



喀斯特森林常见树种倒木分解对土壤腐殖质的影响

林洋, 马丹丹, 余力, 张宇辰, 戚玉娇

引用本文:

林洋, 马丹丹, 余力, 等. 喀斯特森林常见树种倒木分解对土壤腐殖质的影响[J]. 热带亚热带植物学报, 2026, 34(4): 409–417.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11926/jtsb.5047>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

茂兰喀斯特常绿落叶阔叶混交林群落组成和优势种更新类型

Community Composition and Regeneration Types of Dominant Species in Evergreen and Deciduous Broad-leaved Mixed Karst Forest in Maolan National Nature Reserve, Guizhou Province

热带亚热带植物学报. 2018, 26(6): 651–660 <https://doi.org/10.11926/jtsb.3893>

增温对鼎湖山混交林中4种优势树种生物量分配和养分积累的影响

Effects of Warming on Biomass Allocation Patterns and Nutrient Accumulations of Four Dominant Tree Species in Mixed Forest of Dinghushan, China

热带亚热带植物学报. 2021, 29(4): 389–400 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4325>

5种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征

Characteristics of Soil Nutrient and Enzyme Activities in Plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* and Five *Acacia* Species

热带亚热带植物学报. 2021, 29(5): 483–493 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4334>

冬季南亚热带森林演替中后期优势树种幼叶光保护策略

Photoprotection Strategies in Young Leaves of Dominant Species in Mid- and Late-Successional Stages of Low Subtropical Forest in Winter

热带亚热带植物学报. 2021, 29(2): 171–179 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4264>

地被植物对广东常绿阔叶林土壤养分的指示作用

Indicative Effect of Ground Vegetation on Soil Nutrient Status in Evergreen Broad-leaved Forest of Guangdong

热带亚热带植物学报. 2020, 28(2): 115–123 <https://doi.org/10.11926/jtsb.4105>

向下翻页，浏览PDF全文

喀斯特森林常见树种倒木分解对土壤腐殖质的影响

林洋¹, 马丹丹¹, 余力², 张宇辰³, 戚玉娇^{1*}

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州省平塘县林业局, 贵州 平塘 558300; 3. 贵州省林业学校, 贵州 修文 550201)

摘要: 为探究喀斯特森林常见树种倒木分解过程中, 树种、腐烂等级及距离对土壤腐殖质含量的影响机制, 了解倒木在森林生态系统中的功能作用, 以茂兰喀斯特常绿落叶阔叶混交林中处于轻度、中度和重度腐烂的青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、枫香(*Liquidambar formosana*)和狭叶润楠(*Machilus rehderi*)倒木为研究对象, 对距离倒木 10、30 和 50 cm 处的表层土壤中的腐殖质总碳、胡敏酸、富里酸和胡敏素含量进行测定。结果表明, 喀斯特森林常见树种倒木的树种、腐烂等级及树种和腐烂等级的交互作用显著影响土壤腐殖质各组分含量(总碳、胡敏酸、富里酸和胡敏素), 距离则显著影响土壤腐殖质的有机碳和胡敏素。狭叶润楠倒木邻近土壤腐殖质总碳、胡敏酸、富里酸和胡敏素含量显著低于枫香、青冈栎和圆果化香。重度腐烂的枫香和圆果化香倒木邻近土壤腐殖质总碳、胡敏素含量均显著高于轻度腐烂。随着距倒木距离的增加, 狭叶润楠和枫香的总碳含量和胡敏素含量呈显著下降趋势。倒木邻近土壤的有机碳、全氮、全磷、水解氮和有效磷含量与各腐殖质组分之间的相关性随着腐烂等级增加显著增强。喀斯特森林中倒木分解对土壤碳和养分循环具有重要影响, 不同树种间土壤腐殖质积累模式有差异, 且腐烂等级可调节倒木分解与养分循环之间的关系。

关键词: 喀斯特森林; 倒木; 土壤腐殖质; 腐烂等级; 森林生态系统

doi: 10.11926/jtsb.5047 CSTR:32235.14.jtsb.5047

Effects of Downed Logs Decomposition of Common Tree Species on Soil Humus in Karst Forest

LIN Yang¹, MA Dandan¹, YU Li², ZHANG Yuchen³, QI Yujiao^{1*}

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Forestry Bureau of Pingtang County, Pingtang 558300, Guizhou, China; 3. Guizhou Forestry School, Xiuwen 550201, Guizhou, China)

Abstract: To explore the influence mechanisms of tree species, decay grades and distance on the content of soil humus during the decomposition process of common tree species in karst forests, and to understand the functional role of fallen trees in forest ecosystems, the contents of total carbon, humic acid, fulvic acid and humin in the surface soil at 10, 30 and 50 cm away from the fallen trees of *Cyclobalanopsis glauca*, *Platycarya longipes*, *Liquidambar formosana* and *Machilus rehderi* in the evergreen and deciduous broad-leaved mixed forest of Maolan karst were measured. The results showed that the tree species, decay grades and the interaction between tree species and decay grades of fallen trees in karst forests significantly affected the contents of various components of soil humus (total carbon, humic acid, fulvic acid and humin), while distance significantly affected the organic carbon and humin of soil humus. The contents of total carbon, humic acid, fulvic acid and humin in the soil adjacent to the fallen trees of *M. rehderi* were significantly lower than those of *L. formosana*, *C. glauca* and *P. longipes*. The contents of total carbon and humin in the soil adjacent to the heavily decayed fallen trees of *L. formosana* and *P. longipes* were significantly higher than those of the slightly decayed ones. With the increase of

收稿日期: 2025-07-21 接受日期: 2025-11-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(32060266); 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2024]重点 005)资助

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 32060266), and the Project for Science and Technology Planning in Guizhou (Grant No. ZK[2024]005).

