



# 生态茶园植物残体在不同空间的分解动态

宋凯, 杨瑞\*, 郭家瑞, 马觉兵, 刘莎茜, 高旭, 赵洋洋

(贵州大学林学院, 贵州贵阳 550025)

**摘要:**【目的】探索不同植物在不同空间的自然分解变化过程,为茶园的物质养分循环及维持土壤肥力提供理论依据。【方法】采用分解袋法分析茶(*Camellia sinensis*)修剪物、光皮桦(*Betula luminifera*)、猴樟(*Cinnamomum bodinieri*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松(*Pinus massoniana*)的植物残体在土壤、林冠和地表的分解特征、时间动态及不同阶段分解速率差异。【结果】植物残体自然分解过程中总体呈快—慢的变化趋势,不同空间的残体质量损失率为土壤>地表>林冠,具体为茶修剪物、光皮桦和猴樟的残体质量损失率随高度升高逐渐减少,杉木和马尾松的残体质量损失率随高度升高先增加后减少。多因素方差分析表明,空间、时间、树种及三者间交互作用极显著影响植物残体干重剩余率( $P<0.01$ ),影响最大为时间,其次为空间和树种,最小为三者交互作用。利用Olson指数衰减模型估计各树种分解系数发现,总体上林冠分解速率低于地表和土壤,针叶树种植物残体分解速率小于阔叶树种。不同树种分解速率存在差异,地表和土壤中前期的分解速率明显大于后期,林冠和土壤的年分解速率排序依次为茶修剪物>光皮桦>猴樟>马尾松>杉木,而地表的年分解速率排序依次为茶修剪物>光皮桦>猴樟>杉木>马尾松,且茶修剪物、光皮桦和猴樟的年分解速率与空间具有显著线性正相关关系( $P<0.05$ ),杉木和马尾松则无显著相关( $P>0.05$ )。【结论】地表和土壤相较林冠能提高植物残体利用效率,适当清除林冠累积的植物残体,并将其置于土壤和地表环境更利于其降解。

**关键词:**茶园; 植物残体; 林冠; 地表; 土壤; 分解

中图分类号: S571.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-1191(2024)01-0151-09

## Decomposition dynamics of plant residues in ecological tea plantations across different spatial scales

SONG Kai, YANG Rui\*, GUO Jia-ru, MA Jue-bing, LIU Sha-xi,  
GAO Xu, ZHAO Yang-yang

(College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China)

**Abstract:**【Objective】To explore the natural decomposition change process of different plants in different spaces and provide a theoretical basis for the material nutrient cycle and maintenance of soil fertility in tea plantations. 【Method】The decomposition bag method was used to analyze decomposition characteristics, temporal dynamics, and differences in decomposition rates at different stages of plant residue decomposition in soil, forest canopy, and surface of tea (*Camellia sinensis*) prunings, light-barked birch (*Betula luminifera*), monkey camphor (*Cinnamomum bodinieri*), cedar (*Cunninghamia lanceolata*), and horsetail pine (*Pinus massoniana*). 【Result】The overall trend of natural decomposition of plant residues was fast-slow, and the rate of residue mass loss in different spaces was soil>surface>crown. Specifically, the rate of weight loss of tea prunings, light-barked birch, and monkey camphor gradually decreased with increase of height, and that of cedar and horsetail pine first increased and then decreased with increase of height. Multi-factor analysis of variance showed that space, time, tree species, and three-way interaction extremely significantly affected the dry weight residual rate of plant residues ( $P<0.01$ ), with the most significant effect being time, followed by space, tree species, and the smallest being three-way interaction. Using Olson's exponential decay model to estimate the decomposition coefficients of each tree species, it was found that the overall decomposition rate of the forest canopy was lower than that of the surface and

收稿日期: 2023-09-14

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]1Y011号); 贵州省林业科研项目(黔林科合[2022]22号)

通讯作者: 杨瑞(1979-), <https://orcid.org/0000-0001-6618-8630>, 博士, 副教授, 主要从事森林植被恢复及可持续经营研究工作, E-mail: yr553017@163.com

第一作者: 宋凯(1999-), <https://orcid.org/0009-0009-0390-4770>, 研究方向为森林经理学, E-mail: 953819403@qq.com

soil, and the decomposition rate of plant residues of coniferous species was lower than that of broadleaf species. There were differences in decomposition rates among different tree species, and the decomposition rate in the early stage was significantly greater than that in the late stage in the surface and soil. The annual decomposition rate of the forest canopy and soil was ranked as tea prunings>light-bark birch>monkey camphor>horsetail pine>cedar. At the same time, that of the surface was the inter-species ranking of tea prunings>light-bark birch>monkey camphor>cedar>horsetail pine. And the annual decomposition rates of tea prunings, light-bark birch, monkey camphor had a significant linear positive correlation with the space ( $P<0.05$ ), the relationship between cedar and horsetail pine was insignificant ( $P>0.05$ ). 【Conclusion】The surface and soil can improve the efficiency of plant residue utilization compared to the forest canopy, and appropriate removal of plant residues accumulated in the forest canopy and placing them in the soil and surface environments is more conducive to their degradation.

