高建新,兰勇,龚雨,等.亚热带次生林甜槠和拟赤杨不同分解程度叶凋落物混合分解动态研究[J].江西农业大学学报,2025,47(3):659-670.
GAO J X,LAN Y,GONG Y,et al.Dynamics of mixed leaf litter decomposition with different decomposition degrees of *Castanopsis eyrei* and *Alniphyllum fortunei* in a subtropical secondary forest[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis,2025,47(3):659-670.

亚热带次生林甜槠和拟赤杨不同分解程度叶凋落物混合分解动态研究

高建新[1],兰　勇[2],龚　雨[2],周天玲[1],赖礼萍[1],郑崇龙[1],徐定兰[1],
宋庆妮[1],杨清培[1],黄冬梅[3],刘　骏[1*]

(1.江西农业大学 林学院/国家林业与草原局鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复重点实验室,江西 南昌 330045;2.江西官山国家级自然保护区管理局,江西 宜春 336300;3.江西农业大学 人文与公共管理学院,江西 南昌 330045)

摘要:【目的】旨在探究亚热带常绿阔叶林中常绿树种与落叶树种凋落物混合分解的动态机制,揭示不同分解程度凋落物混合分解过程中的相互影响机制。【方法】采用凋落物分解袋法,在官山样地中选取甜槠(*Castanopsis eyrei*)和拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*)进行凋落叶混合分解试验,分析单独和混合分解的质量损失率以及养分变化,评价分解过程中的混合效应。【结果】在分解过程的不同阶段,分解程度不同的甜槠凋落叶,包括未分解UC_{EE}和半分解SC_{EE},均显著影响拟赤杨凋落叶(A_{FT})的分解。在分解的第45周,A_{FT}+UC_{EE}的质量残留率(70.36%)显著高于A_{FT}+SC_{EE}(55.64%),而A_{FT}+SC_{EE}的质量残留率与A_{FT}(56.01%)差异不大;A_{FT}+UC_{EE}处理的养分残留率分别为有机碳(51.84%)、全氮(89.57%)、全磷(83.85%),显著高于A_{FT}+SC_{EE}处理的有机碳(38.33%)、全氮(77.91%)、全磷(73.65%),以及单独A_{FT}处理的有机碳(43.17%)、全氮(78.58%)、全磷(72.14%)。【结论】在混合分解过程中,甜槠凋落叶对拟赤杨凋落叶的分解有一定的抑制作用,而且未分解甜槠的抑制作用更强。

关键词:亚热带常绿阔叶林;凋落物分解;甜槠;拟赤杨;混合分解
中图分类号:Q948.1　　**文献标志码:**A　　**开放科学(资源服务)标识码(OSID):**
文章编号:1000-2286(2025)03-0659-12
CSTR:32399.14.aauj.2025057

Dynamics of mixed leaf litter decomposition with different decomposition degrees of *Castanopsis eyrei* and *Alniphyllum fortunei* in a subtropical secondary forest

GAO Jianxin[1],LAN Yong[2],GONG Yu[2],ZHOU Tianling[1],LAI Liping[1],
ZHENG Chonglong[1],XU Dinglan[1],SONG Qingni[1],
YANG Qingpei[1],HUANG Dongmei[3],LIU Jun[1*]

收稿日期:2024-12-27　　**修回日期:**2025-02-15
基金项目:国家自然科学基金项目(42067050)和江西"千人计划"引进类创新领军人才长期青年项目(jxsq2020101079)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(42067050) and Jiangxi "Thousand Talents Plan" Introduction of Innovative Leading Talent Long-term Youth Project(jxsq2020101079)
作者简介:高建新,硕士生,orcid.org/0009-0009-2199-3308,gjx8201@163.com;*通信作者:刘骏,副教授,博士,主要从事于森林生态学研究,orcid.org/0000-0001-9311-1874,ljaim99@163.com。
©《江西农业大学学报》编辑部,开放获取CC BY-NC-ND协议

(1.College of Forestry, Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Forest Ecosystem Protection and Restoration of Poyang Lake Watershed, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China; 2.Jiangxi Guanshan National Nature Reserve Administration Bureau, Yichun, Jiangxi 336300, China; 3.College of Humanities and Public Administration, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: [**Objective**] This study aims to explore the dynamic mechanism of litter mixed decomposition of evergreen tree species and deciduous tree species in subtropical evergreen broad-leaved forest, thus revealing the interaction between the mixed decomposition process of litter with different decomposition degrees. [**Method**] This study used the method of litter decomposition bags and selected the *Castanopsis eyeri* and the *Alniphyllum fortunei* from the Guanshan sample plot to analyze the mass loss rate and nutrient changes of individual and mixed decomposition, and evaluate the mixing effect during the decomposition process. [**Result**] Firstly, at the different stages of the decomposition process, the decomposition of *Pseudoalder aldermatus* (AFT) was significantly affected by the different degrees of decomposition, including undercomposed UCEE and semi-decomposed SCEE. Secondly, at the 45th week of decomposition, the mass residue rate of AFT UCEE (70.36%) was significantly higher than that of AFT SCEE (55.64%), while the mass residue rate of AFT SCEE was not significantly different from that of AFT SCEE (56.01%). The nutrient residue rates of organic carbon (51.84%), total nitrogen (89.57%) and total phosphorus (83.85%) were significantly higher than those of organic carbon (38.33%), total nitrogen (77.91%) and total phosphorus (73.65%) treated by AFT SCEE, respectively, and organic carbon (43.17%), total nitrogen (78.58%) and total phosphorus (72.14%) treated with AFT alone. [**Conclusion**] In the process of mixed decomposition, the leaf litter of the *Castanopsis eyeri* had a certain inhibitory effect on the decomposition of the leaf litter of the *Alniphyllum fortunei*, and the inhibition effect of undecomposed *Castanopsis eyeri* was stronger.

Keywords: subtropical evergreen broad-leaved forest; litter decomposition; *Castanopsis eyeri*; *Alniphyllum fortunei*; mixed decomposition

【研究意义】凋落物是生态系统中由植物产生并归还于地表,用以维持生态系统功能稳定的有机质总称[1-2]。生态系统物种丰富度高,地表凋落物常以混合物形式存在,因此凋落物分解常是多物种混合分解而不是单物种分解[3-4]。亚热带常绿阔叶林是我国重要的林业资源,由于历史上遭受过破坏,我国亚热带主要是以次生常绿阔叶林为主[5-6]。在恢复早期主要以落叶阔叶林为主,随着生态逐渐恢复,常绿阔叶树种逐渐出现;在恢复中后期主要以常绿阔叶树为优势种,但其中也存留一些较大的落叶阔叶树种[7-8]。由于常绿树种与落叶树种的物候节律显著不同,不同物候树种共存能够形成不同分解程度的凋落物混合状态,使其分解过程变得复杂难测;不同分解程度凋落物混合分解可以改变其分解速率,影响养分释放,从而对微生物多样性以及生态系统养分循环产生影响[3,9]。【前人研究进展】当前凋落物混合分解研究集中于不同物种新鲜凋落物间的混合分解,极少从不同分解程度凋落物混合分解角度进行研究,从而无法准确解析叶凋落物的混合分解机制,研究不同物候树种的混合凋落物分解具有一定的现实意义[10-12]。

