#### DOI: 10.5846/stxb201804070781

薛欣欣,吴小平,王文斌,罗雪华,张永发,王大鹏,赵春梅.坡度和埋深对橡胶林凋落叶分解及红外光谱特征的影响.生态学报,2019,39(3):

Xue X X, Wu X P, Wang W B, Luo X H, Zhang Y F, Wang D P, Zhao C M.Effects of varying slopes and depths on decomposition and infrared spectrum characteristics of leaf litter in a rubber forest. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): - .

# 坡度和 埋 深 对 橡 胶 林 凋 落 叶 分 解 及 红 外 光 谱 特 征 的 影响

薛欣欣<sup>1,2</sup>,吴小平<sup>1,2,\*</sup>,王文斌<sup>1,2</sup>,罗雪华<sup>1,2</sup>,张永发<sup>1,2</sup>,王大鹏<sup>1,2</sup>,赵春梅<sup>1,2</sup>

1 中国热带农业科学院橡胶研究所,儋州 571737
2 中国热带农业科学院土壤肥料研究中心,儋州 571737

摘要:橡胶树调落叶在橡胶林生态系统养分循环中起着重要的作用,研究调落叶的分解和养分释放特性及其影响因素,对资源的循环利用及指导高效施肥具有重要意义。在海南省天然橡胶主产区选取橡胶林地进行调落叶原位分解试验,研究坡度和埋深对橡胶树调落叶干物质分解特性、养分元素释放规律及其物质成分红外光谱特征的影响。结果表明,调落叶分解速率明显受到坡度和深度的影响;分解9个月后,干物质残留率高低顺序为坡地覆盖(39.6%)>平地覆盖(26.8%)>平地埋深(11.2%)>坡地埋深(6.9%);调落叶的损失符合 Olsen 指数衰减模型(P<0.01),各处理调落叶干物质分解 95%所需要的时间分别为 29.3、20.5、12.8 和 13.2 个月;各处理 C/N 比从最初的 25.1 下降到 12.7、14.4、16.2 和 16.9。分解期间各处理养分残留率差异显著(P<0.05);分解 9 个月后,坡地覆盖处理 S-I 养分元素 C、N、P、K、Ca、Mg的残留率最高,分别为 10.9%、21.6%、10.7%、9.7%、10.4%、7.9%,而坡地埋深处理 S-II 最低,分别为 3.8%、6.5%、3.4%、2.3%、0.8%、2.1%。傅里叶红外光谱(FTIR)分析显示,调落叶分解前后在 3387 cm<sup>-1</sup>、1734 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰强度明显减弱,表明纤维素、半纤维素、木质素、多糖、脂肪族等碳水化合物遭到分解;1050 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰向低频方向位移了 17 cm 后变为 1033 cm<sup>-1</sup>,表明分解破坏了调落叶原有的可溶性糖和纤维素 C—C 键和 C—O 键伸缩振动。综上所述,埋深处理有利于加速调落叶物质分解和养分元素释放速率;建议橡胶树生产中将调落叶与表土混合或压青处理,提高橡胶林养分循环效率。

关键词:橡胶林;凋落叶;分解;营养元素;傅里叶变换红外光谱

# Effects of varying slopes and depths on decomposition and infrared spectrum characteristics of leaf litter in a rubber forest

XUE Xinxin<sup>1,2</sup>, WU Xiaoping<sup>1,2,\*</sup>, WANG Wenbin<sup>1,2</sup>, LUO Xuehua<sup>1,2</sup>, ZHANG Yongfa<sup>1,2</sup>, WANG Dapeng<sup>1,2</sup>, ZHAO Chunmei<sup>1,2</sup>

1 Rubber Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agriculture Science, Danzhou 571737, China

2 Soil and Fertilizer Center, Chinese Academy of Tropical Agriculture Science, Danzhou 571737, China

**Abstract**: Leaf litter plays an important role in nutrient recycling in rubber ecological systems. Studying the decomposition characteristics of dry matter and nutrient release and their effects has important significance for resource utilization and the management of high efficiency fertilization. A decomposing-bag experiment was conducted in a rubber forest at the main production areas of natural rubber trees in Hainan Province, China. The objectives were to study the effects of slope and depth on the characteristics of dry matter decomposition, nutrient release, and FTIR (fourier transform infrared

收稿日期:2018-04-07; 网络出版日期:2018-00-00

基金项目:国家重点研发计划(2018YFD0201100);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(1630022017029)