**Key words:** tea plantations; plant residues; forest canopy; soil surface; soil; decomposition

**Foundation items:** Guizhou Science and Technology Plan Project(QKHZC[2020]1Y011); Guizhou Forestry Scientific Research Project(Qianlinkehe[2022]22)

## 0 引言

【研究意义】在长期的茶树栽培过程中,植物残体作为连接植物与土壤环境的桥梁,其分解经过粉碎、机械淋溶及分解代谢变成简单的有机物或无机物,对维持土壤肥力、促进茶树生长起着重要作用(李雨菲等,2022; Zhang et al., 2022)。植物残体分解涉及复杂的物理化学过程,影响因素众多,包括残体本身的性质及生境、气候(Trogisch et al., 2016)、土壤动物微生物和酶活性等(杨曾奖等, 2007; Hobara et al., 2014),分解的实质是微生物在凋落物酶和土壤酶系统作用下的酶解过程。生态茶园注重生态保护和可持续发展,从保护增强茶园固碳能力和减施化学投入品等方面实现固碳减排;而一般茶园可能更注重产量和经济效益,未考虑间作的布局方式,也未考虑包括茶园在内的较大生境空间尺度的生态体系构建(尚怀国等,2022)。茶园周围及内部普遍存在散生乔木,产生的枯枝落叶散布于茶树冠层及地表土壤是茶园肥力的重要来源。植物残体分解作为山区茶园生态系统中养分、碳和能量循环的基本过程(Yang et al., 2022),研究其分解动态和影响因素对茶园土壤有机质形成和茶叶高效培育具有重要意义。【前人研究进展】植物残体分解作为养分归还的重要途径,在大尺度环境中气候和植物残体质量是影响分解速率的主要因素,但残体质量重要性低于气候因子,植物残体质量参数对不同气候带残体分解有显著影响(Zhang and Wang, 2015)。川西亚高山森林冷杉凋落枝分解过程中,林窗面积大小能改变分解温度、冻融频次和微生物活性(郭彩虹等,2018)。养分含量和结构化合物等凋落物特征是控制不同功能类型凋落物分解速率的主要因素,常绿针叶树凋落物的分解速率远低于落叶阔叶树和常绿阔叶树凋落物(Zhang et al., 2019)。Penner和Frank(2019)对控制黄石草原植物残体分解因素进

行研究发现,食草动物影响植物残体质量,放牧使残体中木质素/氮比值减小,对分解速率无显著影响,作为气候因素的降水是整个生态系统植物残体分解的重要驱动因素。植物残体中养分含量和生态化学计量特征控制着其可分解性,如氮、磷含量高且碳氮比、碳磷比较低的植物残体通常具有较高的分解速率(许策等,2020)。代松家等(2020)研究发现,不同生境对藏东南急尖长苞冷杉植物残体分解特征具有显著影响,其分解速率总体为林内>林外>林缘,且不同生境条件造成土壤养分空间差异性,从而间接影响植物残体分解速率。氮沉降和增雨可提高中小型土壤动物种类数量,从而促进植物残体分解,水分和氮素会抑制土壤生物群落数量的增长,最后降低其分解贡献率(梁志伟等,2021)。王玄等(2021)通过模拟高强度酸雨在分解后期抑制木荷和锥叶残体分解,凋落物覆盖在一定程度上减弱抑制土壤呼吸作用,该效应与凋落物类型及酸雨强度有关。Mao等(2021)对4种亚热带人工林凋落叶进行分解试验发现,地表凋落物分解是由地表微生物活动主导,空中凋落物由空气中非生物过程(物理破碎、淋溶、热降解)驱动。李雨菲等(2022)研究得出不同生境类型对喀斯特季节性雨林凋落叶失重率有重要影响,具体为洼地>坡地>峰顶,植物残体自身理化性质和海拔引起的温湿度差异是影响分解速率的主要因素。林分类型和分解位置是影响凋落物分解的重要因素,阔叶树(枫香和木荷)凋落叶分解速率均高于针叶树(马尾松和湿地松),且空中凋落叶分解速率普遍小于地表凋落叶(吴盼盼等,2023)。【本研究切入点】植物残体作为生态系统养分循环的重要来源之一,茶修剪物及茶园常见树种分解动态的相关研究仍较少,不同空间对残体分解过程的影响程度尚不明确。【拟解决的关键问题】以茶园内的茶(*Camellia sinensis*)修剪物及光皮桦(*Betula luminifera*)、猴樟

(*Cinnamomum bodinieri*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和马尾松(*Pinus massoniana*)的植物残体为研究对象,通过分解袋模拟野外分解试验,旨在分析空间位置对上述植物残体分解的影响,揭示空间条件对不同植物分解变化的影响,为促进茶园的物质养分循环及维持土壤肥力提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区及试验林概况

研究区域位于贵州省贵阳市花溪区久安乡(26°31'8"N~26°31'12"N, 106°36'47"E~106°36'50"E),属亚热带高原季风气候,年均温13℃,最冷月(1月)平均温度3~4℃,最热月(7月)平均温度22℃,无霜期260 d,年平均降水量1150 mm,海拔范围在1100~1400 m,主要土壤类型为黄壤。久安乡现有茶林面积1400 ha,茶树品种为树龄10年的红茶和绿茶,茶叶产区以茶—林复合种植为核心的生态茶园模式,森林类型为亚热带常绿落叶阔叶混交林,群落郁闭度0.6~0.8,阔叶树种包括茶树、猴樟和光皮桦,针叶树种包括杉木和马尾松,上述树种以近熟林和成熟林为主,上述乔木散生在茶树行间。本研究以茶园原生树种为试验材料,以空间、时间和树种为研究对象,研究茶园垂直空间位置、树种凋落物残体和分解时间对植物残体分解的影响。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样品的收集、布设和观测 2022年1—2月在生态茶园内收集茶修剪物,同时选择茶园中4个常见树种(光皮桦、猴樟、杉木和马尾松)的凋落叶为材料,同一树种凋落物均匀混合,在65℃下烘干至恒重(包剑利等,2015)。烘干完成后,分别称取50 g各树种植物残体放入分解袋中,分解袋尺寸为35 cm×25 cm,网眼孔径为1 mm,并对未装样分解袋进行称重记录(3袋为1组取均值),避免后期取样称重时分解袋的误差,不同位置下每种植物残体各54袋(同一位置18袋),共计270袋,通过网绳将分解袋固定于地表高度1.5 m的茶树冠层、土壤表层及土壤深度15~20 cm的同一树种样本各18袋,同一空间每次随机抽取相同树种样品3袋共计6次回收,每一空间5个树种样本共计90袋。所有试验准备完成后,于2022年2月将上述270个分解袋分别放入地势平坦的茶园行间林冠、地表和土壤,每行放置同一处理并将分解袋平行铺开,互不交错。2022年2月—2023年2月,每2个月取样1次并清除样品表面杂质,于65℃温度烘箱中烘干至恒重,测定剩余样品干质量。