【本研究切入点】在亚热带常绿阔叶林中进行混合凋落物分解的研究时,不能直接混合凋落物,而应根据植物凋落节律,混合不同分解状态的凋落物。【拟解决的关键问题】研究在官山森林大样地中选取常绿优势种-甜槠(*Castanopsis eyrei*)和落叶优势种-拟赤杨(*Alniphyllum fortunei*),进行混合分解试验,揭示2种不同节律的物种间凋落物混合分解的机制,有助于客观准确地了解亚热带森林生态系统中凋落物分解、养分和物质循环的规律[13]。本研究成果可为亚热带森林生态系统养分循环研究提供基础数据支持,同时,亦可为森林资源保护、恢复及经营管理提供理论参考。

1 研究区概况

江西官山国家级自然保护区,位于九岭山脉的西段,横跨宜春市的铜鼓县和宜丰县交界区域。地理坐标为28°30′~28°40′N,114°29′~114°45′E,海拔200~1 480 m[14]。属中亚热带温暖湿润气候,日照充足,

无霜期较长,年均气温 16.2 ℃,年平均降水量为 1 950~2 100 mm,地带性土壤为红壤,官山保护区因其独特的地形地貌、生态环境和地理位置,现在生长着极为丰富的木本植物和独具特色的野生动植物种群[15-16]。官山作为国家级自然保护区,一直以来都受到国家、政府以及生态保护相关领域部门的重视,以促进其生态环境的保护、恢复和发展,造就了现在较为完善的森林生态系统,其中就包括拥有一个演替末期的常绿阔叶林,成为我国中亚热带森林生态系统的一个典型代表[17]。

2　研究方法

2.1　样地设置及样品处理

样地情况见表 1,凋落叶混合处理方式见表 2。

表 1　试验样地基本信息

Tab.1　Basic information of the test plot

基本信息 Basic information	林分 Ⅰ Stand type Ⅰ		林分 II Stand type II	
主要物种 Major species	甜槠,马尾松,木荷,赤楠,山杜英,等 *Castanopsis eyrei*, *Pinus massoniana*, *Schima superba*, *Syzygium buxifolium*, *Elaeocarpus sylvestris*, et al		拟赤杨,杉木,毛竹,虎皮楠,山矾,等 *Alniphyllum fortunei*, *Cunninghamia lanceolata*, *Phyllostachys edulis*, *Daphniphyllum oldhamii*, *Symplocos sumuntia*, et al	
试验点 Experimental point	1	2	3	4
坡度/(°) Gradient	8	10	8	10
坡位 Slope location	上	上	下	下
坡向 Slope direction	西南坡	东南坡	西南坡	东南坡
海拔/m Elevation	551.5~556.8	555.2~560.4	536.8~540.2	531.1~537.2

2017 年 11 月采集新鲜的拟赤杨凋落叶(未分解)、新鲜的和已分解一半的甜槠凋落叶(未分解、半分解),以自然风干的拟赤杨凋落叶(A_{FT})作为混合试验的组分 1;将未分解和半分解的甜槠凋落叶分别进行 2 种处理:自然风干(UNC_{EE}、SNC_{EE})和高温干热灭菌[18](UHC_{EE}、SHC_{EE}),作为混合试验的组分 2。同时测算各处理中的凋落叶含水率。由于试验进行时,可采集到的甜槠凋落叶较少,故将拟赤杨与甜槠凋落叶按 4∶1 的比例进行混合,每个混合组初始质量为 20 g,即拟赤杨 16 g、甜槠 4 g(混合处理方式见表 2);将甜槠林与拟赤杨林作为分解试验的 2 个样点。

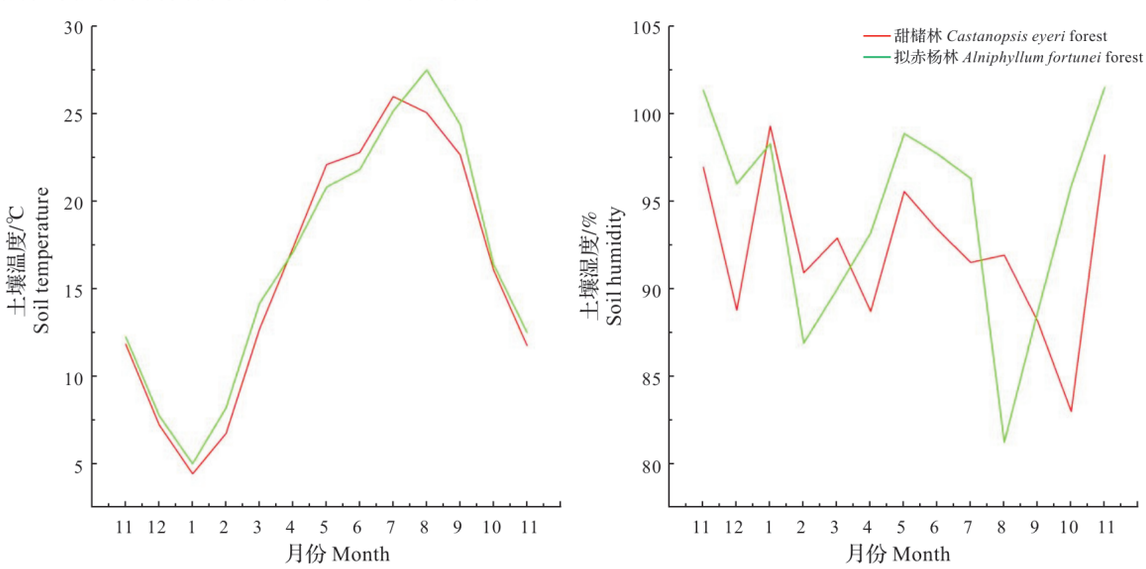


图 1　土壤温度及湿度变化曲线

Fig.1　Variation curve of soil temperature and humidity

将经过上述处理的混合凋落物直接装入白色聚酯网材料制备的凋落物分解袋(孔径 1 mm,尺寸为 20 cm×25 cm),分解袋放置于野外林地中与土壤表面直接接触,每隔 2 月取分解袋回实验室,每次每个处理随机取样 6 个重复,分解至 2018 年 11 月。2017 年 11 月—2018 年 11 月的土壤温度及湿度见图 1。

在室内环境下,对回收的分解袋中的凋落物进行物种分类处理,将混合凋落物中的非目标物质如泥土等杂质剔除。随后,将样品置于恒温烘箱内,温度设置为 65 ℃,烘干至恒重状态下称重,用于计算其质量残留率。之后,将植物凋落叶样品研磨并通过 100 目筛网筛选,用于后续化学分析。

表 2 混合分解试验处理

Tab.2 Experimental treatment of mixed decomposition

起始时间 Start time		2017 年 11 月				
混合处理 Mixed treatment		AFT+UHCEE	AFT+UNCE	AFT+SNCEE	AFT+SHCEE	AFT
组份 1 Component 1		AFT 16 g	AFT 16 g	AFT 16 g	AFT 16 g	AFT 20 g
组份 2 Component 2		CEE 4 g	CEE 4 g	CEE 4 g	CEE 4 g	–
组份 2 实验处理 Component 2 processing mode	分解状态 Explode State(U/S)	U	U	S	S	–
	温度处理 Temperature(N/H)	H	N	N	H	–

U:未分解凋落物;S:半分解凋落物;N:自然风干;H:165 ℃高温处理;CEE:甜槠;AFT:拟赤杨。

U: Undecomposed litter; S: Semi-decomposed litter; N: Natural air-drying; H: High temperature treatment; CEE: *Castanopsis eyeri*; AFT: *Alniphyllum fortunei*.