<sup>\*</sup> 通讯作者 Corresponding author.E-mail: wxp166@163.com

spectroscopy) of leaf litter. The results showed that the decomposition rates were significantly affected by varying degrees of slope and depth. The dry matter remaining rates between different treatments were in the following order: covered slopes (39.6%) > covered flatland (26.8%) > buried flatland (11.2%) > buried slopes (6.9%). Leaf litter loss agreed with an Olsen exponential attenuation model (P < 0.01). The time required for 95% leaf litter decomposition was 29.3, 20.5, 12.8, and 13.2 months, and the C/N ratios decreased from the initial 25.1 to 12.7, 14.4, 16.2, and 16.9 after 9 months, for the above treatments, respectively. The nutrient remaining rates were significantly different (P < 0.05) among different treatments during the decomposition stage. After 9 months, the nutrient remaining rate for C, N, P, K, Ca, and Mg on the covered slope was higher than that in other treatments, at 10.9%, 21.6%, 10.7%, 9.7%, 10.4%, and 7.9%, respectively; but that in the buried slopes was lower than that in the other treatments, at 3.8%, 6.5%, 3.4%, 2.3%, 0.8% and 2.1%, respectively. Analysis of the FTIR spectroscopy characteristics of leaf litter showed the absorption peak strength at waves of 3,387 cm<sup>-1</sup> and 1,734 cm<sup>-1</sup>, which obviously became weak after 9 months of decomposition, thus proving the decomposition and transformation of carbohydrates, i.e. cellulose, hemicellulose, lignin, polysaccharide, and fatty acid group compounds. The absorption peak at  $1,050 \text{ cm}^{-1}$  shifted to 17 cm at low frequency and then changed to  $1,033 \text{ cm}^{-1}$ , suggesting that decomposition destroyed the original soluble sugar and cellulose C-C and C-O bond stretching vibration. In conclusion, buried leaf litter could contribute to mass loss and nutrient release. Therefore, we suggest that the litter of rubber forests should be mixed with soil or buried in green manuring pits to improve the recycling efficiency of rubber plantation systems.

Key Words: rubber forest; leaf litter; decomposition; nutrients; FTIR

植株凋落物的分解是土壤有机质形成、有机养分的矿化以及维持碳平衡的关键过程<sup>[1]</sup>。森林植被每年 从土壤中吸收的养分物质 50%以上以枯枝落叶形式归还给土壤,充分利用森林凋落物,实现森林的自肥作 用,在森林土壤的培肥与管理上具有十分重要的意义<sup>[2]</sup>。橡胶林生态系统作为一个开放的人工森林系统,是 我国热带地区主要的人工林生态系统类型之一,每年有大量的枯枝枯叶凋落,进而在该系统中分解、循环。研 究表明,在橡胶树 33 年的生产周期内,通过枯枝落叶的分解向土壤归还的氮、磷、钾、镁量分别为 1350、90、 300、270 kg/hm<sup>2[3]</sup>。可见,凋落物在橡胶林生态系统养分循环中占较大比重。橡胶树作为阔叶高大乔木,通 常在每年的 2—3 月份落叶而换发新叶,研究凋落叶在橡胶树全周期生产中的养分循环过程及其影响因素对 指导橡胶林合理施肥具有重要的实践意义。

我国橡胶林种植地型多变、气候环境复杂,土壤动物、立地条件、温度、大气沉降、植被类型等因素均可能 对凋落物分解产生一定的影响。研究表明,凋落物分解受到土壤微生物生活代谢的影响较大,土壤中的环境 条件越利于微生物生长则凋落物的分解就越迅速,而土壤微生物活性在特定环境下与所处的深度密切相 关<sup>[4]</sup>。不同立地条件下土壤水分、径流强度均有差异,也会对凋落物的分解产生较大的影响。研究表明,适 宜的土壤水分可提高分解者的活性,调控微生物氧活性,并可能通过破坏有机质结构为微生物提供可利用的 有机碳<sup>[5]</sup>。另外,坡度大小也会影响地表径流及凋落物的积累进而导致矿质养分的流失或聚集<sup>[6]</sup>。目前研 究橡胶林凋落物分解方式多数集中在地表覆盖,而忽视了立地条件等因素<sup>[7]</sup>。再者,凋落物在土壤中分解转 化所形成的中间产物是非常复杂的,并且很难分离出来,而红外光谱技术则能够区分个体结构上的差异,同时 具有操作简便及快速检测等特点,可用于作物残体结构的变化。将傅里叶变换红外光谱(fourier transform infrared spectroscopy,FTIR)应用于农业研究是近些年来关注的热点,探索森林生态系统凋落环提供理论参考<sup>[5, 89]</sup>。