1.2.2 测定指标及方法 植物残体质量损失率( $R$ )、分解百分数( $M_c$ )、干重剩余率( $D$ )、分解系数( $k$ )和分解速率( $r$ )通过以下公式进行计算(单玉梅等,2016):

$$R(\%)=(M_0-M_t)/M_0\times 100$$

$$M_c(\%)=(M_{t_1}-M_{t_2})/M_0\times 100$$

$$D(\%)=M_t/M_0\times 100$$

$$M_t/M_0=\alpha e^{-kt}$$

$$k=\ln(M_0/M_t)/t$$

$$r=(\ln M_{t_1}-\ln M_{t_2})/(t_1-t_2)$$

式中, $M_t$ 为分解 $t$ 时的残体分解后剩余重量, $M_0$ 为分解袋内分解样初始干重(g), $M_{t_1}$ 和 $M_{t_2}$ 分别为 $t_1$ 和 $t_2$ 时残体的重量, $\alpha$ 为拟合系数。根据Olson指数衰减模型计算植物残体分解50%和95%所需时间:

$$T_{50\%}=\ln 0.5/(-k)$$

$$T_{95\%}=\ln 0.05/(-k)$$

1.2.3 植物残体分解过程的模型拟合及评价 采用多因素方差分析计算空间、时间、树种及三者交互作用,偏Eta方值( $\eta^2$ )用于判断各因素对干重剩余率的影响,该值越大对分解影响越大。根据树种在不同空间的干重剩余率随时间的变化差异,将残体分解过程分为前期和后期2个阶段。用单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan's多重比较判断空间和前、后阶段分解百分数的差异显著性。采用改进的Olson指数衰减模型 $M_t/M_0=\alpha e^{-kt}$ 拟合干重剩余率随时间的变化过程,决定系数( $R^2$ )均在0.8以上拟合结果较好,并计算半衰期和周转期。

### 1.3 统计分析

用Excel 2010和SPSS 22.0进行统计分析,利用Origin 2018制图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同空间条件下植物残体的分解特征

将5种植物残体分别在3种空间条件(林冠、地表和土壤)进行分解试验,结果(图1)显示,经过1年的分解,同一植物残体在林冠、地表和土壤质量损失率差异明显,部分达显著水平( $P<0.05$ ,下同)。其中,阔叶树种分解速率随高度降低逐渐升高,光皮桦在林冠、地表和土壤分解最快,年质量损失率分别为50.44%、54.05%和69.43%;针叶树种分解速率随高度降低先增高后降低,杉木在林冠、地表和土壤分解最慢,年质量损失率分别为28.81%、47.25%和39.39%。总体上,不同空间位置对促进阔叶树种分解速率排序依次为土壤>地表>林冠,对促进针叶树种分解速率排序依次为地表>土壤>林冠。



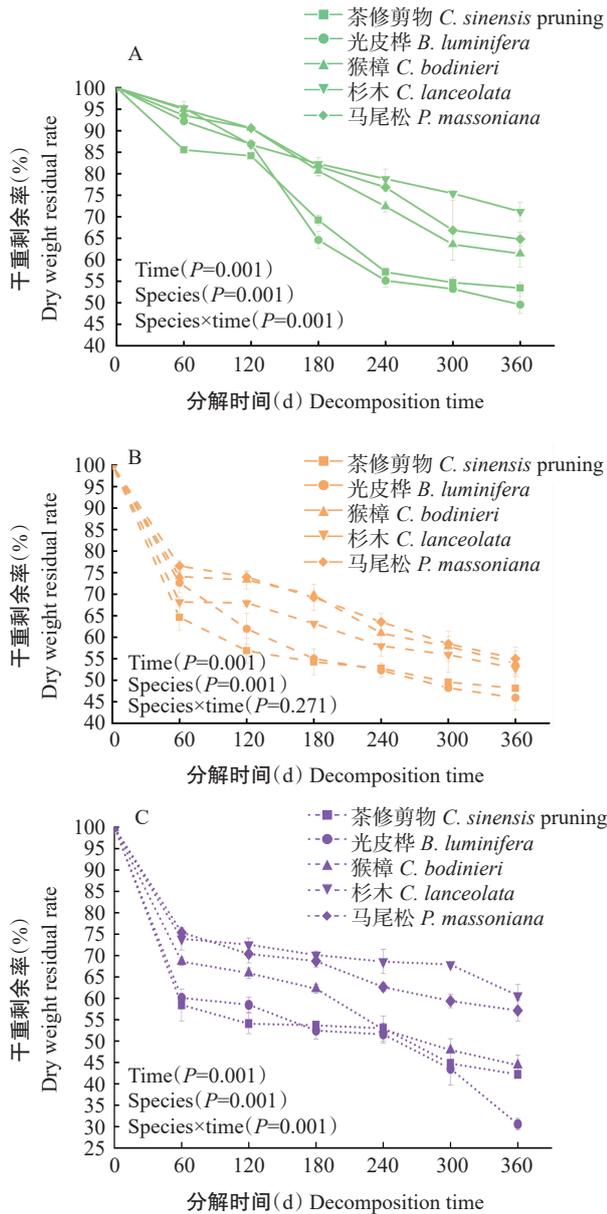


图 3 植物残体在林冠(A)、地表(B)和土壤(C)中干重剩余率的动态变化

Fig.3 Dynamic changes of dry weight residual rate of plant residues in canopy(A), soil surface(B) and soil(C)

图中左下角 $P$ 表示处于同一空间的时间、树种及其交互作用对干重剩余率影响达显著水平( $P<0.05$ )