作者简介: 林洋(1998 年生), 男, 硕士研究生, 从事倒木分解研究。E-mail: 2403486608@qq.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yiqi@gzu.edu.cn

distance from the fallen trees, the contents of total carbon and humin of *M. rehderi* and *L. formosana* showed a significant downward trend. The correlations between the contents of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, hydrolyzable nitrogen and available phosphorus in the soil adjacent to the fallen trees and the contents of various components of soil humus significantly increased with the increase of decay grades. Therefore, the decomposition of fallen trees in karst forests had an important impact on soil carbon and nutrient cycling. There were differences in the accumulation patterns of soil humus among different tree species, and decay grades could regulate the relationship between fallen tree decomposition and nutrient cycling.

Key words: Karst forest; Fallen tree; Soil humus; Decay class; Forest ecosystem

土壤腐殖质源于动植物残体,在微生物的作用下,经分解与合成过程后形成,属于结构复杂的聚合物[1]。土壤腐殖质被广泛用于改良土壤和治理环境[2],它是土壤有机质的主要组成部分,依据在不同溶剂里的溶解情况,其可被划分为胡敏酸、富里酸以及胡敏素[3]。土壤腐殖质作为土壤肥力的关键要素,能够提升养分利用效率,激活微生物活性,促进土壤团聚体的构建[4]。森林土壤的固碳能力,在相当程度依赖于有机碳的稳定程度,而土壤碳库中最稳定的部分就是腐殖质,腐殖质可用于评判土壤有机质含量与稳定性,其胡敏酸、富里酸含量之比(胡富比)和土壤结构状态、供肥水平紧密相关[5],而胡敏素作为腐殖质的惰性物质,在养分稳定、碳截留以及生物地球化学循环等方面占据着重要地位[6-7]。因此,探究土壤腐殖质组分的变化特征对森林土壤碳固存和保持肥力具有非常重要的作用。

倒木是由森林生态系统的自然演替、更新以及自然干扰或人为干扰等原因形成的死木质物,其对于森林生态系统生物多样性的保持,以及全球碳循环的运行,均发挥着重要效能[8]。倒木腐殖化过程是植物残体转为土壤腐殖质的重要阶段,可以促进森林土壤养分元素循环及增加土壤有机质含量。已有研究证实树种差异对土壤腐殖质的普遍影响,张晓曦等[9]认为不同纯林土壤腐殖质存在显著差异, Li 等[10]报道引入阔叶树种可改变人工林土壤养分和微生物活动,但这些研究多集中于立木林分或凋落物层面。倒木作为森林死地被物的重要组成部分,其分解过程、化学物质释放及其对土壤的微域影响与立木或凋落物存在本质区别[11-12]。目前,针对不同树种倒木本身分解如何影响周边土壤腐殖质组分的研究仍较为缺乏,且现有研究多聚焦于单一因素[11],或垂直方向上的变化[4],而综合考量树种特性、腐烂等级动态过程以及水平距离空间异质性三

者对土壤腐殖质影响的系统性研究尚未见报道。特别是在土层浅薄、土被不连续的喀斯特森林生态系统中,倒木分解可能在土壤有机质形成和养分循环中扮演着更为关键的角色,但其具体机制尚不明确。因此,深入研究倒木分解过程中不同树种和腐烂等级对土壤腐殖质组分的影响,以及距离因素的作用,将为理解森林生态系统的倒木腐殖化过程提供理论依据。

相较于常态地貌的森林生态系统,茂兰自然保护区的生态系统在群落外貌、生态环境、垂直结构、组成特征、以及演替动态等方面均有显著的独特性,该地区具有土层浅薄、土壤发育缓慢、水土易流失等特点[13]。前期研究表明,倒木的分解能够影响该地区土壤养分元素循环和土壤微生物群落结构[14-15],但对土壤腐殖质组分的影响尚不明确,因此研究该地区倒木分解对周围土壤腐殖质组成和分布的影响至关重要。本研究在茂兰喀斯特森林选取处于不同腐烂程度的 4 种常见树种倒木作为研究对象,系统探究树种、腐烂等级以及距离这 3 个关键因素,从物种特异性、分解动态过程以及空间格局变化等多维度视角,深入剖析倒木分解过程对土壤腐殖质含量的影响机制。通过这一研究,不仅能够揭示喀斯特地区倒木存在的生态效应,还能为喀斯特森林生态系统物质循环和土壤肥力维持等研究提供全面且有价值的支撑。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

研究区域处在贵州省南部的荔波县,地处黔、桂两省交界位置,它的东面和南面与广西省环江县相邻。茂兰自然保护区(107°52'~108°05' E, 25°09'~25°20' N)占地 212.85 hm²,呈东西宽 22.8 km、南北长 21.8 km 的分布态势,该区域与都匀市直线距

离 172 km, 森林覆盖率达 87.3%。区内地貌垂直梯度差异明显, 海拔 430~1 078.6 m, 平均海拔逾 800 m。年均气温 15.3 °C, 植物生长期 315 d。年均降水量 1 752 mm, 多集中在 4 月—10 月, 相对湿度 83%, 属于典型亚热带温湿气候区。区内分布的岩石主要以白云岩和石灰岩为主, 土壤呈弱碱性, pH 值为 7.0~7.5, 富含氮、磷、钾及有机质, 质量佳。土层极为瘠薄, 厚度仅 15~40 cm, 且受岩石切割破碎, 呈零星状填充于石隙间, 难以形成连续覆盖。整体上, 该区域雨热同期, 积温量大, 无霜期漫长, 日照充足, 为喀斯特森林的生长营造了优良的气候环境。茂兰喀斯特森林在我国是仅存的、原生性保持较好的特殊森林类型, 保护区内维管束植物种类丰富, 约占贵州省维管束植物总数的 17%。保护区内是以狭叶润楠(*Machilus rehderi*)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca*)、云贵鹅耳枥(*Carpinus pubescens*)、栲木石楠(*Photinia davidsoniae*)、圆果化香(*Platycarya longipes*)、枫香(*Liquidambar formosana*)、香叶树(*Lindera communis*)等为优势种的常绿落叶阔叶混交林, 构成了保护区植被的主体。