本研究拟采用尼龙网袋原位分解法,探究橡胶林凋落叶在不同坡度及埋深条件下的干物质分解、养分释放特性,同时运用 FTIR 技术,定性分析凋落叶分解前后的组分及结构变化特征,为橡胶林生态系统的物质循环深入研究及指导科学施肥提供理论基础。

#### 1 材料与方法

#### 1.1 试验点概况

试验点位于海南省儋州市中国热带农业科学院试验场,地处 109°49′E,19°48′N。该地区处于东亚大陆季 风气候的南缘,属热带湿润季风气候,5—10月为雨季,11月—次年4月为干季,年均日照时数 2000 h 以上, 年均气温为 23.5℃,年均降雨量为 1623 mm(图1)。该地区由丘陵、平原和山地三部分构成,丘陵占 76.50%, 平原占 23.13%,山地占 0.37%,海拔大部分在 200 m 以下。土壤类型为花岗岩发育的砖红壤,主要人工林植 被类型为天然橡胶林。





## 1.2 试验设计

2017年3月(橡胶树落叶期)在试验区林地收集橡胶树自然凋落叶作为研究对象,将凋落叶于室内风干备用,凋落叶分解采用凋落袋法。将凋落叶剪成1 cm ×1 cm 的片段,准确称取 10 g,分别装进 10 cm(宽)×20 cm(长)、孔径1 mm<sup>2</sup>的尼龙网袋中<sup>[10]</sup>。随机称取5份重量为20 g的风干叶片,放于烘箱中70°C烘干72 h 至恒重,计算风干系数。

试验从 2017 年 4 月 1 日开始,选择平地和坡地(坡 度约 20°)相邻的两块管理一致的橡胶园,橡胶树栽培 密度为 3 m×7 m,两块试验样地面积分别约为 200 m<sup>2</sup>。 尼龙网袋均匀置于距每棵树干 1 m 的位置,如图 2 所 示。试验设 4 个处理:(I)平地胶园地表覆盖(F-I), (2)平地胶园埋深 10 cm(F-II),(3)坡地胶园地表覆盖 (S-I),(4)坡地胶园埋深 10 cm(S-II),每个处理 3 次重 复,共计 96 袋;其中地表覆盖处理是将尼龙网袋固定于 地表并与土壤平行接触,并用凋落叶将其覆盖;埋深处 理是将尼龙网袋平放于挖好的坑穴后回填原土,坑穴的 长、宽、深分别为 15、25、10 cm。试验开始后分别于 15、 30、60、90、120、150、210、240 d 共 8 次进行采样,每次每



图 2 试验处理示意图

Fig.2 The diagram of experimental treatments

F-I:平地胶园地表覆盖处理, Treatment of covered flatland; F-II:平 地胶园埋深处理, Treatment of buried flatland; S-I: 坡地胶园地表覆 盖处理, Treatment of covered slopes; S-II: 坡地胶园埋深处理, Treatment of buried slopes

3期

处理各取回3袋,带回实验室,将杂物和土块用手挑出,随后用自来水轻轻冲洗尼龙网袋表面及内部的泥土, 待网袋及凋落叶附着泥土风干后,用毛刷将其去除干净,随后将凋落叶装于纸质信封袋中置于70°C烘箱中烘 干至恒重,记录烘干重。烘干样品用陶瓷研钵进行磨细、过筛后用于养分元素含量测定及傅里叶变换红外光 谱(fourier transform infrared spectroscopy,FTIR)分析。

1.3 样品分析方法

凋落叶全碳(C)采用重铬酸钾外加热法,氮(N)和磷(P)均采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮-连续流动分析仪法,钾(K)采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮-火焰光度计法,钙(Ca)和镁(Mg)均采用 H<sub>3</sub>ClO<sub>4</sub>-HNO<sub>3</sub>消煮-原子吸收分光光度计法<sup>[11]</sup>。橡胶树凋落叶初始化学性质如表 1 所示。

表1 凋落叶初始化学性质							
Table 1     Initial chemical properties of the rubber leaf litter							
	C/%	N/%	C/N	P/%	K/%	Ca/%	Mg/%
凋落叶 Leaf litter	43.81	1.75	25.1	0.114	1.207	1.256	0.170

凋落叶 FTIR 分析方法:将样品过 100 目筛,在 105°C 烘箱中烘干恒重后,在干燥条件下,放入玛瑙研钵中,同时加入烘干的已去除结晶水的 KBr(光谱纯级)适量,在红外灯下混匀后反复磨细呈淀粉状,取少许在压片机上压成透明的薄片,真空条件下,用压杆缓慢加压至约为 15 Mpa,维持 1 min,之后将薄片放在 Nicolet 公司的 Inpact-410 型 FTIR 光谱仪上进行测定,测定区域 4000—900 cm<sup>-1</sup>,扫描次数 32 次,分辨率 4 cm<sup>-1</sup>。

