone in the eastern Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):e10029.
- [6] 苟小林, 吴福忠, 杨万勤, 等. 季节性冻融格局变化对高山森林土壤 DOC 淋洗的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(6):205-210.
- [7] Wu Q, Wu F Z, Tan B, et al. Carbon, Nitrogen and phosphorus stocks in soil organic layer as affected by forest gaps in the alpine forest of the Eastern Tibet Plateau[J]. *Russian Journal of Ecology*, 2015, 46(3):246-251.
- [8] 曹丽花, 尹为玲, 刘合满, 等. 西藏东南部色季拉山主要类型森林叶片和枯落物养分含量特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(11):4029-4038.
- [9] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6):179-183.
- [10] 周晨霓, 任德智, 马和平, 等. 西藏色季拉山两种典型天然林分土壤活性有机碳组分与土壤呼吸特征研究[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(2):557-563.
- [11] 方江平, 巴青翁姆. 西藏原始林芝云杉凋落物养分归还规律[J]. *自然资源学报*, 2013, 28(7):1139-1145.
- [12] 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.
- [13] 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):249-307.
- [14] Xu Z F, Zhao C Z, Yin H J, et al. Warming and forest management interactively affect the decomposition of subalpine forests on the eastern Tibetan Plateau: A four-year experiment[J]. *Geoderma*, 2015, 240:223-228.
- [15] 杨林, 邓长春, 陈亚梅, 等. 川西高山林线交错带凋落叶分解速率与初始质量的关系[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(12):3602-3610.
- [16] Bai X J, Wang B R, An S S, et al. Response of forest species to C : N : P in the plant-litter-soil system and stoichiometric homeostasis of plant tissues during afforestation on the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2019, 183.
- [17] 陈栋霖, 刘语欣, 范川, 等. 台湾桫欏—扁穗牛鞭草符合模式下调落物分解及其养分释放动态[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2015, 39(1):49-54.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 王行, 闫鹏飞, 展鹏飞, 等. 植物质量、模拟增温及生境对凋落物分解的相对贡献[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(2):474-482.
- [21] Chávez-Vergara B, Merino A, González-Rodríguez A, et al. Direct and legacy effects of plant traits control litter decomposition in a deciduous oak forest in Mexico [J]. *Peer J*, 2018, 6:e5095.
- [22] 尚瑶, 傅民杰, 孙宇贺, 等. 温带阔叶林土壤有机碳及其颗粒组成空间分布特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(5):176-181, 301.
- [23] 殷有, 刘源跃, 井艳丽, 等. 辽东山区三种典型林型土壤有机碳及其组分含量[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7):2100-2106.
- [24] Hu N, Ma Z M, Lan J C, et al. Leaf litter decomposition characters and impact on soil organic carbon/nitrogen in different vegetation restorations of karst rocky desertification: An example of the Zhongliangshan mountain in Chongqing, China[J]. *Carsologica Sinica*, 2016, 35(5):539-549.
- [25] 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.
- [26] 王晓峰, 汪思龙, 张伟东. 杉木凋落物对土壤有机碳分解及微生物生物量碳的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(9):2393-2398.
- [27] 龙健, 赵畅, 张明江, 等. 不同坡向凋落物分解对土壤微生物群落的影响[J]. *生态学报*, 2019, 39(8):2696-2704.