1.2 试验设计和土壤样品采集

2019 年 8 月(雨季末期)在茂兰自然保护区喀斯特常绿阔叶混交林中选取倒木径级 25~30 cm 青冈栎、圆果化香、枫香和狭叶润楠 4 种树种倒木为研究对象。选择林分郁闭度>0.8、土层厚度<30 cm 且土被不连续的区域作为样地, 根据闫恩荣等^[16]对倒木腐烂等级划分标准, 将 4 种树种倒木的腐烂程度划分为轻度、中度和重度 3 个等级(轻度腐烂: 使用刀片可刺进倒木 2 cm 以下; 中度腐烂: 刀片可刺进倒木 2~5 cm; 重度腐烂: 可任意刺穿木质体), 共选取 36 根倒木段作为研究对象。另外, 根据袁杰等^[17]对倒木的取样方法, 在每段倒木横断面两侧(0°与 180°方位)距树段中心 10、30、50 cm (对照)处设置梯度采样点, 共 108 个采样点。最后再将土壤表层的叶片、树枝以及外来入侵物等杂质清除, 每个距离处多点混合取样, 带回实验室分析其土壤腐殖质和土壤养分的含量。

1.3 土壤腐殖质及养分含量测定

将采集的土样样品风干后, 使用镊子将土样中的石砾拾取干净, 然后研磨通过 0.25 mm 筛孔。根据国家林业局行业标准(LY/T 1238—1999)^[18], 在对土壤腐殖酸及养分含量的测定实验中, 采用焦磷酸钠浸提法结合重铬酸钾氧化法, 对腐殖质各组分含

量展开测定。富里酸碳含量通过差值法获取, 即以胡敏酸与富里酸的总碳含量为基础, 减去胡敏酸碳含量得到。胡敏素碳含量由腐殖质全碳量与胡敏酸、富里酸总碳量的差值确定。同时测定土壤全氮、全磷、全钾、速效钾、水解氮、有效磷和有机碳含量。具体测定方法和数据见余力等^[12]。

1.4 数据处理

本研究采用三因素方差分析(Three-Way ANOVA), 探究倒木树种、腐烂等级和距离 3 个因素及其交互作用对倒木邻近土壤腐殖质含量的影响。利用单因素方差分析(One-Way ANOVA)结合最小显著差异法(least significant difference method, LSD)多重比较, 分析不同腐烂等级、树种以及不同距离处倒木邻近土壤腐殖质各组分含量的差异。数据统计与处理在 SPSS 22.0 软件上完成, 软件绘图在 R 语言的 ggplot2 包和 patchwork 包以及 Excel 2016 上完成。

2 结果和分析

2.1 多因素交互作用对倒木邻近土壤腐殖质含量的影响

由表 1 可见, 树种与腐烂等级对倒木周边土壤的腐殖质总碳、胡敏酸、富里酸以及胡敏素含量均有着极显著的影响, 腐烂等级和树种之间的交互作用极显著影响了倒木邻近土壤的总碳、胡敏酸、富里酸、胡敏素含量及胡敏酸与富里酸的比值。距离对倒木周边土壤的腐殖质总碳量、胡敏素含量有着极显著的影响, 而对胡敏酸、富里酸含量以及胡敏酸与富里酸的比值未达显著水平。距离与腐烂等级、距离与树种的交互作用, 以及距离、腐烂等级和树种三者的交互作用, 对土壤腐殖质各组分含量的影响未达显著水平。

2.2 树种、腐烂等级对倒木邻近土壤腐殖质含量的影响

由图 1 可见, 树种对倒木邻近土壤腐殖质组分含量有影响。树种的影响在重度腐烂阶段尤为明显, 狭叶润楠倒木邻近土壤的腐殖质总碳、胡敏酸和富里酸含量均显著低于枫香、青冈栎和圆果化香。但 4 树种倒木邻近土壤胡敏酸含量/富里酸含量并未表现出显著差异。在中度腐烂时, 青冈栎和圆果化香倒木邻近土壤的腐殖质总碳、胡敏酸、胡敏素含量均显著高于狭叶润楠和枫香。轻度腐烂时, 狭叶润楠倒木邻近土壤的胡敏酸含量显著低于枫

表 1 多因素交互作用对倒木邻近土壤腐殖质含量的影响(P 值)

Table 1 Effects (P value) of multifactorial interaction on soil humus content adjacent to fallen wood

因素 Factor	总碳量 Total carbon content	胡敏酸 (HA) Humic acid	富里酸 (FA) Fulvic acid	胡敏素 Humin	HA/FA
腐烂等级 Decay class (A)	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.901
树种 Tree species (B)	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.547
距离 Distance (C)	0.007**	0.231	0.578	0.000**	0.345
A×B	0.000**	0.000**	0.000**	0.000**	0.006**
C×A	0.908	0.602	0.354	0.336	0.434
B×C	0.698	0.761	0.978	0.052	0.357
C×A×B	0.819	0.704	0.887	0.254	0.347