# 1.4 数据分析<sup>[10]</sup>

(1) 凋落叶干物质残留率(%)

#### $M_{1}/M_{0} \times 100\%$

式中, $M_t$ 为 t 时刻的凋落叶剩余干重(g), $M_0$ 为凋落叶初始干重(g)。

(2) 凋落叶分解速率(k)

根据 Olsen 衰减模型模拟凋落叶分解过程,并计算凋落叶分解系数(k)

 $M_{t}/M_{0} = e^{-1kt}$ , k 为凋落叶分解系数, t 为分解时间。

(3)元素残留率(*R*)

### $R = (C_t \times M_t) / (C_0 \times M_0) \times 100\%$

式中,C,为t时刻的凋落叶养分元素含量(%),Co为初始养分元素含量(%)。

1.5 数据分析

采用 Omnic 8.0 软件对 FTIR 谱图进行数据处理, Origin 8.0 软件绘图, SPSS 20.0 软件进行统计分析, LSD 法进行多重比较。

#### 2 结果与分析

2.1 坡度和埋深对凋落叶干物质残留率和 C/N 比的影响

图 3 显示,随分解时间推进,各处理的凋落叶干物质残留率呈逐渐下降趋势。分解初始到 2 个月期间,地 表覆盖处理 F-I、S-I 均大于埋深处理 F-II、S-II;从分解 3—9 个月,各处理的干物质残留率大小顺序表现为:坡 地地表覆盖处理 S-I>平地地表覆盖处理 F-I>坡地埋深处理 F-II、平地埋深处理 S-II。凋落叶分解 9 个月后,F-I、F-II、S-I 和 S-II 的干物质残留率分别为 26.8%、11.2%、39.6%、6.9%。总体来看,埋深处理的凋落叶干物质 残留率较地表覆盖处理快。方差分析显示,各时期处理间干物质残留率差异显著(P<0.05)。

利用 Olsen 指数衰减模型对凋落叶干物质分解动态进行拟合,相关系数 R<sup>2</sup>均达极显著水平(P<0.01)(表 2)。方程中分解系数 k 值的生态学意义是 k 值越大,凋落叶的分解速率越快。由表 2 可以看出各处理的分解 常数间差异显著(P<0.05),埋深处理 F-II、S-II 显著高于地表覆盖处理 F-I、S-I,而地表覆盖条件下则平地 F-I

明显大于坡地 S-I。凋落叶干物质分解 50% 和 95% 所需要的时间以坡地覆盖处理 S-I 最长, 而埋深处理 F-Ⅱ、S-Ⅱ 所需要的时间均较短。

凋落叶 C/N 比也随分解时间推进呈波动性降低的趋势(图 3)。各处理相比,4个月前坡地覆盖处理 S-I 的 C/N 比明显高于其他处理(P<0.05),而4个月后处理间差异不显著(P<0.05)。F-I、F-II、S-I 和 S-II 凋落叶 C/N 比从最初始的 25.1 下降到 9 个月后的 14.4、16.2、12.7、16.9。







\* 表示同一时间不同处理间差异显著(P<0.05)

	Table 2 Decomposition of	characteristics of leaf li	tter under varying slo	ps and depths for rubber	tree
处理 Treatment	Olsen 指数模型 Olsen exponential model	相关系数 Correlation coefficient(R <sup>2</sup> )	分解常数 Decomposition coefficient(k)	分解 50%所需时间 Time required for leaf litter decomposition 50%/a	分解 95%所需时间 Time required for leaf litter decomposition 95%/a
F-I	$M_t / M_0 = e^{-0.1464t}$	0.9412	0.1464 b	0.39	1.71
F-II	$M_t/M_0 = e^{-0.2341 t}$	0.9166	0.2341 a	0.25	1.07
S-I	$M_{t/}M_0 = e^{-0.1024 t}$	0.8777	0.1024 с	0.57	2.44
S-II	$M_t / M_0 = e^{-0.2270 t}$	0.9204	0.2270 a	0.26	1.10

表 2	不同坡度和埋深条件下橡胶树凋落叶干物质分解特征

t:分解月份 t-decomposition time,k:年分解常数 k Annual decomposition rate, $M_t/M_0:$ 调落叶干物质残留率 Dry mass remaining rates of leaf litter,  $M_t:$ 调落叶剩余干重 Residual dry mass weight of litter leaf, $M_0:$ 调落叶初始干重 Initial dry mass weight of litter leaf;数据后不同字母表示不同处理间 差异显著(P<0.05)