The  $P$  value in the lower left corner of the figure indicated that the effect of time in the same space, tree species and their interaction on dry weight residual rate was significant( $P<0.05$ )

化趋势相异(图4)。茶修剪物、光皮桦和猴樟前期分解速率与空间呈显著三次函数正相关,马尾松和杉木与空间无显著相关;后期分解速率则完全不同,杉木与空间呈强显著负线性相关( $R^2=0.914$ ),茶修剪物、光皮桦、猴樟和马尾松与空间均无显著相关。从一年分解速率分析,茶修剪物、光皮桦和猴樟的年分解速率随空间变化均呈显著线性正相关,而马尾松和杉木年的分解速率与空间无显著相关。

### 3 讨论

#### 3.1 不同空间植物残体分解特征

植物残体分解的快慢对于植物养分有效性和生态系统生产力有重要影响(Wu et al., 2023),由于其种类和所处的环境不同,分解速度也不同(曾锋等, 2010)。本研究表明,地表和土壤的残体年质量损失显著大于林冠,说明地表和土壤的残体分解速率大于林冠,原因可能是土壤中的动物和微生物时刻影响着植物残体分解(查同刚等, 2012),土壤动物和土壤细菌菌群中高丰富度和多样性对植物残体分解具有促进作用(董学德等, 2021);且阔叶树种叶面积较大,质地柔软,易被土壤中的动物粉碎,有助于微生物的定居和生长繁殖。湿度也是影响植物残体的重要因素之一,水分通过淋溶作用引起植物残体分解的变化;土壤含水量变化间接影响土壤微生物的活性,促进地表和土壤中植物残体分解,从而对植物残体分解产生影响(Willcock and Magan, 2000)。

植物残体质量损失率代表分解速率,损失率越大,则分解速率越大,同一植物残体在不同环境的分解过程具有显著差异(徐波等, 2016)。本研究结果显示,猴樟、茶修剪物和光皮桦的年质量损失在不同生境下均表现为地下>地表>林冠,马尾松和杉木的年质量损失表现为地表>地下>林冠。分析其中原因,首先可能是植物的根及土壤生物在土壤中的呼吸作用排放 $CO_2$ ,造成土壤中 $CO_2$ 较多,而 $CO_2$ 浓度升高及针叶树种植物残体结构特征可能会导致土壤微生物的活性降低,影响植物根系的特征和土壤动物群落构成等,从而降低土壤生物对植物残体的分解作用(张悦等, 2023);其次,针叶树种叶片细长、坚硬,比阔叶树种含有更多不易分解的物质,马尾松针叶的木质素含量较高且比叶面积较大(袁亚玲等, 2018),杉木针叶植物残体有革质层的保护,较硬,养分归还能力较差(Li et al., 2021),不利于微生物的生长和繁殖,导致植物残体分解速率降低。

#### 3.2 植物残体分解动态变化

气候变化是影响植物残体分解的主要原因,温度和水分影响微生物的活性,进而影响植物残体的分解速率。气候在大尺度上对植物残体分解速率有显著影响(陈婷等, 2016),而在小尺度上,植物残体的自身因素和所处的土壤环境是关键(汪星星等, 2022)。谢娜等(2023)在研究马尾松和油茶细根分解过程发现细根分解时间显著影响分解速率,并受季节因素(大气降水、土壤温湿度等)影响,分解速率前期迅速下降,后期逐渐减缓,本研究也取得相同结

表 2 5种植物残体分解前期(0~60 d)和分解后期(60~360 d)的分解百分数

Table 2 Decomposition percentage of five plant residues in the early stage(0-60 d) and late stage(60-360 d) of decomposition

树种 Species	阶段(d) Period	分解百分数(%) Decomposition percentage		
		林冠 Canopy	地表 Soil surface	土壤 Soil
茶修剪物 <i>C. sinensis</i> pruning	0~60	14.43±0.62cB	35.39±5.34bA	44.00±2.41aA
	60~360	32.85±2.12aA	13.91±2.85bB	13.18±2.69bB
光皮桦 <i>B. luminifera</i>	0~60	7.77±0.95cB	28.82±1.85b	39.89±1.32aA
	60~360	42.35±1.16aA	26.70±1.06b	29.53±3.39bB
猴樟 <i>C. bodinieri</i>	0~60	4.46±0.46cB	25.90±0.31bA	31.39±1.57aA
	60~360	35.90±3.43aA	21.92±1.84bB	22.28±2.81bB
杉木 <i>C. lanceolata</i>	0~60	5.64±0.95cB	31.81±1.97aA	27.84±1.52bA
	60~360	25.59±1.77aA	15.43±0.98bB	14.14±0.89bB
马尾松 <i>P. massoniana</i>	0~60	6.45±0.16bB	23.42±2.14a	24.60±0.77aA
	60~360	28.73±2.93aA	23.95±3.44ab	19.84±2.45bB

不同小写字母表示同一树种在同一阶段不同空间之间差异显著 ( $P<0.05$ ); 不同大写字母表示同一树种在相同空间不同阶段间差异显著 ( $P<0.05$ )

Different lowercase letters indicated the same tree species at the same stage and different had significant difference ( $P<0.05$ ); different uppercase letters indicated the same tree species in the same spaces and at different stages had significant difference ( $P<0.05$ )

表 3 不同残体分解的模型拟合及预测

Table 3 Fitting model analysis and prediction of decomposition of different residues