** $: P<0.01$

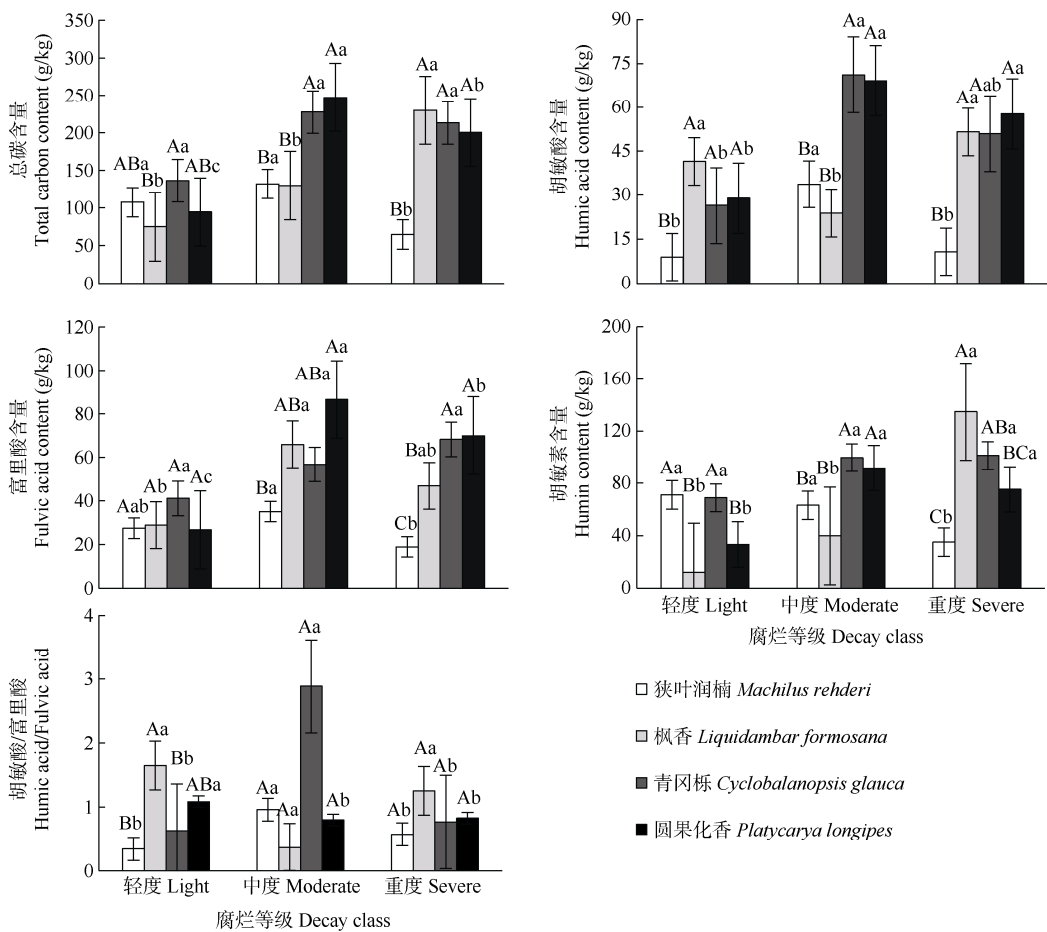


图 1 树种和腐烂等级对倒木邻近 10 cm 处土壤腐殖质含量的影响。柱上不同大写和小写字母分别表示相同腐烂等级不同树种和相同树种不同腐烂等级间差异显著($P<0.05$)。

Fig. 1 Effects of tree species and decay class on soil humus content at 10 cm adjacent to fallen wood. Different capital and lowercase letters upon column indicate significant differences at 0.05 level among different tree species at the same decay grade and among different decay grades of the same tree species, respectively.

香、青冈栎、圆果化香，而狭叶润楠和青冈栎倒木邻近土壤的胡敏素含量显著高于枫香和圆果化香。腐烂等级的变化则呈现出因树种而异的趋势。狭叶润楠倒木邻近土壤腐殖质总碳、富里酸、胡敏

素含量随腐烂等级显著下降。枫香倒木邻近土壤的腐殖质总碳、富里酸以及胡敏素含量随腐烂等级显著上升。青冈栎倒木邻近土壤的胡敏酸含量随腐烂等级显著上升。圆果化香倒木邻近土壤的胡敏酸、

胡敏素含量随腐烂等级显著上升, 而胡敏酸与富里酸比值显著下降。

2.3 倒木不同距离处的土壤腐殖质含量

对倒木重度腐烂时不同距离土壤腐殖质含量的对比分析表明, 不同树种表现出不同的变化规律(图2)。狭叶润楠倒木邻近土壤腐殖质总碳、富里酸和胡敏素含量以及胡敏酸与富里酸比均随着距离的增加呈显著下降趋势。枫香倒木邻近土壤腐殖质总碳和胡敏素含量随着距离的增加呈显著下降趋势。青冈栎和圆果化香倒木各距离土壤腐殖质含量无显著差异。

2.4 相关性分析

相关分析表明(表2), 倒木邻近土壤腐殖质组分与土壤养分元素之间的相关性随腐烂等级升高呈现规律性变化。在轻度腐烂时, 土壤有机碳、全氮、全磷和水解氮与腐殖质总碳呈极显著正相关, 全钾和速效钾与胡敏酸呈极显著负相关。土壤有机碳、

全磷和水解氮与富里酸呈显著正相关, 全氮、全磷、水解氮和速效钾与胡敏素呈显著正相关, 有机碳与胡敏素亦呈极显著正相关。随着腐烂等级升至中度, 土壤有机碳、全氮和水解氮与腐殖质各组分均呈极显著正相关; 全钾与腐殖质总碳、胡敏酸和胡敏素呈极显著负相关; 土壤有效磷与腐殖质总碳、富里酸呈极显著正相关, 与胡敏酸、胡敏素也呈显著正相关; 速效钾与胡敏酸仍保持显著负相关。在重度腐烂条件下, 腐殖质各组分与土壤有机碳、全氮、全磷、水解氮和有效磷均呈极显著正相关。全钾与胡敏酸转为显著正相关。速效钾与腐殖质总碳、胡敏素呈极显著正相关, 与富里酸呈显著正相关。总体来看, 随着腐烂等级增加, 土壤有机碳、全氮、全磷、水解氮和有效磷与腐殖质各组分的相关系数普遍增大, 相关关系增强。全钾与腐殖质的关系呈现动态变化, 由中度腐烂时与总碳、胡敏酸和胡敏素的显著负相关, 转为重度腐烂时与胡敏酸的显著正相关。