#### 2.2 坡度和埋深对凋落叶分解过程中 C、N 含量及其残留率的影响

由图 4 可知, 凋落叶 C 含量随分解时间推进均呈波动性降低的趋势, 表现为 0—0.5 个月增加, 0.5—4 个 月急剧下降, 4—5 个月增加, 5—9 个月缓慢下降。以坡地埋深处理 S-II 的 C 含量始终最高, 而平地覆盖处理 F-I 的 C 含量始终最低, 在分解 1、2、4、5、7、9 个月时处理间差异显著(P<0.05)。C 残留率随分解时间推进均 呈逐渐下降的趋势, 坡地覆盖处理 S-I 的 C 残留率高于其他处理, 方差分析表明, 1—9 个月间, 处理间差异均 达显著水平(P<0.05); 分解 9 个月后, F-I、F-II、S-I 和 S-II 处理 C 残留率分别为 6.4%、5.9%、10.9% 和 3.8%。

凋落叶 N 含量的变化在 2 个月前呈现增加趋势,2—9 个月呈持续降低的趋势;埋深处理 F-II 和 S-II 的氮 含量均高于覆盖处理 F-I 和 S-I,处理间差异显著(P<0.05)。N 残留率随分解时间推进均呈下降趋势,坡地覆 盖处理 S-I 的 N 残留率高于其他处理,方差分析表明,处理间差异显著(P<0.05);分解 9 个月后,F-I、F-II、S-I 和 S-II 处理 N 残留率分别为 11.8%、9.1%、21.6%和 6.5%。

2.3 坡度及埋深对凋落叶分解过程中 P、K、Ca、Mg 含量及其残留率的影响

由图 5 可知, 凋落叶 P 含量随分解时间的推进, 各处理变化有所不同, 其中坡地覆盖处理 S-I 在 0.5 个月前呈降低的趋势, 0.5—4 个月呈持续上升的趋势, 而埋深处理 F-II 和 S-II 在 0.5 个月前均呈上升的趋势,



图 4 不同坡度及埋深条件下橡胶树凋落叶 C、N 含量及其残留率的动态变化 Fig.4 Variation of C, N contents and their remaining rate under varying slopes and depths for rubber leaf litters

0.5—4个月呈降低的趋势,各处理在 4—9个月均呈持续降低的趋势;分解期间,埋深处理 F-II、S-II 的 P 含量 均高于覆盖处理 F-I、S-I,方差分析显示处理间差异显著(P<0.05)。凋落叶 P 残留率随分解时间推进变化趋 势与 P 含量基本一致,分解 3 个月后的坡地覆盖处理 S-I 的残留率明显高于坡地埋深处理 S-II,处理间差异显 著(P<0.05)。分解 9 个月后,F-I、F-II、S-I 和 S-II 处理 P 残留率分别为 5.7%、5.3%、10.7%和 3.4%。

凋落叶 K 含量在 2 个月前呈急剧降低的趋势,2—4 个月呈缓慢上升的趋势,4—9 个月呈缓慢下降的趋势,9 个月之前处理间差异显著(P<0.05)。凋落叶 K 残留率与 K 含量变化趋势相似,分解期间以坡地地表覆盖处理 S-I 的 K 残留率最高,在 0—2 个月急剧下降到较低水平,分解 2 个月时,F-I、F-II、S-I 和 S-II 各处理 K 残留率分别为 29.3%、19.5%、32.7%和 17.1%;分解 9 个月后,F-I、F-II、S-I 和 S-II 各处理 K 残留率分别仅为 4.8%、3.1%、9.7%和 2.3%。处理间差异显著(P<0.05)。

凋落叶 Ca 含量随分解时间的推进,覆盖和埋深处理的变化有所差别,平地覆盖处理 F-I 和平地埋深处理 F-II 均呈持续降低的趋势,而坡地覆盖处理 S-I 和坡度埋深处理 S-II 均呈先增加后降低的趋势,在分解 2 个月 时达到最大值,之后呈持续降低的趋势,其中坡地埋深处理 S-II 在 2 个月后由各处理中最高水平急剧下降到 最低水平;方差分析显示,处理间差异显著(P<0.05)。凋落叶 Ca 的残留率以坡面覆盖处理 S-I 较高,坡面埋 深处理 S-II 最低,方差分析表明,处理间差异均显著(P<0.05)。分解 9 个月后,F-I、F-II、S-I 和 S-II 各处理 Ca 残留率分别为 5.5%、1.4%、10.4%和 0.8%。