树种 Species	空间 Space	回归模型 Regression model	$R^2$	分解时间(年) Time of decomposition(year)	
				50%	95%
茶修剪物 <i>C. sinensis</i> pruning	地表	$y=82.8e^{-0.73t}$	0.85	0.95	4.09
	林冠	$y=95.8e^{-0.63t}$	0.92	1.11	4.78
	土壤	$y=79.3e^{-0.80t}$	0.82	0.86	3.73
光皮桦 <i>B. luminifera</i>	地表	$y=86.9e^{-0.78t}$	0.86	0.89	3.85
	林冠	$y=97.8e^{-0.66t}$	0.87	1.05	4.53
	土壤	$y=76.6e^{-0.83t}$	0.85	0.83	3.60
猴樟 <i>C. bodinieri</i>	地表	$y=93.0e^{-0.62t}$	0.91	1.12	4.85
	林冠	$y=102.1e^{-0.49t}$	0.96	1.42	6.14
	土壤	$y=84.9e^{-0.74t}$	0.87	0.94	4.07
杉木 <i>C. lanceolata</i>	地表	$y=85.1e^{-0.64t}$	0.82	1.08	4.68
	林冠	$y=99.0e^{-0.34t}$	0.98	2.04	8.82
	土壤	$y=86.2e^{-0.39t}$	0.86	1.79	7.74
马尾松 <i>P. massoniana</i>	地表	$y=94.0e^{-0.60t}$	0.87	1.16	5.01
	林冠	$y=101.2e^{-0.43t}$	0.97	1.60	6.91
	土壤	$y=87.1e^{-0.52t}$	0.81	1.33	5.75

果。一般情况下,植物残体分解失重可分为2个主要阶段。茶林内春季(前期分解)升温多雨,生物代谢和淋溶作用增强,分解速率加大,残体中可溶性物质(氨基酸、脂肪酸等)及可溶性和易分解的有机物通过水的溶解和冲刷作用而被淋洗掉(Davis et al., 2006),说明气候因素是控制植物残体分解的重要因素,尤其温度和湿度(郝建等,2016)。温暖和湿润的环境会提高微生物和凋落物酶活性(陈瑶等,2017),分解速率随温度和降雨的增加而增加(汪星星等,2022)。在分解后期阶段主要是生物驱动(Li et al., 2021),随着分解的进行植物残体中难分解物质和难溶物质(纤维素、木质素等)逐渐累积,微生物的降解作用在分解过程中起主导作用(Bradford et al., 2016),同时植物残体中的生物开始出逃或死亡,且环境温度降低导致微生物酶活性降低,分解速率进一步降低(代松家等,2020)。但冬季个别处树种分

解速度较快,可能是由于真菌在冬季残体分解中发挥重要作用,并能在低温下生长(Wang et al., 2013)。

### 3.3 植物残体分解速率种内种间差异

植物残体分解系数( $k$ )随空间变化因树种而异。林冠茶修剪物、光皮桦和猴樟分解整体低于地表和土壤环境,可能是由于水热因子通过对残体的淋溶作用及土壤生物活性的影响(汪星星等,2022),间接控制残体分解速率,而林冠植物残体远离土壤环境主要依靠淋溶和破碎,导致分解速率低于地表和土壤;而处于不同位置的杉木和马尾松分解系数则没有一致规律,其中原因可能是针叶树种的凋落叶在化学组成和结构不同导致其分解速率有所差异(张艳等,2016)。同一类型森林中,植物分解系数与树种本身属性有关,如不同叶特征树种分解速率排序依次为落叶树种>常绿阔叶树种>针叶树种(李媛媛等,2023)。本研究结果表明,不同空间下茶修剪物、

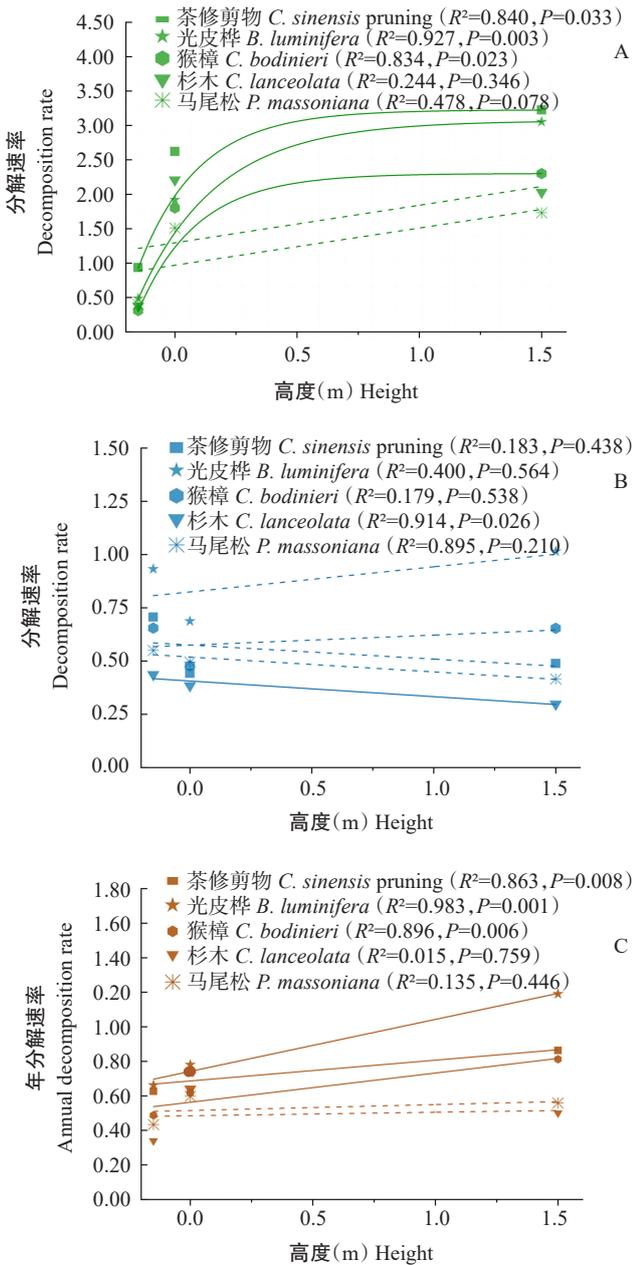


图 4 5种植物残体前期分解速率(A)、后期分解速率(B)和年分解速率(C)随空间的变化

Fig.4 Changes of decomposition rate of five plant residues in early stage(A), late stage(B) and annual(C) with space. Solid line indicated significant, dotted line indicated not significant