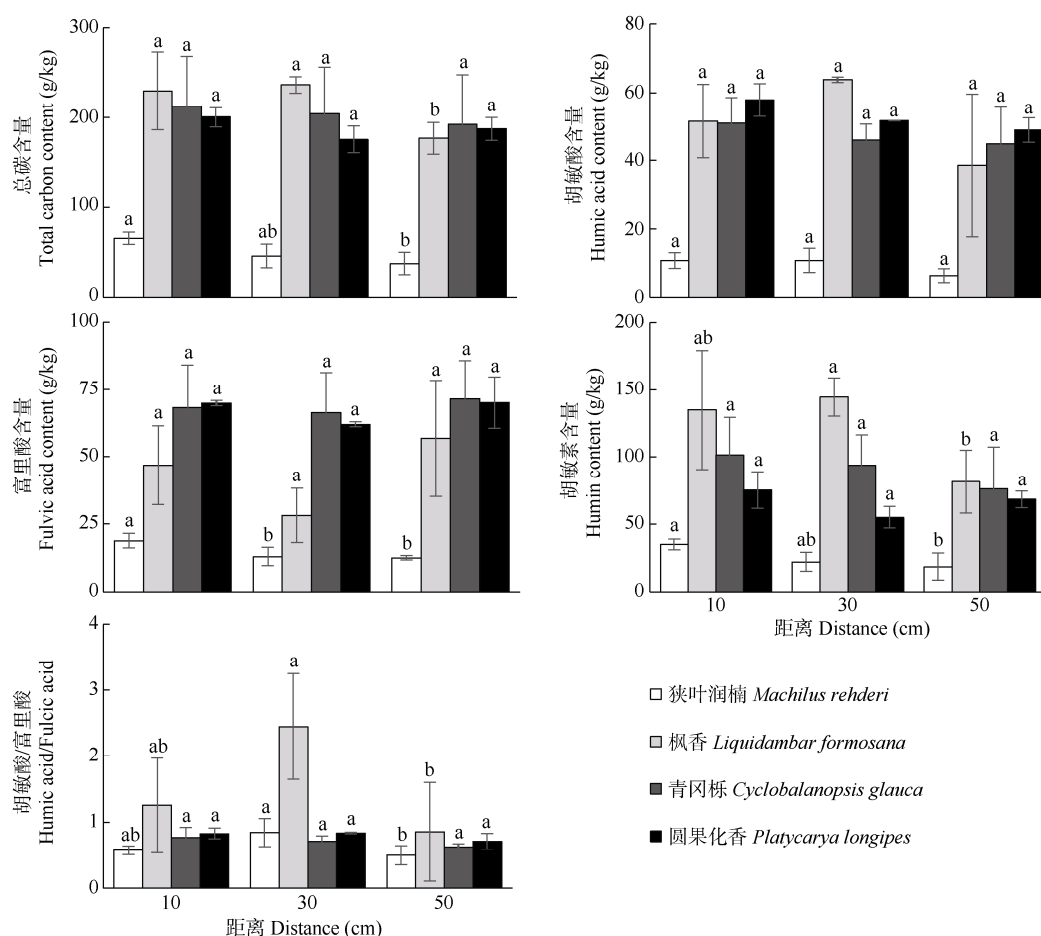


图2 重度腐烂倒木不同距离土壤腐殖质含量。相同树种柱子上不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

Fig. 2 Humus content of soil at different distances when fallen wood is severely decomposed. Different letters upon column of the same species indicate significant differences at 0.05 level.

表 2 倒木邻近土壤腐殖质与土壤养分元素的相关系数

Table 2 Correlation coefficient between soil humus and soil nutrient elements near fallen wood					
腐烂等级 Decay class	土壤养分元素 Soil nutrient elements	腐殖质总碳 Total carbon of humus	胡敏酸 Humic acid	富里酸 Fulvic acid	胡敏素 Humin
轻度 Light	有机碳 SOC	0.793**	-0.213	0.330*	0.773**
	全氮 TN	0.607**	-0.181	0.126	0.584*
	全磷 TP	0.590**	-0.180	0.376*	0.545*
	全钾 TK	-0.154	-0.763**	-0.190	0.279
	水解氮 HN	0.755**	-0.204	0.445*	0.509*
	有效磷 AP	-0.093	-0.015	-0.206	-0.200
	速效钾 AK	0.205	-0.550**	-0.008	0.544*
	有机碳 SOC	0.897**	0.817**	0.616**	0.816**
中度 Moderate	全氮 TN	0.811**	0.716**	0.728**	0.599**
	全磷 TP	-0.005	-0.171	0.179	-0.012
	全钾 TK	-0.686**	-0.743**	-0.271	-0.705**
	水解氮 HN	0.819**	0.663**	0.679**	0.708**
	有效磷 AP	0.560**	0.360*	0.628**	0.402*
	速效钾 AK	-0.248	-0.398*	-0.088	-0.154
	有机碳 SOC	0.939**	0.833**	0.620**	0.875**
	全氮 TN	0.879**	0.818**	0.751**	0.694**
重度 Severe	全磷 TP	0.741**	0.674**	0.552**	0.661**
	全钾 TK	0.269	0.368*	0.262	0.188
	水解氮 HN	0.919**	0.886**	0.768**	0.731**
	有效磷 AP	0.801**	0.745**	0.439**	0.829**
	速效钾 AK	0.473**	0.275	0.375*	0.501**