2.2 室内分析

采用重铬酸钾容量法测定有机碳(OC);凯氏定氮法测定全氮(TN)含量;浓硫酸消煮法测定全磷含量(TP),具体操作步骤可参阅《土壤农业化学分析》[19]。

2.3 数据处理与分析

2.3.1 分解计算

(1)质量残留率[20]:

$$W_t = \frac{M_t}{M_0} \times 100\% \tag{1}$$

式(1)中:M_0为凋落物初始干重,g;M_t为分解 t 时间的剩余干重,g。

(2)Olson 非线性指数方程[21]:

$$y=\frac{M_t}{M_0} = ae^{-kt} \tag{2}$$

式(2)中:t 为分解时间,a;a 为修正系数;k 为分解常数。

(3)凋落物分解 50% 和 95% 所用时间[22]:

$$T_{0.5}(\mathrm{a}) = \frac{0.693}{\mathrm{k}} \tag{3}$$

$$T_{0.95}(\mathrm{a}) = \frac{3}{\mathrm{k}} \tag{4}$$

(4)养分残留率[22]:

$$Q_t = \frac{(C_t \times M_t)}{(C_0 \times M_0)} \times 100\% \tag{5}$$

式(5)中:C_0为凋落物初始养分含量,g/kg;C_t为分解 t 时间的养分含量,g/kg;M_0为凋落物初始净干重,g;M_t为凋落物分解 t 时间的残留干重,g。

2.3.2 统计分析

本研究的数据处理主要利用 SPSS 26 及 Excel 2019 进行统计分析。采用单因素方差分析法,对不同混合处理下的凋落物的养分含量、质量残留率和养分残留率进行显著性检验(P<0.05);探究混合处理对凋落物养分含量及其化学计量比的影响,本研究采用一般线性模型多因素方差分析法;利用 Excel 2019 和 Origin 2022 软件对数据结果进行制图。

3　结果与分析

3.1　凋落物的初始化学特征

在未分解状态的凋落物中,拟赤杨凋落叶的碳(C)、氮(N)、磷(P)含量显著高于甜槠,其化学计量比则显著低于后者;相较于未分解的凋落叶,半分解凋落叶的氮(N)含量、磷(P)含量以及氮/磷(N/P)比率显著更高,而碳(C)含量、碳/磷(C/P)比率和碳/氮(C/N)比率则相对更低。此外,高温灭菌处理对凋落物养分含量的影响相对较小(表3)。

表3　混合分解凋落物的初始化学组成

Tab.3　Initial chemical composition of litter

类型Type	UNAFT	UHCEE	UNCEE	SHCEE	SNCEE
C(g·kg^{-1})	430.84±2.65^{a}	420.66±5.17^{a}	422.77±0.14^{a}	351.26±10.77^{b}	353.88±6.19^{b}
P(g·kg^{-1})	0.68±0.01^{a}	0.41±0.02^{ab}	0.41±0.01^{ab}	0.39±0^{c}	0.45±0.03^{ab}
N(g·kg^{-1})	14.9±0.31^{c}	15.14±0.11^{c}	13.11±0.05^{d}	16.21±0.64^{b}	17.66±0.25^{a}
C/N	28.94±0.76^{b}	27.79±0.15^{c}	32.25±0.11^{a}	21.68±0.20^{d}	20.04±0.07^{e}
N/P	21.86±0.76^{d}	37.00±1.93^{bc}	31.98±0.53^{c}	41.24±1.68^{ab}	39.52±3.45^{ab}
C/P	632.21±5.22^{c}	1 028.59±59.02^{a}	1 031.54±20.43^{a}	893.68±28.19^{b}	792.29±72.16^{b}

CEE:甜槠;AFT:拟赤杨;U:未分解凋落物;S:半分解状态凋落物;H:165 ℃高温干热灭菌处理;N:自然风干处理。每一列的数字上标字母abc表示各实验处理之间存在显著性差异(P<0.05),数据表示为平均值±标准误差(n=6)。

Castanopsis eyrei; AFT: *Alniphyllum fortunei*; U: Undecomposed litter; S: Semi-decomposed litter; H: 165 ℃ high temperature dry heat sterilization treatment; N: Natural air-drying process.The superscript letters abc above the numbers in each column indicate significant differences among the experimental treatments(P<0.05), Data are presented as mean ± standard error(n=6).

3.2　混合分解对拟赤杨凋落叶分解的影响

3.2.1　拟赤杨凋落叶质量及养分残留率

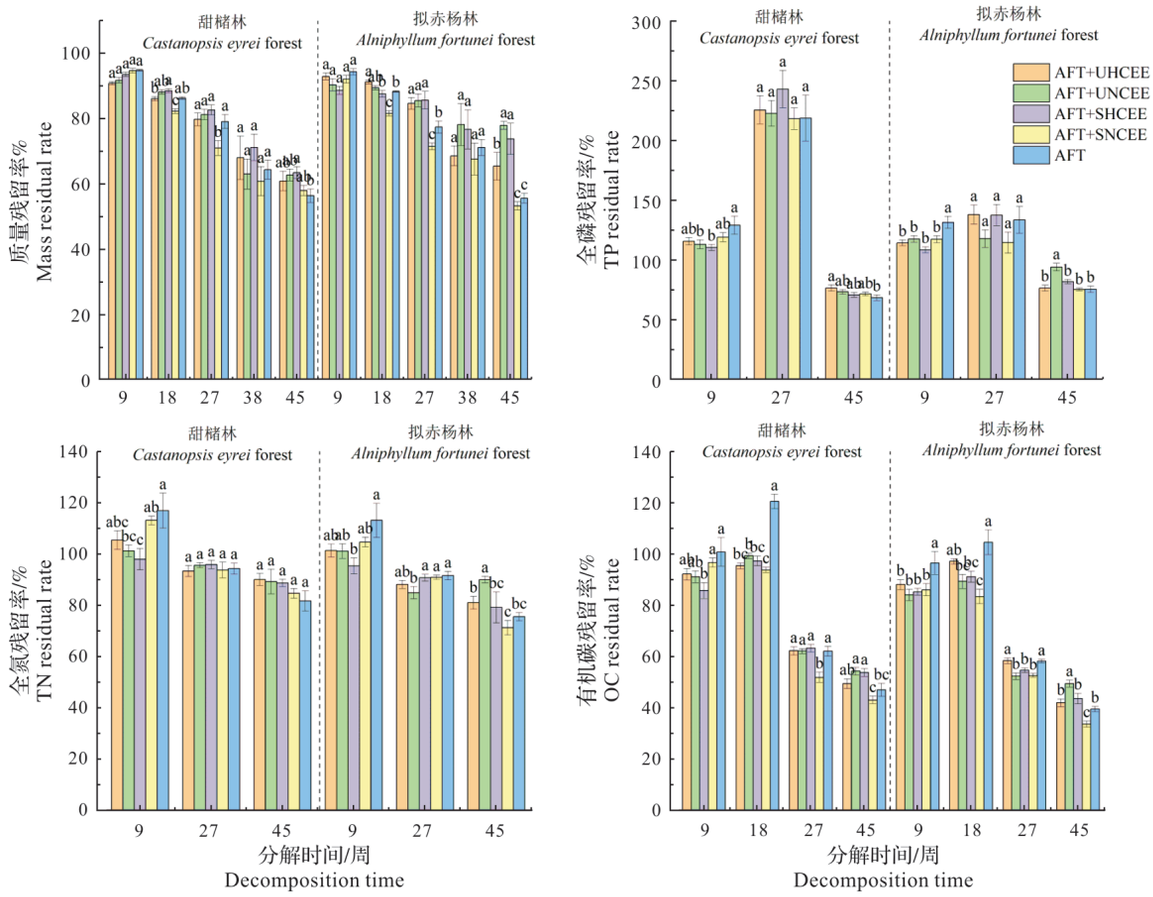
在整个分解阶段,各处理的质量残留率总体呈下降趋势,各处理总体上表现为C、N、P的净释放过程,总体上C的释放格局为慢-快-慢,在2种林分中,AFT的P释放情况存在极显著差异。