光皮桦和猴樟的分解速率总体上快于杉木和马尾松,可能与叶的结构特征有关(黄锦学等,2010)。即叶面积指数越大则其与地表接触的面积越大,与微生物和土壤动物的接触越密集会加速植物残体分解;叶面积指数较小可能叶片较厚角质类物质多,不利于淋溶及土壤生物的机械破碎,也不利于菌丝的入侵,从而抑制植物残体分解。因此,对于揭示茶园植物残体分解在不同空间下分解过程及相关规律,需要更多树种研究探析其分解作用机理及影响因子。

## 4 结论

地表土壤环境能提高植物残体利用效率,阔叶树种分解系数随高度降低而增大,针叶树种无显著变化;林冠年分解速率低于地表和土壤,针叶树种分解速率小于阔叶树种。空间差异对不同时期植物残体分解过程具有显著影响,且前期分解速率不能完全代表后期分解速率的种内、种间差异。适当清除林冠累积的植物残体,并将其放置于土壤和地表环境更利于其降解。

## 参考文献:

- 包剑利,殷秀琴,李晓强. 2015. 长白山牛皮杜鹃凋落物分解及土壤动物的作用[J]. 生态学报, 35(10): 3320-3328. [Bao J L, Yin X Q, Li X Q. 2015. The contribution of soil fauna to litter decomposition of *Rhododendron chrysanthum* in the Changbai Mountains[J]. Acta Ecologica Sinica, 35(10): 3320-3328.] doi: 10.5846/stxb201306271788.
- 陈婷, 郝敏, 孔范龙, 李悦, 庞立华. 2016. 枯落物分解及其影响因素[J]. 生态学杂志, 35(7): 1927-1935. [Chen T, Xi M, Kong F L, Li Y, Pang L H. 2016. A review on litter decomposition and influence factors[J]. Chinese Journal of Ecology, 35(7): 1927-1935.] doi: 10.13292/j.1000-4890.201607.001.
- 陈瑶, 邵英男, 李云红. 2017. 浅析森林凋落物分解影响因素[J]. 花卉, (8): 113-114. [Chen Y, Shao Y N, Li Y H. 2017. Analysis on influencing factors of forest litter decomposition[J]. Flowers, (8): 113-114.]
- 代松家, 段斐, 方江平, 龙春林, 周晨霓. 2020. 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, 40(3): 56-63. [Dai S J, Duan F, Fang J P, Long C L, Zhou C N. 2020. Relationship between decomposition characteristics of litters and soil nutrients in Tibetan fir forest under different habitat conditions[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 40(3): 56-63.] doi: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.03.009.
- 董学德, 高鹏, 李腾, 张佳辰, 董金伟, 许景伟, 匡兴建. 2021. 土壤微生物群落对麻栎-刺槐混交林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 41(6): 2315-2325. [Dong X D, Gao P, Li T, Zhang J C, Dong J W, Xu J W, Dun X J. 2021. Effects of soil microbial community on the litter decomposition in mixed *Quercus acutissima* Carruth and *Robinia pseudoacacia* L. forest[J]. Acta Ecologica Sinica, 41(6): 2315-2325.] doi: 10.5846/stxb202004120866.
- 郭彩虹, 杨万勤, 吴福忠, 徐振锋, 岳楷, 倪祥银, 袁吉, 杨帆, 谭波. 2018. 川西亚高山森林林窗对凋落枝早期分解的影响[J]. 植物生态学报, 42(1): 28-37. [Guo C H, Yang W Q, Wu F Z, Xu Z F, Yue K, Ni X Y, Yuan J, Yang F, Tan B. 2018. Effects of forest gap size on initial decomposition of twig litter in the subalpine forest of western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 42(1): 28-37.] doi: 10.17521/cjpe.2017.0186.