凋落叶 Mg 含量随分解时间的推进呈上升—下降的趋势,在分解 0.5 个月时达到最大值;分解第 9 个月时 处理间无显著差异(P<0.05)。就凋落叶 Mg 残留率而言,坡地条件下的 Mg 残留率呈上升—下降的趋势,在 0.5 个月时达到最大,而平地条件下的 Mg 残留率则呈持续下降的趋势,坡地覆盖处理 S-I 的残留率高于其他 处理。方差分析表明,整个分解过程中处理间差异显著(P<0.05)。分解 9 个月后,F-I、F-II、S-I 和 S-II 各处理 Mg 残留率分别为 4.7%、3.4%、7.9%和 2.1%。

2.5 坡度及埋深对凋落叶红外光谱特征的影响

调落叶分解前后的傅里叶变换红外光谱特征(FTIR)如图 6 所示。FTIR 吸收峰的归属如下:红外光谱吸

7





收峰发生变化的主要有 3387 cm<sup>-1</sup>(一部分为碳水化合物中-OH 形成的氢键的伸缩振动,另一部分为纤维素、 半纤维素、淀粉及其他多糖和单糖等的成分,也包括氨基酸中 N-H 伸缩振动);2920 cm<sup>-1</sup>和 2852 cm<sup>-1</sup>(分别 为对称和非对称的油脂中-CH 伸缩振动,主要是膜脂和细胞壁果胶中常见的酯类化合物,反映膜透性);1735 cm<sup>-1</sup>(酯化果胶中酯基-COOR 的伸缩振动);1638 cm<sup>-1</sup>(细胞壁蛋白质上的 C=O 酰胺(iv 带)伸缩振动,反映 蛋白构象);1512 cm<sup>-1</sup>(蛋白质上 N-H 酰胺基(vii 带)的伸缩振动,酰胺化合物的特征吸收峰);1439 cm<sup>-1</sup>(木 质素和碳水化合物中饱和 C-H 的弯曲振动);1375 cm<sup>-1</sup>(具有脂肪族特征化合物中-CH<sub>3</sub>的对称变形振动,说 明存在纤维素);1153 cm<sup>-1</sup>(C-O 的伸缩振动,蛋白质分子氨基酸残基、纤维素糖苷等多糖吸收峰);1033 cm<sup>-1</sup> 和 1050 cm<sup>-1</sup>(碳水化合物和多糖结构中的 C-O 伸缩振动)。

与分解初始相比,分解9个月后的3387 cm<sup>-1</sup>处吸收峰强度有不同程度减弱,表明橡胶树凋落叶中的纤维素、半纤维素、多糖等碳水化合物得到分解,使-OH 基团含量减少,凋落叶中的残留C量也随之显著减少;各

处理相比较,坡地埋深处理 S-II 的吸收峰最弱,说明其分解速率较其他处理快。2920 cm<sup>-1</sup>、2853 cm<sup>-1</sup>在分解 后吸收峰强度有所减弱,说明分解后凋落叶细胞壁中的蛋白质、纤维素和果胶等组分有所减少;各处理相比 较,F-I 的吸收峰最强,S-II 的吸收峰较弱。1734 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰在分解后基本消失,说明羧酸酯类化合物基 本分解。1638 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰强度有所减弱,说明细胞壁中 C=O 基含量减少,蛋白质含量降低;各处理相比 较,平地吸收峰强度强于坡地、覆盖强于埋深。1439、1375 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰在分解后消失,即木质素 C-H 弯曲 振动和具脂肪族特征的化合物中-CH3 的对称变角振动消失,表明橡胶树凋落叶中木质素、纤维素、半纤维素 或具脂肪族特征的化合物产生了分解。1050 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰向低频方向位移了 17 cm 后变为 1033 cm<sup>-1</sup>,说 明凋落物在分解过程中凋落叶原有的可溶性糖和纤维素 C-C 键和 C-O 键伸缩振动遭到破坏;各处理相比 较,埋深处理 F-II 和 S-II 的吸收峰较 F-I 和 S-I 处理弱,也说明埋深处理加速了凋落叶的分解,碳残留碳量随 之降低。1153 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰消失,说明蛋白质分子氨基酸残基、纤维素糖苷等多糖降解。



图 6 不同坡度及埋深条件下橡胶树凋落叶 FTIR(Fourier transform infrared spectroscopy)光谱特征 Fig.6 FTIR (Fourier transform infrared spectroscopy) spectra of litter leaf initial and after decomposition in varying slopes and depths