在甜槠林中,与未分解甜槠混合处理的拟赤杨质量残留率与其单独分解的质量残留率无显著差异。分解中期,AFT+SNC的质量残留率为82.31%,低于AFT(86.31%),AFT+SUC的质量残留率为88.22%高于AFT。分解后期,各混合处理的质量残留率均高于AFT(56.39%)。在分解的第18周,AFT发生了C的固持作用,此时混合处理的C残留率显著低于AFT;在分解的45周,AFT+UNC的C净释放率为45.73%,显著低于AFT(71.52%),SCEE对拟赤杨C释放没有显著影响。分解的第9周,各处理均表现为N的固持作用,其中AFT的N固持作用最为显著,UCEE对AFT的N固持作用没有显著影响。各处理总体上表现出P先固持后释放的特征,其中AFT+UNC、AFT+SNC与AFT没有显著差异。

在拟赤杨林中,分解中期A_{FT}+SNC的质量残留率为71.52%低于A_{FT}(77.45%),A_{FT}+SHC的质量残留率(85.69%)高于A_{FT};在分解后期,A_{FT}+UNC的质量残留率(78.21%、77.96%)显著高于A_{FT}(77.45%、71.18%),而A_{FT}+UHC的质量残留率(68.61%)显著低于A_{FT}(71.18%)。分解的第45周,A_{FT}+UNC的C净释放率为50.60%显著低于A_{FT}(60.56%),而A_{FT}+SNC的C净释放率为66.38%显著高于其余各处理,而高温处理后对A_{FT}均无显著影响(图2)。分解的第9周,混合处理对A_{FT}均表现为N的固持作用,与A_{FT}单独分解没有显著差异;在分解的45周,A_{FT}+UNC的N释放率为10.04%显著低于A_{FT}(24.49%),A_{FT}+SNC的N释放率为28.79%大于A_{FT}(24.49%)。在分解的第9周,A_{FT}的P净固持率为31.56%,显著大于A_{FT}+UNC(17.65%)和A_{FT}+SNC(17.43%),而在分解的45周,A_{FT}+UNC的P净释放率为5.79%显著低于A_{FT}(24.30%),A_{FT}+SNC的P净释放率为24.49%与A_{FT}(24.30%)没有显著差异。

3.2.2　拟赤杨凋落叶分解过程中养分含量的动态变化特征研究

拟赤杨凋落叶在分解过程中,其有机碳含量变化特征大致为:先上升后下降(图3a)。在分解的第18周,A_{FT}+SNC的C含量为491.12 g/kg,显著高于A_{FT}(460.94 g/kg),但高温处理后没有出现该差异;在分解的45周,A_{FT}+SNC的C含量为319.70 g/kg,显著低于A_{FT}(359.95 g/kg),高温处理后也没有出现这种差异。



每一列的数字上标字母 abc 表示各实验处理之间存在显著性差异(P<0.05)。

The superscript letters abc above the numbers in each column indicate significant differences among the experimental treatments(P<0.05).

图 2 不同混合处理对拟赤杨凋落叶质量残留率及养分残留率的影响

Fig.2 Effects of different mixed treatments on mass and nutrient residual rates of leaf litter of *Alniphyllum fortunei*

UC_{EE}对 A_{FT}的 N 含量在整个分解阶段均无显著影响,而在分解的 27 周,A_{FT}+SNC 的 N 含量为 18.89 g/kg,显著高于 A_{FT}(17.79 g/kg),但经高温处理后未出现该影响。由图 3a 可见,总体上各混合处理对拟赤杨凋落叶的 N 含量和 P 含量均没有显著影响。

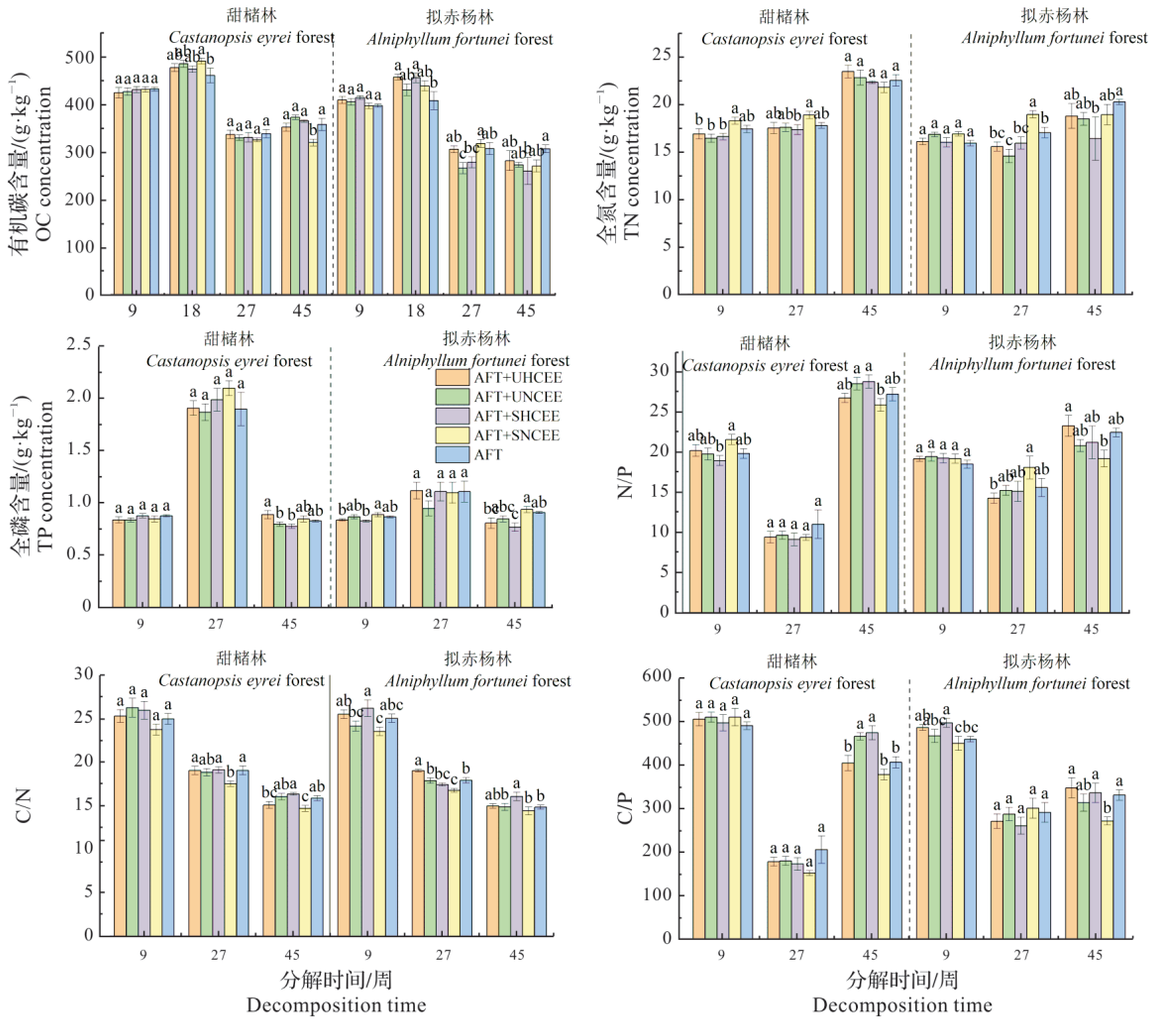
然而,拟赤杨凋落叶在整个分解阶段中,其 C/N 变化特征为:逐渐降低(图 1.4b)。在 2 种林分类型中,未分解状态的甜槠凋落叶对拟赤杨的分解产生未显著的效应;而在分解的中期阶段,半分解状态的甜槠凋落叶对拟赤杨凋落叶的碳氮比(C/N)产生了降低作用,然而,经过高温处理后,该效应不复存在。