- 郝建,莫慧华,黄弼昌,周燕萍,蔡道雄. 2016. 西南桦和尾巨桉凋落叶分解及其与土壤性质的相关性[J]. 林业科学研究, 29(2): 202-208. [Hao J, Mo H H, Huang B C, Zhou Y P, Cai D X. 2016. Leaf litter decomposition and its relationship with soil properties in *Betula alnoides* and *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* [J]. Forest Research, 29(2): 202-208.] doi: 10.13275/j.cnki.lykxyj.2016.02.008.
- 黄锦学,黄李梅,林智超,陈光水. 2010. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 5(3): 56-63. [Huang J X, Huang L M, Lin Z C, Chen G S. 2010. Controlling factors of litter decomposition rate in China's forests [J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 5(3): 56-63.] doi: 10.19687/j.cnki.1673-7105.2010.03.008.
- 李雨菲,郭屹立,李先琨,李冬兴,王斌,陈婷,陆芳,向悟生,黄甫昭,刘晟源,李健星,文淑均,陆树华. 2022. 桂西南喀斯特季节性雨林凋落叶分解速率和养分含量特征分析[J]. 地球学报, 43(4): 483-490. [Li Y F, Guo Y L, Li X K, Li D X, Wang B, Chen T, Lu F, Xiang W S, Huang F Z, Liu S Y, Li J X, Wen S J, Lu S H. 2022. Analysis of the leaf litter decomposition rate and nutrient content in a karst seasonal rainforest in Southwest Guangxi [J]. Acta Geoscientica Sinica, 43(4): 483-490.] doi: 10.3975/cagsb.2022.021001.
- 李媛媛,任少华,黄宗胜,龙世林,范传华,刘海燕. 2023. 贵州喀斯特地区不同海拔常见树种枯落物分解及养分释放特征[J]. 生态学杂志, 42(6): 1316-1322. [Li Y Y, Ren S H, Huang Z S, Long S L, Fan C H, Liu H Y. 2023. Characteristics of litter decomposition and nutrient release of common tree species at different altitudes in Guizhou karst region [J]. Chinese Journal of Ecology, 42(6): 1316-1322.] doi: 10.13292/j.1000-4890.202306.013.
- 梁志伟,红梅,德海山,叶贺,张宇晨,闫瑾,李静. 2021. 氮沉降与降雨变化下中小型土壤动物对凋落物分解的影响[J]. 应用生态学报, 32(12): 4279-4288. [Liang Z W, Hong M, De H S, Ye H, Zhang Y C, Yan J, Li J. 2021. Effects of soil meso- and micro-fauna on litter decomposition under nitrogen deposition and rainfall changes [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 32(12): 4279-4288.] doi: 10.13287/j.1001-9332.202112.041.
- 单玉梅,温超,杨勇,陈迪马,白永飞,陈海军,王明玖. 2016. 内蒙古典型草原凋落物分解对不同草地利用方式的响应[J]. 生态环境学报, 25(3): 377-384. [Shan Y M, Wen C, Yang Y, Chen D M, Bai Y F, Chen H J, Wang M J. 2016. Impacts of management regimes on the litter decomposition of typical grassland community in Inner Mongolia [J]. Ecology and Environmental Sciences, 25(3): 377-384.] doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2016.03.003.
- 尚怀国,周泽宇,杨文,杜建斌,王克健,冷杨. 2022. 生态茶园内涵、模式及发展策略[J]. 华中农业大学学报, 41(5): 9-15. [Shang H G, Zhou Z Y, Yang W, Du J B, Wang K J, Leng Y. 2022. Connotation, mode and development strategy of ecological tea plantation [J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 41(5): 9-15.] doi: 10.13300/j.cnki.hnlkxb.2022.05.002.
- 吴盼盼,张艳,江灵昕,李睿,毛璐. 2023. 林分类型和分解位置对亚热带人工林凋落叶养分动态的影响[J/OL]. 生态学杂志. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/21.1148.Q.20230712.1640.020.html>. [Wu P P, Zhang Y, Jiang L X, Li R, Mao R. 2023. Effects of stand type and decomposition position on leaf litter nutrient dynamics in subtropical plantations of China [J/OL]. Chinese Journal of Ecology. <https://kns.cnki.net/kcms2/detail/21.1148.Q.20230712.1640.020.html>.]
- 汪星星,廖文海,许祖元,左晓东,范福金,曹世江. 2022. 森林凋落物分解影响因素的研究进展[J]. 北方园艺, (4): 126-132. [Wang X X, Liao W H, Xu Z Y, Zuo X D, Fan F J, Cao S J. 2022. Research progress of influencing factors affecting forest litter decomposition [J]. Northern Horticulture, (4): 126-132.] doi: 10.11937/bfy.20213631.
- 王玄,熊鑫,张慧玲,赵梦頔,胡明慧,褚国伟,孟泽,张德强. 2021. 模拟酸雨对南亚热带森林凋落物分解和土壤呼吸的影响[J]. 生态环境学报, 30(9): 1805-1813. [Wang X, Xiong X, Zhang H L, Zhao M D, Hu M H, Chu G W, Meng Z, Zhang D Q. 2021. Effects of simulated acid rain on litter decomposition and soil respiration in a low subtropical forest [J]. Ecology and Environmental Sciences, 30(9): 1805-1813.] doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2021.09.004.
- 徐波,朱忠福,李金洋,吴彦,邓贵平,吴宁,石福孙. 2016. 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, 40(9): 883-892. [Xu B, Zhu Z F, Li J Y, Wu Y, Deng G P, Wu N, Shi F S. 2016. Leaf decomposition and nutrient release of dominant species in the forest and lake in the Jiuzhaigou National Nature Reserve, China [J]. Journal of Plant Ecology, 40(9): 883-892.] doi: 10.17521/cjpe.2016.0040.
- 许策,赵玮,于秀波. 2020. 湿地植物残体分解及其影响因素研究进展[J]. 生态学杂志, 39(11): 3865-3872. [Xu C, Zhao W, Yu X B. 2020. Decomposition of wetland plant residue and its influencing factors: A review [J]. Chinese Journal of Ecology, 39(11): 3865-3872.] doi: 10.13292/j.1000-4890.202011.008.
- 谢娜,郭其强,袁刚毅,张亚琴,桂琴,罗丝琼,丁贵杰. 2023. 马尾松及其林下油茶细根分解特征[J]. 南方农业学报, 54(1): 190-199. [Xie N, Guo Q Q, Yuan G Y, Zhang Y Q, Gui Q, Luo S Q, Ding G J. 2023. Fine root decomposition characteristics of *Pinus massoniana* Lamb. and *Camellia oleifera* Abel. under *P. massoniana* forest [J]. Journal of Southern Agriculture, 54(1): 190-199.] doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2023.01.019.
- 杨曾奖,曾杰,徐大平,李尚均,卢建. 2007. 森林枯枝落叶分解及其影响因素[J]. 生态环境, (2): 649-654. [Yang Z J, Zeng J, Xu D P, Li S J, Lu J. 2007. The processes and dominant factors of forest litter decomposition: A review [J]. Ecology and Environmental Sciences, (2): 649-654.] doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2007.02.075.