**.: $P<0.01$; *: $P<0.05$.

3 讨论和结论

喀斯特森林倒木分解对邻近土壤腐殖质各组分含量的影响因树种而异。狭叶润楠倒木随着分解程度加深，土壤腐殖质总碳、富里酸、胡敏素含量呈下降趋势，在分解后期其土壤腐殖质含量均显著低于其他 3 个树种，这种差异主要与不同树种本身的木材特性有关，与前人^[9,19-20]的研究结果一致。狭叶润楠属樟科植物，含萜类物质，挥发油破坏真菌细胞膜后，多酚类或生物碱更易进入细胞内部，具有抑制真菌的作用^[21]，因此其分解所需要的时间更长，土壤腐殖质含量相对较少。此外，前期的研究^[14]表明重度腐烂的狭叶润楠倒木下方土壤的碳氮比数值，相较于其他 3 树种倒木下的土壤碳氮比更高，而高的土壤碳氮比意味着有机质矿化速率慢，这会导致邻近的土壤外源有机物质质量补充不足，进而降低土壤腐殖质的含量。枫香倒木邻近土壤的胡敏酸含量呈先降后升的模式，可能源于分解初期枫香倒木的脂挥发油具有抑制胡敏酸合成型真菌(担子菌门)的作用以及胡敏酸前提生成物质较少，其含量从初期到中期是下降的，到中后期之后

枫香的脂挥发油逐渐消耗，胡敏酸合成型真菌得到释放，胡敏酸又呈现增加的趋势^[22]。圆果化香倒木邻近土壤富里酸含量则表现为随着腐烂程度加深先增后减。分解前期，圆果化香通过分解易降解的简单糖和半纤维素，在微生物的作用下形成富里酸^[23-24]，而狭叶润楠受萜类抗菌物质影响、枫香受挥发性油脂调控、青冈栎树皮较硬，所以从分解初期到中期圆果化香的富里酸差异性比较明显，分解后期圆果化香倒木前期转化较多，结构松散，富里酸可能随着淋溶作用迁移进入土壤较多，部分富里酸转化为更稳定的胡敏酸或胡敏素^[11]。

随着腐烂等级加深，枫香、青冈栎和圆果化香倒木邻近土壤腐殖质总碳、胡敏酸、富里酸、胡敏素含量呈现由低到高的变化趋势，与 Błońska 等^[25]关于倒木分解程度越高对土壤有机质影响越显著的结论一致，表明不同树种倒木通过相似的分解途径促进了土壤腐殖质的形成。这一变化与倒木分解的物理和生物过程密切相关。分解初期，倒木边材和树皮质地坚硬，限制了土壤动物和微生物的入侵；随着外力破碎和雨水淋溶作用，倒木结构逐渐疏松^[26]，其碎片和淋溶物进入土壤，为腐殖质形成

提供了物质基础。进入分解后期,倒木树皮脱落,边材与环境接触面积增大,水热条件和通气状况改善,好氧微生物活性增强,加速了单宁等难分解物质的降解和腐殖化进程^[27]。

研究表明,狭叶润楠、枫香倒木邻近土壤腐殖质总碳、胡敏素含量以及胡敏酸与富里酸比随着距离的增加含量有降低的趋势,而胡敏酸、富里酸则没有显著性的差异。狭叶润楠和枫香的腐殖质含量随着距离的增加而减少的趋势可能与不同树种影响下的微生物群落有关,因为前期的研究发现狭叶润楠和枫香林下真菌多样性随距离增加而降低^[15], Manici 等^[28]也证实真菌群落对腐殖物质形成具有重要影响。

喀斯特森林倒木周围土壤中有有机碳、氮和磷元素含量与土壤腐殖质含量呈显著正相关,随着倒木腐烂程度的加深,相关系数呈增大趋势,说明倒木的分解过程增强了土壤腐殖质与养分元素之间的关联性。卢万鹏等^[29]研究得出土壤腐殖质和土壤碳含量具有正相关关系。唐彤彤等^[30]的研究也显示土壤腐殖质含量与土壤氮、磷、钾等营养元素显著正相关。Spychalski 等^[31]报道随着土壤退化,土壤腐殖质减少,土壤中的有效磷也会相应减少。研究表明土壤腐殖质能够吸附固定土壤养分元素来提升土壤肥力^[30]。本研究中土壤腐殖质总碳、富里酸、胡敏酸含量与倒木邻近土壤全钾和速效钾含量之间的关系不显著,这是因为在土壤环境中,钾元素主要以离子形式存在,极易受到离子吸附作用以及多种物理、化学和生物过程的影响。在雨水冲刷等作用下,钾元素还容易流失,从而导致其与腐殖质之间的关系较为复杂^[17]。结合本研究来看,倒木分解能够促进腐殖质的形成与积累,进一步加强腐殖质与养分元素之间的相关性,从而提升了土壤养分的稳定性和有效性。

喀斯特山地土壤的空间异质性较强,不同位置的土壤腐殖质特性会有所差异,这些差异在一定程度上可能会干扰研究结果的可靠性。在本研究中,尽量选择具有相似地貌、植被和土壤类型的研究区域,以及通过多点混合取样等方式来降低这种差异性。后期的研究中,将考虑控制实验进一步控制环境因素的影响,同时结合气候驱动、土壤理化性质、微生物多维度开展综合分析,深入揭示倒木分解在喀斯特森林物质循环中的作用机制,为该区域脆弱生态系统的修复提供关键科学依据。