在甜槠林中,未分解甜槠凋落叶增大了拟赤杨的 C/P,而在拟赤杨林中,未分解甜槠对拟赤杨的 C/P 没有显著影响。在 2 种林分中,半分解甜槠凋落叶减小了拟赤杨凋落叶的 C/P,但 2 种林分中该减小效果没有显著差异。根据图表分析,在 2 种林分环境下,不同分解阶段的甜槠凋落叶在分解过程中对拟赤杨的氮磷比(N/P)未产生显著性影响。

3.2.3 拟赤杨凋落叶混合分解速率模型

本研究采用 Olson 衰减指数模型,对不同处理条件下拟赤杨的质量残留率及分解时间进行拟合分析,发现在本研究中拟赤杨单独分解的 k 值最大,未分解状态的甜槠处理组表现出最低的分解速率常数 k 值(表 4)。由此推断,甜槠凋落叶与拟赤杨凋落叶的混合分解过程会受到抑制,且未分解的甜槠凋落叶对拟赤杨凋落叶分解的抑制效应更为显著。

不同处理条件下,对比各实验处理的拟赤杨凋落叶的分解状态达到 50% 和 95% 所需的时间,研究发现:与未分解甜槠混合处理下,拟赤杨凋落叶分解达到这 2 个状态的时间分别为 1.04~1.79 a 和 4.52~7.75 a;与半分解甜槠混合处理下,拟赤杨凋落叶分解达到这 2 个状态的时间分别为 0.98~1.15 a 和 4.26~4.99 a;而拟



每一列的数字上标字母 abc 表示各实验处理之间存在显著性差异(P<0.05)。

The superscript letters abc above the numbers in each column indicate significant differences among the experimental treatments(P<0.05).

图 3　不同处理下拟赤杨凋落叶养分含量及化学计量比变化特征

Fig.3　Characteristics of nutrient content and stoichiometric ratio of *Alniphyllum fortunei* under different treatments

赤杨凋落叶单独分解达到这 2 个状态所需时间分别为 0.99~1.07 a 和 4.29~4.62 a。由此可见,与未分解甜槠混合处理下的拟赤杨分解速度最慢。

表 4　不同混合处理的拟赤杨凋落叶分解 Olson 模型

Tab.4　Olson model of leaf litter decomposition of *Alniphyllum fortunei* with different mixed treatments

林分类型 Forest stand	$T_{0.5}$ (a)	$T_{0.95}$ (a)	R^2	k	Olson 模 Olson model	混合方式 Mixed mode
甜槠林	1.04	4.52	0.753	0.664	y=107.14e$^{-0.664t}$	A_{FT}+UNC_{EE}
Castanopsis eyrei forest	1.09	4.74	0.733	0.633	y=105.62e$^{-0.633t}$	A_{FT}+UHC_{EE}
	0.98	4.26	0.728	0.704	y=101.81e$^{-0.704t}$	A_{FT}+SNC_{EE}
	1.37	5.92	0.810	0.507	y=103.17e$^{-0.507t}$	A_{FT}+SHC_{EE}
	0.99	4.29	0.845	0.699	y=108.84e$^{-0.699t}$	A_{FT}
拟赤杨林	1.79	7.75	0.588	0.387	y=100.16e$^{-0.387t}$	A_{FT}+UNC_{EE}
Alniphyllum fortunei forset	1.24	5.35	0.617	0.561	y=105.87e$^{-0.561t}$	A_{FT} +UHC_{EE}
	1.15	4.99	0.656	0.601	y=98.81e$^{-0.601t}$	A_{FT} +SNC_{EE}
	1.42	6.15	0.571	0.488	y=103.20e$^{-0.488t}$	A_{FT} +SHC_{EE}
	1.07	4.62	0.798	0.650	y=108.88e$^{-0.650t}$	A_{FT}

3.2.4 不同混合处理凋落叶分解动态比较

在第55周的分解试验中，由于混合处理中的凋落叶难以精确区分不同物种，故本研究将该时间段内的凋落物混合分解进行了一个整体的分解动态分析，详见表5。在凋落物混合分解至第55周时，A_{FT}的全氮(N)残留率、质量残留率和全磷(P)残留率的值相比其他混合处理，均显著低于其他混合处理，而其他混合处理之间的差异并不显著；A_{FT}+SHC_{EE}的碳(C)残留率显著高于其他处理，而拟赤杨凋落物单独分解与混合处理的碳(C)残留率没有显著差异。

表5 第55周混合分解处理质量与养分残留率对比分析

Tab.5 Comparative analysis of mixed decomposition treatment quality and nutrient residue rate at week 55

混合处理 Mixed treatment	A_{FT}+UNC_{EE}	A_{FT}+UHC_{EE}	A_{FT}+SNC_{EE}	A_{FT}+SHC_{EE}	A_{FT}
C残留率/% C residual rate	44.87±0.56^{b}	43.43±11.78^{b}	45.54±0.40^{b}	50.51±0.02^{a}	41.31±14.44^{b}
P残留率/% P residual rate	109.17±0.59^{a}	100.49±7.11^{a}	107.58±0.37^{a}	105.59±0.02^{a}	75.92±12.24^{b}
N残留率/% N residual rate	91.80±0.61^{b}	96.54±8.07^{ab}	95.23±0.50^{ab}	99.91±0.02^{a}	83.57±13.93^{c}
质量残留率/% Mass residual rate	63.42±0.070^{a}	63.49±10.39^{a}	62.50±0.32^{a}	67.19±0.03^{a}	57.11±19.45^{b}

不同字母表示各处理间存在显著差异，P<0.05。

Different letters indicate significant differences among treatments at the 0.05 probability level.