- 袁亚玲,张丹桔,张艳,李勋,陈亚梅,覃宇,张健. 2018. 马尾松与阔叶树种凋落叶混合分解初期的酶活性[J]. 应用与环境生物学报, 24(3): 508-517. [Yuan Y L, Zhang D J, Zhang Y, Li X, Chen Y M, Qin Y, Zhang J. 2018. Enzyme activities in the early stage of mixed leaf litter decomposition from *Pinus massoniana* and broad-leaved tree species [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 24(3): 508-517.] doi: 10.19675/j.cnki.1006-687x.2017.08042.
- 查同刚,张志强,孙阁,王高敏,贡小琴,王伊琨,刘艳. 2012. 凋落物分解主场效应及其土壤生物驱动[J]. 生态学报, 32(24): 7991-8000. [Zha T G, Zhang Z Q, Sun G, Wang G M, Yun X Q, Wang Y K, Liu Y. 2012. Home-field advantage of litter decomposition and its soil biological driving mechanism: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 32(24): 7991-8000.] doi: 10.5846/stxb201204020461.
- 张艳,张丹桔,李勋,刘华,张明锦,杨万勤,张健. 2016. 马尾松人工林林窗边缘效应对樟和红椿凋落叶难降解物质分解的影响[J]. 应用生态学报, 27(4): 1116-1124. [Zhang Y, Zhang D J, Li X, Liu H, Zhang M J, Yang W Q, Zhang J. 2016. Edge effects of forest gap in *Pinus massoniana* plantations on the decomposition of leaf litter recalcitrant components of *Cinnamomum camphora* and *Toona ciliata* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 27(4): 1116-1124.] doi: 10.13287/j.100-9332.201604.025.
- 张悦,张艺凡,马怡波,刘嫦娥,段昌群,字玉奋,唐彬程,张维兰. 2023. 森林生态系统凋落物分解影响因素研究进展[J]. 环境生态学, 5(4): 45-56. [Zhang Y, Zhang Y F, Ma Y B, Liu C E, Duan C Q, Zi Y F, Tang B C, Zhang W L. 2023. Research progress on influencing factors of litter decomposition in forest ecosystem [J]. Environmental Ecology, 5(4): 45-56.]
- 曾锋,邱治军,许秀玉. 2010. 森林凋落物分解研究进展[J]. 生态环境学报, 19(1): 239-243. [Zeng F, Qiu Z J, Xu X Y. 2010. Review on forest litter decomposition [J]. Ecology and Environmental Sciences, 19(1): 239-243.] doi: 10.16258/j.cnki.1674-5906.2010.01.044.
- Bradford M A, Berg B, Maynard D S, Wieder W R, Woodl S A. 2016. Understanding the dominant controls on litter decomposition [J]. Journal of Ecology, 104(1): 229-238. doi: 10.1111/1365-2745.12507.
- Davis S E, Childers D L, Noe G B. 2006. The contribution of leaching to the rapid release of nutrients and carbon in the early decay of wetland vegetation [J]. Hydrobiologia, 569(1): 87-97. doi: 10.1007/s10750-006-0124-1.
- Hobara S, Osono T, Hirose D, Noro K, Hirota M, Benner R. 2014. The roles of microorganisms in litter decomposition and soil formation [J]. Biogeochemistry, 118(1/3): 471-486. doi: 10.1007/s10533-013-9912-7.
- Li R S, Guan X, Han J M, Zhang Y Z, Zhang W D, Wang J, Huang Y Q, Xu M, Chen L C, Wang S L, Yang Q P. 2021. Litter decomposition was retarded by understory removal but was unaffected by thinning in a Chinese fir [*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook] plantation [J]. Applied Soil Ecology, 163: 103968. doi: 10.1016/j.apsoil.2021.103968.
- Mao R, Wu P P, Xu J W, Wan S Z, Zhang Y. 2021. Leaf litter decomposition in the air should not be ignored in subtropical plantations of China [J]. Forest Ecology and Management, 499: 119614. doi: 10.1016/j.foreco.2021.119614.
- Penner J F, Frank D A. 2019. Litter decomposition in Yellowstone grasslands: The roles of large herbivores, litter quality, and climate [J]. Ecosystems, 22(4): 929-937. doi: 10.1007/s10021-018-0310-9.
- Trogisch S, He J S, Hector A, Scherer-Lorenzen M. 2016. Impact of species diversity, stand age and environmental factors on leaf litter decomposition in subtropical forests in China [J]. Plant and Soil, 400(1-2): 337-350. doi: 10.1007/s11104-015-2737-5.
- Wang C Y, Lü Y N, Wang L, Liu X Y, Tian X J. 2013. Insights into seasonal variation of litter decomposition and related soil degradative enzyme activities in subtropical forest in China [J]. Journal of Forestry Research, 24(4): 683-689. doi: 10.1007/s11676-013-0405-2.
- Willcock J, Magan N. 2000. Impact of environmental factors on fungal respiration and dry matter losses in wheat straw [J]. Journal of Stored Products Research, 37(1): 35-45. doi: 10.1016/S0022-474X(00)00005-9.
- Wu A M, You C M, Yin R, Xu Z F, Zhang L, Liu Y, Li H, Wang L X, Xu L, Xu H W, Hou G R, Liu S N, Tan B. 2023. Forest gaps slow the humification process of fir (*Abies faxoniana* Rehder & E.H.Wilson) twig litter during eight years of decomposition in an alpine forest [J]. Forests, 14(5): 868. doi: 10.3390/f14050868.
- Yang K, Zhu J J, Zhang W W, Zhang Q, Lu D L, Zhang Y K, Zheng X, Xu S, Wang G G. 2022. Litter decomposition and nutrient release from monospecific and mixed litters: Comparisons of litter quality, fauna and decomposition site effects [J]. The Journal of Ecology, 110(7): 1673-1686. doi: 10.1111/1365-2745.13902.
- Zhang M H, Cheng X L, Geng Q H, Shi Z, Luo Y Q, Xu X. 2019. Leaf litter traits predominantly control litter decomposition in streams worldwide [J]. Global Ecology and Biogeography, 28(9/10): 1469-1486. doi: 10.1111/geb.12966.
- Zhang X X, Wang L J, Zhou W X, Hu W, Hu J W, Hu M. 2022. Changes in litter traits induced by vegetation restoration accelerate litter decomposition in *Robinia pseudoacacia* plantations [J]. Land Degradation & Development, 33(1): 179-192. doi: 10.1002/ldr.4136.
- Zhang X Y, Wang W. 2015. Control of climate and litter quality on leaf litter decomposition in different climatic zones [J]. Journal of Plant Research, 128(5): 791-802. doi: 10.1007/s10265-015-0743-6.