参考文献

- [1] HUANG W L, LIU Y, JIAN Y, et al. Effects of different snow treatments on soil humus content in subalpine forest soils in western Sichuan, China [J]. Chin J Plant Ecol, 2024, 48(11): 1445–1458. [黄雯澜, 刘瑶, 简毅, 等. 不同雪被处理对川西亚高山森林土壤腐殖质含量的影响 [J]. 植物生态学报, 2024, 48(11): 1445–1458. doi: 10.17521/cjpe.2024.0128.]
- [2] YANG F, TANG C Y, ANTONIETTI M, et al. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms [J]. Chem Soc Rev, 2021, 50(10): 6221–6239. doi: 10.1039/d0cs01363c.
- [3] LI H Y, LIN T, WANG Z J, et al. Effects of biochar continuous returning on soil nutrients, enzyme activities and humus components in soda saline-alkali paddy field soil [J]. Agric Res Arid Areas, 2022, 40(4): 135–142. [李红宇, 林添, 王志君, 等. 生物炭连续还田后效对盐碱土稻田养分、酶活性和腐殖质组分的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(4): 135–142. doi: 10.7606/j.issn.1000-7601.2022.04.15.]
- [4] CHENG L H, ZHANG L, XIANG L L, et al. Characteristics of humus in buried paleosol in Mufu Mountain [J]. Soils, 2025, 57(3): 607–611. [程利花, 张亮, 向利利, 等. 幕阜山典型埋藏古土壤腐殖质特征 [J]. 土壤, 2025, 57(3): 607–611. doi: 10.13758/j.cnki.tr.2025.03.014.]
- [5] MA X L. Effects of returning straw and applying nitrogen fertilizer on soil nutrient, microbial community structure and enzyme activity in wheat field [D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2021. [马雪莲. 秸秆还田配施氮肥对麦田土壤养分、微生物群落结构及酶活性的影响 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021. doi: 10.27409/d.cnki.gxbnu.2021.000692.]
- [6] WANG N, SHAO Z Q, MA C, et al. Effects of Maillard reaction precursors on humus composition of dark-brown soil mixed with basswood chips [J]. J Jilin Univ (Sci Ed), 2022, 60(4): 999–1006. [王楠, 邵泽强, 马超, 等. 添加 Maillard 反应前体物质对混有椴木屑暗棕壤腐殖质组成的影响 [J]. 吉林大学学报(理学版), 2022, 60(4): 999–1006. doi: 10.13413/j.cnki.jdxblxb.2021315.]
- [7] WU X M, YANG X Y, LIN Y Y, et al. Response of humification of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* litter to climate temperature and humidity changes [J]. Acta Agrest Sin, 2021, 29(8): 1738–1747. [吴雪梅, 杨雪岩, 林媛媛, 等. 刺槐和油松枯落叶腐殖质化对气候温湿变化的响应 [J]. 草地学报, 2021, 29(8): 1738–1747. doi: 10.11733/j.issn.1007-0435.2021.08.017.]
- [8] VILLANOVA P H, TORRES C M M E, JACOVINE L A G, et al. Physical and chemical properties of coarse woody debris submitted to the natural process of decomposition in a secondary Atlantic forest