所有处理的结果均表现出碳(C)和氮(N)的净释放，然而，各种混合处理下的结果则表现出磷(P)的净固持的现象，单独分解的拟赤杨凋落叶则表现为磷(P)的净释放。至分解的第55周，各处理下的凋落叶的养分含量未见显著差异，如表6所示。因此，混合处理降低了凋落物整体的分解速率和养分释放速率。

表6 凋落叶混合分解至第55周的养分及化学计量比

Tab.6 Nutrient and stoichiometric ratios of litter mixed decomposition to week 55

类型 Type	A_{FT}+UNCEE	A_{FT}+UHC_{EE}	A_{FT}+SNCEE	A_{FT}+SHCEE	AFT
C含量/(g·kg^{-1}) C content	310.15±11.66	287.8±10.39	317.35±7.10	311.64±8.08	309.56±13.26
P含量/(g·kg^{-1}) P content	0.86±0.02	0.85±0.04	0.88±0.22	0.82±0.05	0.87±0.03
N含量/(g·kg^{-1}) N content	21.45±0.55	20.50±0.07	20.95±0.60	20.54±0.61	21.22±0.77
C/N	14.78±0.39	14.89±0.33	15.00±0.37	15.65±0.51	14.64±0.44
N/P	24.98±0.80	24.45±1.34	24.40±0.87	25.42±0.81	24.68±1.01
C/P	359.99±14.44	354.03±19.45	363.93±12.24	381.70±13.93	357.24±18.95

第55周混合分解处理间凋落叶的养分含量及化学计量比均没有出现显著性差异，P<0.05。

There were no significant differences in nutrient content and stoichiometric ratios of leaf litter among mixed decomposition treatments during the 55th week, P<0.05.

4 讨 论

4.1 甜槠对拟赤杨凋落叶分解速率的影响

在森林生态系统凋落物混合分解的过程中，协同效应和拮抗效应交互作用[23]。Wardle等[24]研究多物种凋落物混合分解发现当混合凋落物中存在某种凋落物的含有较高的氮元素时，会加快混合分解速率。本研究发现，与未分解的凋落叶相比，2个物种半分解的凋落叶均表现出更高的N含量，更低的C含量和C/N比。通过比较各处理凋落叶分解50%及95%所需的时间，发现与半分解甜槠混合处理的分解速率高于与未分解甜槠混合处理的分解速率。这是因为含氮量较高的凋落物分解过程中产生的氨等营养物

质,可以促进其他凋落物的分解;含氮量较高的凋落物分解过程中产生的微生物群体,也可能对其他凋落物的分解产生促进作用。

分解系数k值常被用来衡量凋落物分解的快慢,k值越大凋落物分解速率越快[25]。在甜槠林中,与未分解的甜槠混合处理的k值低于其他处理方式;而在拟赤杨林中,与未分解的甜槠混合处理的k值是所有处理中最小的。由此可见,与甜槠进行混合处理会对拟赤杨分解有抑制作用,并且未分解状态的甜槠凋落叶抑制作用更强。

在自然生态系统中,凋落物混合分解大多表现为非加和效应,其中协同效应比拮抗效应更为普遍,不同凋落物之间的质量差异是发生混合效应的重要原因[26]。本研究发现与不同分解程度的甜槠凋落叶混合处理会减慢拟赤杨的分解速率,这一现象的发生可能是因为不同分解程度的凋落叶之间的养分含量存在一定差异。在分解的0~18周,各处理的拟赤杨质量残留率逐渐降低,养分释放率逐渐增大,由于半分解状态的凋落叶N含量较高且和C/N较低,所以其分解不受养分限制[27],表现为协同效应;在分解后期,大量难分解的物质积累,导致可利用的养分含量很低,微生物之间竞争养分,此时表现出拮抗效应,且这种拮抗作用在与未分解状态的甜槠凋落叶的混合处理下表现得更明显。

4.2　甜槠对拟赤杨凋落叶分解养分动态的影响

凋落物分解不仅可以调节土壤有机物的组成,还是生物地球化学循环的重要组成部分[19-20],凋落物分解受自身质地、环境因子及分解者的影响[28-30]。有研究[31-32]发现凋落物初始养分含量越高,C/N越低越容易被微生物分解,其分解速率更快。本研究表明,与未分解状态凋落叶的养分含量相比,半分解状态的凋落叶有更低的C/N比。在分解的第27周,A_{FT}+SNC_{EE}的质量残留率为71.01%显著低于A_{FT}(79.13%),由此可见与半分解状态的甜槠凋落叶混合处理,拟赤杨的分解速率会更快。

在凋落物的分解过程中,养分迁移模式主要表现为“富集-释放”、“淋溶-释放”和“淋溶-富集-释放”这三种机制[25]。在本研究中,各处理中拟赤杨凋落叶的C元素总体上呈现出淋溶-释放模式,这与他人的研究结果类似[33-35]。经过与不同分解阶段的甜槠凋落叶混合处理,拟赤杨凋落叶的氮(N)和磷(P)释放率的大致趋势表现为:先降低,然后再升高,故氮和磷的养分释放动态的模式是:先富集后释放,这与王海霞等[36]的研究结果一致。

C/N是衡量凋落物质量的一个重要指标[37]。有研究[38]表明,当凋落物的C/N>25时,微生物会从土壤中获取养分用以维持自身生长活动,从而发生N的固持作用;本研究中在分解的第9周,各处理的C/N均大于25,N的剩余率也大于100%,表现为N的固持作用。在整个分解过程中,各处理的C/N值总体上均呈现出逐渐下降的趋势,且随着分解时间的增加,各处理的N含量总体表现为净积累过程。在分解的第27周,A_{FT}+SNC_{EE}的N含量为18.89 g/kg,显著高于A_{FT}(17.79 g/kg),而A_{FT}+UNC_{EE}的N含量(17.60 g/kg)与A_{FT}没有显著差异,出现该现象可能是由于凋落物的分解程度差异和微生物活动所引起的[39]。

路文杰等[27]的研究发现,不同分解程度的凋落物混合后分解,可以加快C的释放速率并减慢N的富集速率。本研究表明未分解甜槠对拟赤杨C含量没有显著影响,而半分解甜槠在总体上降低了拟赤杨C含量;综合分析表明,不同混合处理对拟赤杨凋落叶的氮素(N)和磷素(P)含量未表现出显著性差异。相较于拟赤杨凋落叶单独分解,未经分解的甜槠凋落叶会显著降低了拟赤杨凋落叶分解过程中有机碳和氮素的释放速率,而半分解状态的甜槠凋落叶会显著促进拟赤杨凋落叶的有机碳的释放,但对氮素(N)的释放无显著作用。这一现象主要归因于凋落物较低的碳氮比(C/N)更有利于微生物的代谢活动[23]。