#### 3 讨论

#### 3.1 埋放位置对凋落叶干物质分解速率的影响

本研究表明,凋落叶埋深处理的干物质分解速率明显比地表覆盖快;Olsen 指数方程模拟显示,埋深处理 分解 50%和 95%所需要的时间比地表覆盖处理快 1.7—3.7 个月和 7.7—16.1 个月。有研究表明,埋深处理明 显加速了杉木凋落叶分解,主要因为地下土壤水热条件要好于地表,有利于微生物活动分解<sup>[12]</sup>;金龙等<sup>[13]</sup>认 为埋于橡胶林地下的凋落叶与土壤接触面积更大,土壤生物参与凋落叶分解的机会也更大;陈晓丽等<sup>[14]</sup>研究 表明,随土层深度加深,过氧化氢酶活性增大,进而促进凋落物的分解。本研究结果还显示,平地覆盖处理的 凋落叶干物质分解速率比坡地覆盖处理快,与吕瑞恒等<sup>[15]</sup>研究结果相似,其研究表明,坡度越小,越有利于凋 落物的分解。海拔、坡度的变化导致林下水热条件具有不同程度的差异,进而影响凋落物分解速率。本研究 还认为,坡度主要影响土壤水分,坡度越大,土壤地表保水能力越差,越不利于微生物的活动,从而不利于凋落 物的分解。

### 3.2 埋放位置对凋落叶养分元素分解的影响

本研究表明,凋落叶分解过程中 C 和 N 含量呈波动性下降的趋势,但其残留率呈持续下降的趋势。该现 象说明,分解过程中凋落叶对 C 和 N 的富集作用较弱。赵春梅等<sup>[7]</sup>研究表明,叶片氮的富集出现在 4 月份, 富集率仅为 2.75%,其余时间几乎呈下降的趋势;也可以说明,枯落叶在分解过程中释放的 C、N 对土壤的补 充贡献较高。王春阳等<sup>[16]</sup>研究表明,凋落物可显著提高土壤微生物碳、氮含量。坡地覆盖处理 S-I 的 C、N 残 留率均较高,埋深处理均较低,说明埋深处理加快了营养元素的释放速率,与吕瑞恒等<sup>[14]</sup>的研究结果相似。 与 C、N 分解有所不同的是,P、K、Ca、Mg 矿质营养元素在分解过程中均呈"释放-富集"模式,富集现象出现时 间分别为:埋深处理的 P 在 0.5 个月和 3—4 个月之间,所有处理的 K 在 4 个月时,坡地覆盖处理 S-I 的 Ca 在 2 个月时,坡地条件下的 Mg 在 0.5 个月时。各营养元素的富集率均较低且持续时间均较短,总体均呈显著释 放的趋势。K 含量急剧下降,之后趋于平缓,这与 K 在植物体内主要以离子态存在形式有很大关系<sup>[17]</sup>。各营 养元素的分解速率均以坡地覆盖处理 S-I 最慢且残留量最大,以埋深处理均较快且残留量较小,造成该现象 的主要原因与坡地覆盖处理干物质分解速率慢而埋深处理干物质分解较快有较大的关系。

#### 3.3 埋放位置对凋落叶红外光谱特征的影响

以往的研究表明,油菜秸秆腐解过程中最明显的变化在 3430—3410、2930 cm<sup>-1</sup>处,其吸收峰强度减弱,脂 族性下降<sup>[5]</sup>。王文全等<sup>[18]</sup>研究表明,随时间推移,牛粪腐解在 3430、2925 cm<sup>-1</sup>和 2855 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰逐渐 减弱,说明在分解过程中碳水化合物、脂肪族和蛋白质等有机物逐渐在分解。本试验结果表明,分解 270 d 之 后,在 3387、2920、2853、1439 cm<sup>-1</sup>和 1375 cm<sup>-1</sup>处的吸收峰有所减弱甚至消失,说明凋落叶碳水化合物、脂肪 族碳、蛋白质等进行了部分的分解,也应证了凋落叶在分解后全 C 含量及 C/N 大幅下降的原因。主要官能团 FTIR 中反映细胞壁多糖信息的是指纹区 900—1200 cm<sup>-1</sup>(糖链的特征峰)。本研究表明,在 1033 cm<sup>-1</sup>处的吸 收峰强度均表现为地表覆盖强于埋深处理,也说明,埋深加快了凋落叶碳水化合物的分解。因此,在橡胶林生 态系统中,可以采取适当的或局部的将凋落物与表土掺混,以加强土壤微生物的分解活动,促进凋落物的分 解,加速养分的释放,供橡胶树根系吸收利用。