- fragment in Brazil [J]. *Sci Rep*, 2023, 13(1): 7377. doi: 10.1038/s41598-023-34526-9.
- [9] ZHANG X X, LIU Z W, BING Y H, et al. Soil humus differentiation and correlation with other soil biochemical properties in pure forests in semi-arid low-hilly area of Inner Mongolia, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2014, 25(10): 2819–2825. [张晓曦, 刘增文, 郝焜皓, 等. 内蒙半干旱低山区不同纯林土壤腐殖质分异特征及其与其他生物化学性质的关系 [J]. *应用生态学报*, 2014, 25(10): 2819–2825. doi: 10.13287/j.1001-9332.20140801.008.]
- [10] LI W Y, SUN H M, CAO M M, et al. Diversity and structure of soil microbial communities in Chinese fir plantations and *Cunninghamia lanceolata-Phoebe bournei* mixed forests at different successional stages [J]. *Forests*, 2023, 14(10): 1977. doi: 10.3390/f14101977.
- [11] ARNSTADT T, HOPPE B, KAHL T, et al. Dynamics of fungal community composition, decomposition and resulting deadwood properties in logs of *Fagus sylvatica*, *Picea abies* and *Pinus sylvestris* [J]. *For Ecol Manage*, 2016, 382: 129–142. doi: 10.1016/j.foreco.2016.10.004.
- [12] BRUNEL C, GROS R, LERCH T Z, et al. Changes in soil organic matter and microbial communities after fine and coarse residues inputs from Mediterranean tree species [J]. *Appl Soil Ecol*, 2020, 149: 103516. doi: 10.1016/j.apsoil.2020.103516.
- [13] YE Y Y, DING F J, WU P, et al. Effects of hydraulics and anatomical structure on sap flow of nine tree species in karst primary forest [J]. *J Nanjing For Univ (Nat Sci)*, 2024, 48(6): 111–120. [叶雨艳, 丁访军, 吴鹏, 等. 喀斯特原生林 9 个树种水力学性状与解剖结构对树干液流的影响 [J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2024, 48(6): 111–120. doi: 10.12302/j.issn.1000-2006.202302010.]
- [14] YU L, ZHANG Y C, QI Y J. Effects of decomposition of fallen wood of common tree species on soil nutrient contents in karst forest [J]. *J For Environ*, 2022, 42(5): 483–490. [余力, 张宇辰, 戚玉娇. 喀斯特森林倒木分解对土壤养分含量的影响 [J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(5): 483–490. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2022.05.005. doi: 10.13324/j.cnki.jfcf.2022.05.005.]
- [15] ZHANG T, YU C, QI Y J. Effects of fallen woods decomposition of common tree species on soil fungal community composition and distribution in karst forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2022, 42(7): 2774–2783. [张铁, 于存, 戚玉娇. 喀斯特森林常见树种倒木分解对土壤真菌群落组成及分布规律的影响 [J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2774–2783. doi: 10.5846/stxb202101280295.]
- [16] YAN E R, WANG X H, HUANG J J. Concept and classification of coarse woody debris in forest ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, 25(1): 158–167. [闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类 [J]. *生态学报*, 2005, 25(1): 158–167. doi: 10.3321/j.issn: 1000-0933.2005.01.025.]
- [17] YUAN J, HOU L, CAI J, et al. Characteristics of fallen wood and soil nutrients in Huoditang forest region of the Qinling Mountains [J]. *Sci Silv Sin*, 2011, 47(11): 19–24. [袁杰, 侯琳, 蔡靖, 等. 秦岭火地塘林区倒木及其土壤化学元素含量特征 [J]. *林业科学*, 2011, 47(11): 19–24.]
- [18] State Forestry Administration. Determination of soil humus composition in forest soils: LY/T 1238—1999 [S]. Beijing: China Standards Press, 1999. [国家林业局. 森林土壤腐殖质组成的测定: LY/T 1238—1999 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.]
- [19] PURAHONG W, WUBET T, KRÜGER D, et al. Molecular evidence strongly supports deadwood-inhabiting fungi exhibiting unexpected tree species preferences in temperate forests [J]. *ISME J*, 2018, 12(1): 289–295. doi: 10.1038/ismej.2017.177.
- [20] LIU Y, JIAO Z B, TAN B, et al. Litter removal effects on dynamics of soil humic substances in subalpine forests of western Sichuan, China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2022, 46(3): 330–339. [刘谣, 焦泽彬, 谭波, 等. 川西亚高山森林凋落物去除对土壤腐殖质动态的影响 [J]. *植物生态学报*, 2022, 46(3): 330–339. doi: 10.17521/cjpe.2021.0166.]
- [21] YANG D C, LI Z Y, CHEN Y L, et al. Research advances in endophytic fungi and bioactive ingredients diversity of *Lauraceae* [J]. *Biol Dis Sci*, 2017, 40(4): 223–230. [杨鼎超, 李正昀, 陈言柳, 等. 樟科植物内生真菌及活性物质多样性研究进展 [J]. *生物灾害科学*, 2017, 40(4): 223–230. doi: 10.3969/j.issn.2095-3704.2017.04.51.]
- [22] QIN X, LI Y, WANG L, et al. Test of volatile oil in *Liquidambar formosana* [J]. *Chin Pharm*, 2020, 29(1): 7–10. [覃晓, 李炎, 王玲, 等. 枫香脂挥发油抑菌性试验 [J]. *中国药业*, 2020, 29(1): 7–10. doi: 10.3969/j.issn.1006-4931.2020.01.003.]
- [23] ZENG Z X, WANG K L, ZENG F P, et al. Litter decomposition and nutrient release in typical secondary and primary forests in karst region, northwest of Guangxi [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 32(9): 2720–2728. [曾昭霞, 王克林, 曾馥平, 等. 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落叶降解和养分释放 [J]. *生态学报*, 2012, 32(9): 2720–2728. doi: 10.5846/stxb201103240372.]
- [24] RAO S, WU Y Y. Comparison of physiological and morphological traits of *Platycarya longipes* in different slope locations in karst area [J]. *Earth Environ*, 2017, 45(1): 10–17. [饶森, 吴沿友. 喀斯特不同坡位圆果化香的生理与形态特征比较 [J]. *地球与环境*, 2017, 45(1): 10–17. doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.01.002.]
- [25] BŁOŃSKA E, PRAŻUCH W, LASOTA J. Deadwood affects the soil organic matter fractions and enzyme activity of soils in altitude gradient of temperate forests [J]. *For Ecosyst*, 2023, 10: 100115. doi: 10.1016/j.fecs.2023.100115.

- [26] MU Z B, PAN H, WEN X H, et al. Effects of decay grades and diameter classes on physicochemical properties of woody debris in *Tsuga longibracteata* forest in Tianbaoyan National Nature Reserve [J]. Chin J Ecol, 2022, 41(2): 246–255. [穆振北, 潘辉, 温鑫鸿, 等. 腐烂等级和径级对天宝岩长苞铁杉林木质残体理化性质的影响 [J]. 生态学杂志, 2022, 41(2): 246–255. doi: 10.13292/j.1000-4890.202201.015.]
- [27] KREYLING J, HAEI M, LAUDON H. Snow removal reduces annual cellulose decomposition in a riparian boreal forest [J]. Can J Soil Sci, 2013, 93(4): 427–433. doi: 10.4141/cjss2012-025.
- [28] MANICI L M, DE MEO I, LUDOVICA S M, et al. The relationship between tree species and wood colonising fungi and fungal interactions influences wood degradation [J]. Ecol Indic, 2023, 151: 110312. doi: 10.1016/j.ecolind.2023.110312.
- [29] LU W P. The soil humus and its relationship with the main soil nutrients in the different *Eucalyptus* plantation [D]. Nanning: Guangxi University, 2015. [卢万鹏. 桉树人工林土壤腐殖质及其与土壤主要养分的关系 [D]. 南宁: 广西大学, 2015.]
- [30] TANG T T, YU J H, HAN S J, et al. A study on humus composition and contents of elements in soil of Changbai Mountain Area Nature Reserve [J]. Sci Technol Eng, 2015, 15(14): 144–147. [唐彤彤, 于景华, 韩士杰, 等. 长白山自然保护区安图县境内土壤腐殖质与营养元素含量的研究 [J]. 科学技术与工程, 2015, 15(14): 144–147. doi: 10.3969/j.issn.1671-1815.2015.14.027.]
- [31] SPYCHALSKI W, GRZEBISZ W, DIATTA J, et al. Humus stock degradation and its impact on phosphorus forms in arable soils: A case of the Ukrainian Forest-Steppe Zone [J]. Chem Spec Bioavailab, 2018, 30(1): 33–46. doi: 10.1080/09542299.2018.1457985.