Kubartová等[40]在法国南部的温带森林里开展了一项关于凋落物分解与真菌多样性的研究,研究发现:在分解后期,相较于山毛榉和云杉凋落物单独分解,这2种凋落叶混合分解条件下的真菌丰富度更高;此外,凋落物混合分解的速率也明显大于单独分解,这表明凋落物处于半分解状态时,微生物的种类和数量均超过了未分解的凋落物。本研究进一步揭示,在拟赤杨凋落叶的整个分解过程中,新鲜的甜槠凋落叶对其分解具有抑制效应,即便在经过165 ℃的高温处理后,这种抑制作用依然存在,这说明在分解过程中微生物并未发挥预期的作用。在分解过程中,半分解态的甜槠凋落叶对拟赤杨的分解表现出显著的促进效应。然而,经过高温处理后,这种效应转变为显著的抑制作用。可见半分解状态的甜槠凋落叶为未分解的拟赤杨凋落叶提供了更多的微生物来源、更好的分解条件,从而加快其分解。

5 结 论

在混合分解过程中，甜槠凋落叶对拟赤杨凋落叶的分解表现出一定的抑制效应，尤其是未分解状态的甜槠凋落叶，其对拟赤杨凋落叶的分解有很大的抑制作用，这种抑制作用明显减缓了拟赤杨凋落叶在分解过程中养分的释放。这一结果表明甜槠与拟赤杨共存时，甜槠凋落叶的分解会对拟赤杨凋落叶的分解产生一定的抑制作用，这种抑制作用可能影响拟赤杨在生态系统中的生长竞争地位，进一步影响整个生态系统的结构和功能。甜槠与拟赤杨凋落叶混合分解的混合效应对亚热带森林凋落物的养分调控具有重要意义，也可为生态系统养分循环、生物多样性研究和森林资源保护管理与利用提供基础资料和参考。

参考文献 References：

[1] 李宜浓，周晓梅，张乃莉，等.陆地生态系统混合凋落物分解研究进展[J].生态学报，2016，36(16)：4977-4987.
LI Y N，ZHOU X M，ZHANG N L，et al.The research of mixed litter effects on litter decomposition in terrestrial ecosystems [J].Acta ecologica Sinica，2016，36(16)：4977-4987.

[2] 周庭宇，肖洋，黄庆阳，等.森林凋落物分解的研究进展与展望[J].中国农学通报，2022(33)：44-51.
ZHOU T Y，XIAO Y，HUANG Q Y，et al.Forest litter decomposition：research progress and prospect[J].Chinese agricultural science bulletin，2022(33)：44-51.

[3] 鲁昱，崔莎莎，李文洋，等.三种常见挺水植物凋落物的分解动态及养分释放规律[J].植物科学学报，2023，41(1)：17-25.
LU Y，CUI S S，LI W Y，et al.Dynamic characteristics of litter decomposition and nutrient release of three common emergent plants[J].Plant science journal，2023，41(1)：17-25

[4] 李勋，张艳，覃宇，等.马尾松与乡土阔叶树种凋落叶木质素降解的混合效应[J].热带亚热带植物学报，2022，30(1)：19-30.
LI X，ZHANG Y，QIN Y，et al.Mixed effects on lignin degradation in the litter leaves of *Pinus massoniana* and native broad-leaved tree species[J].Journal of tropical and subtropical botany，2022，30(1)：19-30.

[5] 曾小霞.亚热带常绿阔叶林主要树种对邻体干扰的响应差异[D].南昌：江西农业大学，2020.
ZENG X X.Differences in response of main tree species to neighbor disturbance in subtropical evergreen broad-leaved forest [D].Nanchang：Jiangxi Agricultural University，2020.

[6] 王倩，易伶俐，陈琳，等.江西官山亚热带次生常绿阔叶林物种组成与群落结构特征[J].生物灾害科学，2022，45(2)：199-209.
WANG Q，YI L L，CHEN L，et al.Species composition and community structures of subtropical evergreen broad-leaved forests in Guanshan，Jiangxi Province，China[J].Biological disaster science，202，45(2)：199-209.

[7] 朱华，ASHTON peter .中国热带-亚热带常绿阔叶林群落交错区[J].科学通报，2021，66(增刊2)：3732-3743.
ZHU H，ASHTON P.Ecotones in the tropical-subtropical vegetation transition at the tropical margin of southern China[J].Chinese science bulletin，2021，66(Sup 2)：3732-3743，

[8] 陈恩健，周婷，彭少麟，等.亚热带常绿阔叶林植被[J].森林与人类，2023(7)：56-61.
CHEN E J，ZHOU T，PENG S L，et al.Vegetation of subtropical evergreen broad-leaved forest[J].Forest & humankind，2023 (7)：56-61.

[9] 徐志霞，张雅倩，陶月，等.不同分解程度木麻黄凋落物的养分特征及微生物功能多样性分析[J].南京林业大学学报(自然科学版)：2020，44(2)：197-205.
XU Z X，ZHANG Y Q，TAO Y，et al.Nutrient composition of litters and functional diversity of different microorganisms in various decomposition stages of *Casuarina equisetifolia* plantations[J].Journal of Nanjing forestry university(natural science edition)：2020，44(2)：197-205.

[10] WARDLE D A，BONNER K I，NICHOLSON K S.Biodiversity and plant litter：experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function[J].Oikos，1997，79(2)：247-258.

[11] GARTENR T B，CARDON Z G.Decomposition dynamics in mixed-species leaf litter[J].Oikos，2004，104(2)：230-246.

[12] 陈法霖，郑华，阳柏苏，等.中亚热带几种针、阔叶树种凋落物混合分解对土壤微生物群落碳代谢多样性的影响[J].生态学报，2011，(11)：3027-3035.

CHEN F L, ZHENG H, YANG B S, et al.The decomposition of coniferous and broadleaf mixed litters significantly changes the carbon metabolism diversity of soil microbial communities in subtropical area, southern China[J].Acta ecologica Sinica, 2011(11):3027-3035.

[13] 高伟,黄茂根,黄雍容,等.亚热带3种森林凋落物量及碳氮归还动态变化[J].水土保持研究,2023,30(4):146-153.
GAO W, HUANG M G, HUANG Y R, et al.Dynamic characteristics of litterfall and carbon and nitrogen return in three forest types in subtropical China[J].Research of soil and water conservation, 2023, 30(4):146-153.

[14] 刘伦忠,李向阳,杨帆 .论江西官山自然保护区的保护价值[J].中南林业调查规划,2003(1):37-39.1
LIU L Z, LI X Y, YANG F.On the conservation value of Guanshan Nature Reserve in Jiangxi Province[J].Central south forest inventory and planning, 2003(1):37-39.

[15] 徐定兰,余泽平,王国兵,等.江西官山常绿阔叶林监测样地:灌木多样性及空间计量特征[J].江西农业大学学报,2018,40(5):1001-1011.
XU D L, YU Z P, WANG G B, et al.Shrub apecies diversity and spatial characteristics in Guanshan evergreen broad-leaved forest monitoring plot(GSP)[J].Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2018, 40(5):1001-1011.