### 4 结论

橡胶树凋落叶干物质残留率随分解时间的推进符合 Olsen 指数衰减模型,相关系数达极显著水平(P<0.01)。凋落叶干物质和养分元素分解速率均受坡度和埋深处理显著影响(P<0.05),埋深处理较地表覆盖处 理加快了凋落叶干物质分解速率;经过9个月的分解,坡地覆盖处理 S-I 的凋落叶 C、N、P、K、Ca 和 Mg 的元素 残留率均较其他处理高,而埋深处理 F-II 和 S-II 的元素残留率均较低。傅里叶红外光谱分析显示凋落叶分解 后的碳水化合物、果胶、蛋白质、木质素等含量不同程度减少,羧酸酯类化合物基本分解,埋深处理分解程度均 较覆盖处理高。综上所述,凋落叶分解过程中,平地覆盖较坡地覆盖分解快,而埋深处理较覆盖处理分解快。 建议橡胶生产中采取凋落叶与地表土掺混或压青的农艺措施以加快凋落叶的分解,提高养分循环效率,同时 还能降低养分流失及森林火灾风险。

#### 参考文献(References):

- Austin A T, Ballaré C L. Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2010, 107(10): 4618-4622.
- [2] 张鹏. 亚热带森林土壤分解酶活性的季节变化及凋落物分解的研究[D]. 南京: 南京大学, 2007.
- [3] 曹建华,蒋菊生,赵春梅,陈俊明.橡胶林生态系统养分循环研究进展.热带农业科学,2007,27(3):48-56.
- [4] 李海涛,于贵瑞,李家永,陈永瑞,梁涛.亚热带红壤丘陵区四种人工林凋落物分解动态及养分释放.生态学报,2007,27(3):898-908.
- [5] 王景,魏俊岭,章力干,常江,郜红建. 厌氧和好气条件下油菜秸秆腐解的红外光谱特征研究. 中国生态农业学报, 2015, 23(7): 892-899.
- [6] Koarashi J, Atarashi-Andoh M, Takeuchi E, Nishimura S. Topographic heterogeneity effect on the accumulation of Fukushima-derived radiocesium on forest floor driven by biologically mediated processes. Scientific Reports, 2014, 4: 6853.

- [7] 赵春梅,曹建华,李晓波,兰国玉,彭宗波,蒋菊生.橡胶林枯落物分解及其氮素释放规律研究.热带作物学报,2012,33(9): 1535-1539.
- [8] 曹莹菲,张红,赵聪,刘克,吕家珑.秸秆腐解过程中结构的变化特征.农业环境科学学报,2016,35(5):976-984.

[9] Soong J L, Calderón F J, Betzen J, Cotrufo M F. Quantification and FTIR characterization of dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen leached from litter: a comparison of methods across litter types. Plant and Soil, 2014, 385(1/2): 125-137.

- [10] 文海燕,傅华,郭丁.黄土高原典型草原优势植物凋落物分解及养分释放对氮添加的响应.生态学报,2017,37(6):2014-2022.
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京:中国农业出版社, 2005.
- [12] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英, 俞立煊. 杉木幼林生态系统凋落物及其分解作用研究. 植物生态学报, 1997, 21(6): 564-570.
- [13] 金龙,吴志祥,杨川,管利民,赖华英.不同林龄橡胶凋落物叶分解特性与有机碳动态研究.热带作物学报,2015,36(4):698-705.
- [14] 陈晓丽, 王根绪, 杨燕, 杨阳. 山地森林表层土壤酶活性对短期增温及凋落物分解的响应. 生态学报, 2015, 35(21): 7071-7079.
- [15] 吕瑞恒,李国雷,刘勇,贾黎明,江萍,林娜.不同立地条件下华北落叶松叶凋落物的分解特性.林业科学,2012,48(2):31-37.
- [16] 王春阳,周建斌,夏志敏,刘瑞.黄土高原区不同植物凋落物搭配对土壤微生物量碳、氮的影响.生态学报,2011,31(8):2139-2147.
- [17] 何洁,杨万勤,倪祥银,李晗,徐李亚,吴福忠.雪被斑块对川西亚高山森林凋落物冬季分解过程中钾和钠动态的影响.植物生态学报, 2014,38(6):550-561.
- [18] 王文全,赵秀玲,罗艳丽,施宠,马荷,余雄,贾宏涛.牛粪发酵过程中的红外光谱分析.中国牛业科学,2011,37(2):15-19.