[16] 欧阳园兰,温开德,王国兵,等.官山长柄双花木群落特征与种群更新的定位研究[J].江西科学,2018,36(1):47-53.
OUYANG Y L, WEN K D, WANG G B, et al.Long-term positioning research on community characteristics and population regeneration of *Disanthus cercidifolius* var. longipes in Guanshan[J].Jiangxi science, 2018, 36(1):47-53.

[17] 王国兵,徐定兰,吴钦树,等.江西官山国家级自然保护区长柄双花木生长规律及种群年龄结构[J].南方林业科学,2017,45(4):8-11.
WANG G B, XU D L, WU Q S, et al.Trunk growth regular and age structure of *Disanthus cercidifolius* var.longipes in Jiangxi Guanshan National Nature Reserve[J].South China forestry science, 2017, 45(4):8-11.

[18] 李艳红,罗承德,杨万勤,等.桉-桤混合凋落物分解及其土壤动物群落动态[J].应用生态学报,2011,22(4):851-856.
LI Y H, LUO C D, YANG W Q, et al.Decomposition of *eucalyptus-alder* mixed litters and dynamics of soil faunal community [J].Chinese journal of applied ecology, 2011, 22(4):851-856.

[19] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
LU R K.Methods for agrochemical analysis of soil[M].Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[20] 刘语欣.台湾桤木与扁穗牛鞭草复合模式凋落物分解及土壤养分动态研究[D].成都:四川农业大学,2010.
LIU Y X.Litter decomposition and nutrient dynamics on soil in complex ecosystem of *Alnus formosana-Femarthria compressa*[D].Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2010.

[21] 毛涛.巨桉与台湾桤木凋落物混合分解特征[D].成都:四川农业大学,2011.
MAO T.Decomposition of leaf litters mixed *Eucalyptus Grandis* with *Alnus Formosana*[D].Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2011.

[22] 袁小兰.养分和碳源添加对杉木和合欢凋落物分解过程的影响[D].南昌:江西农业大学,2018.
YUAN X L.Effects of nutrients and carbon additions on the decomposition of *Cunninghamia lanceolata* and *Albizia julibrissin* litter[D].Nanchang:Jiangxi agricultural university, 2018.

[23] CHASSE P, PELOSI C, LATA J C, et al S.Impact of crop genetic diversity on a litter consumer[J].Basic and applied ecology, 2019, 36:1-11.

[24] WARDLE D A, BONNER K I, NICHOLSON K S.Biodiversity and plant litter:experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function[J].Oikos, 1997, 79(2):247-258.

[25] 王相娥,薛立,谢腾芳.凋落物分解研究综述[J].土壤通报,2009,40(6):1473-1478.
WANG X E, XUE L, XIE T F.A review on litter decomposition[J].Chinese journal of soil science, 2009, 40(6):1473-1478.

[26] LIU J, LIU X Y, SONG Q N, et al.Synergistic effects:a common theme in mixed-species litter decomposition[J].New phytologist, 2020, 227(3):757-765.

[27] LU W J, QI J Y, WU C, et al.Effects of mixed litter with different degrees of decomposition on the decomposition characteristics of semi-arid grassland in northern Shanxi[J].Acta prataculturae Sinica, 2023, 32(12):47-57.

[28] 黄锦学,黄李梅,林智超,等.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,2010,5(3):56-63.
HUANG J X, HUANG L M, LIN Z C, et al.Controlling factors of litter decomposition rate in China's forest[J].Journal of subtropical resources and environment, 2010, 5(3):56-63.

[29] COUTEAUX M-M , BOTTNER P, BERG B.Litter decomposition, climate and liter quality[J].Trends in ecology & evolu-

tion,1995,10(2):63-66.

[30] 王雅婷,卢剑波.陆地生态系统凋落物分解及影响因子的研究进展[J].科技通报,2017,33(10):1-10.
WANG Y T,LU J B.A Review on litter decomposition and its impact factor in terrestrial ecosystems[J].Bulletin of science and technology,2017,33(10):1-10.

[31] 李学斌,陈林,吴秀玲,等.荒漠草原4种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素[J].生态学报,2015,35(12):4105- 4114.
LI X B,CHEN L,WU X L,et al.Litter decomposition rates and influencing factors of four typical plant communities in desert steppe[J].Acta ecologica Sinica,2015,35(12):4105-4114.

[32] 曹智,文仕知,何功秀,等.南方红壤丘陵区水土保持林对枯落物和土壤养分的影响[J].西北林学院学报,2024,39(1):154-161.
CAO Z,WEN S Z,HE G X,et al.Effects of soil and water conservation forest on litter and soil nutrients in red hilly region of southern China[J].Journal of northwest forestry university,2024,39(1):154-161.

[33] 于雯超,赵建宁,李刚,等.内蒙古贝加尔针茅草原3种主要植物凋落物分解特征[J].草地学报,2014,22(3):502-510.
YU W C,ZHAO J N,LI G,et al.Litter decompositions of three dominant plants in the *Stipa baicaiensis* grassland of Inner Mongolia[J].Acta agrestia Sinica,2014,22(3):502-510.

[34] 陈家琛,左晓东,陈立,等.间伐对杉木人工林凋落物分解和养分释放速率的影响[J].西北林学院学报,2023,38(2):119-125.
CHEN J C,ZUO X D,CHEN L,et al.Effects of different thinning intensities on the decomposition and nutrient release rate of Chinese fir plantation leaves[J].Journal of northwest forestry university,2023,38(2):119-125.

[35] 吴迪,韩振诚,李苇洁,等.马缨杜鹃不同花叶比例凋落物的分解程度和持水性能研究[J].水土保持学报,2020,34(5):186-191.
WU D,HAN Z C,LI W J,et al.Study on the decomposition and water holding capacity of flower and leaf litter mixtures of *Rhododendron delavayi*[J].Journal of soil and water conservation,2020,34(5):186-191.

[36] 王海霞,解婷婷,米雪,等.干旱荒漠区三种典型灌丛植物凋落物混合分解效应研究[J].草地学报,2024,32(3):869-878.
WANG H X,XIE T T,MI X,et al.Study on the mixed decomposition effect of litter of three typical shrub plants in arid desert region[J].Acta agrestia Sinica,2024,32(3):869-878.

[37] COLLINS H P,ELLIOTT L F,RICKMAN R W,et al.Decomposition and interactions among wheat residue components[J].Soil science society of America journal,1990,54(3):780-785.

[38] 何丹.马尾松、樟树凋落物混合分解及养分释放[D].长沙:中南林业科技大学,2015.
HE D.Decomposition and nutrient release of mixed litterfall of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora*[D].Changsha:Central South University of Forestry and Technology,2015.

[39] 李金凤,王晖,黄海梅,等.马尾松与不同阔叶树种混交种植对土壤微生物群落组成和多样性特征的影响[J].广西科学,2024,31(03):439-450.
LI J F,WANG H,HUANG H M,et al.Effects of mixed plantation of *Pinus massoniana* with different broadleaf species on soil microbial community composition and diversity[J].Guangxi sciences,2024,31(3):439-450.

[40] KUBARTOVA A,RANGER J,BERTHELIN J,et al.Diversity and decomposing ability of saprophytic fungi from temperate forest litter[J].Microbial ecology,2009,58(1):98-107.