北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

# 格氏栲天然林林窗对凋落物难降解物质分解的影响

林泓宇 朱静 江蓝 刘金福 何中声 邢聪 王雪琳

# Effects of forest gaps on decomposition of recalcitrant litter substances in *Castanopsis kawakamii* natural forests

Lin Hongyu, Zhu Jing, Jiang Lan, Liu Jinfu, He Zhongsheng, Xing Cong, Wang Xuelin

引用本文:
林泓宇, 朱静, 江蓝, 刘金福, 何中声, 邢聪, 王雪琳. 格氏栲天然林林窗对凋落物难降解物质分解的影响[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(7):73–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240369
Lin Hongyu, Zhu Jing, Jiang Lan, Liu Jinfu, He Zhongsheng, Xing Cong, Wang Xuelin. Effects of forest gaps on decomposition of recalcitrant litter substances in *Castanopsis kawakamii* natural forests[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7):73–81. doi: 10.12171/j.1000–1522.20240369

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240369

**您可能感兴趣的其他文章**
**Articles you may be interested in**

格氏栲林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征
Seasonal dynamics of functional diversity of soil microbial communities in *Castanopsis kawakamii* forest gaps
北京林业大学学报, 2020, 42(7): 77–88. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20200052

格氏栲天然林凋落物浸提液对杉木种子萌发和胚根生长的影响
Effects of litter extracts from *Castanopsis kawakamii* natural forest on seed germination and radicle growth of Chinese fir
北京林业大学学报, 2020, 42(4): 51–59. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20190292

基于凋落物分解速率的森林凋落叶载量动态预测
Dynamic prediction of forest leaf litter load based on litter decomposition rate
北京林业大学学报, 2025, 47(5): 123–130. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230183

寒温带地区非生长季典型森林群落凋落物分解及养分释放
Litter decomposition and nutrient release of typical forest communities in non–growing season in cold temperate zone
北京林业大学学报, 2022, 44(3): 65–74. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210338

林窗对华北落叶松天然次生林林下物种多样性的影响
Effects of forest gaps on understory species diversity of *Larix principis–rupprechtii* natural secondary forest
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 48–56. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220223

林窗对黄檗幼树空间分布及生长发育的影响
Effects of forest gaps on spatial distribution and growth of *Phellodendron amurense* saplings
北京林业大学学报, 2024, 46(2): 9–17. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220030

DOI:10.12171/j.1000−1522.20240369

# 格氏栲天然林林窗对凋落物难降解物质分解的影响

林泓宇[1]　朱　静[1]　江　蓝[1]　刘金福[1]　何中声[1]　邢　聪[1]　王雪琳[2]
（1. 福建农林大学林学院，生态与资源统计福建省高校重点实验室，海峡自然保护区研究中心，福建 福州 350002；
2. 镇江市自然资源和规划局经开分局，江苏 镇江 212132）

**摘要:【目的】**凋落物中难降解物质含量是影响其分解速率的重要内在因素，同时也是森林生态系统养分循环的核心。林窗通过调节森林冠层内外的微气候条件，对凋落物难降解物质的分解产生影响，但其具体响应机制尚不明确。本研究旨在探讨格氏栲天然林林窗对凋落物难降解物质分解的影响，为深入理解森林养分循环提供新视角。**【方法】**2018 年 5 月底，在三明格氏栲天然林保护区设置林窗与非林窗样地，以格氏栲林混合凋落叶与凋落枝为研究对象，分析不同大小林窗对凋落物难降解物质（单宁、总酚）含量的影响，并揭示其主要驱动因子。**【结果】**（1）林窗大小显著影响了凋落物难降解物质含量（$p < 0.001$）。大林窗凋落叶单宁分解最快，而非林窗最慢；小林窗凋落枝单宁分解最快，中林窗最慢；大林窗凋落叶总酚分解最快，小林窗最慢；中林窗凋落枝总酚分解最快，非林窗最慢。（2）林窗冠层开阔度和土壤温度对难降解物质分解的影响显著（$p < 0.05$），而土壤微生物多样性的作用相对较弱。**【结论】**林窗通过调控林下微环境，包括开阔度和土壤温度等，显著影响了凋落物单宁和总酚的分解。研究结果有助于深入理解森林土壤生态平衡和物质循环过程。

**关键词：**林窗；凋落物分解；单宁；总酚；格氏栲林
**中图分类号：**S718　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1000−1522(2025)07−0073−09
**引文格式：**林泓宇，朱静，江蓝，等. 格氏栲天然林林窗对凋落物难降解物质分解的影响［J］. 北京林业大学学报，2025，47(7)：73−81. Lin Hongyu, Zhu Jing, Jiang Lan, et al. Effects of forest gaps on decomposition of recalcitrant litter substances in *Castanopsis kawakamii* natural forests［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(7): 73−81.

## Effects of forest gaps on decomposition of recalcitrant litter substances in *Castanopsis kawakamii* natural forests

Lin Hongyu[1]　Zhu Jing[1]　Jiang Lan[1]　Liu Jinfu[1]　He Zhongsheng[1]　Xing Cong[1]　Wang Xuelin[2]
(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Key Laboratory of Fujian Universities for Ecology and Resource Statistics, Cross-Strait Nature Reserve Research Center, Fuzhou 350002, Fujian, China;
2. Zhenjiang Municipal Bureau of Natural Resources and Planning, Zhenjiang 212132, Jiangsu, China)

**Abstract:**［**Objective**］The content of recalcitrant compounds in litter constitutes a crucial intrinsic factor influencing decomposition rates, serving as a pivotal component in nutrient cycling within forest ecosystems. Forest gaps mediate the degradation process of refractory substances by buffering microclimatic disparities between canopy interiors and exteriors. However, comprehensive understanding remains limited regarding how litter-derived recalcitrant compounds respond to heterogeneous gap environments.［**Method**］In the end of May 2018, gap and non-gap plots were established in the *Castanopsis kawakamii* natural forest reserve, Sanming City, Fujian Province of eastern China. Focusing on leaf and branch litter of *Castanopsis kawakamii*, this study investigated how gap size regulates the decomposition of recalcitrant substances (tannins and total phenols), thereby identifying key drivers governing their decomposition dynamics.

**收稿日期:** 2024−11−11　**修回日期:** 2025−04−20
**基金项目:** 国家自然科学基金项目（31770678），福建省林业科技项目（2022FKJ21），福建农林大学科技创新专项（KFB24064A）。
**第一作者:** 林泓宇。主要研究方向：森林资源经营管理。Email: 13859409961@163.com　地址：350000 福建省福州市仓山区建新镇上下店路 15 号福建农林大学林学院。
**责任作者:** 刘金福，教授。主要研究方向：森林资源经营管理。Email: fjljf@fafu.edu.cn　地址：同上。
**本刊网址:** http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

［**Result**］Gap size significantly affected the decomposition of recalcitrant litter components ($p < 0.001$). The decomposition of tannins in leaf litter in large forest gaps was the fastest, while in non forest gaps, it was the slowest; the tannin decomposition of branch litter in small forest gaps was the fastest, while in medium forest gaps, it was the slowest; the total phenolic decomposition of leaf litter in large forest gaps was the fastest, while in small forest gaps, it was the slowest; the total phenolic decomposition of branch litter in the central forest gaps was the fastest, while it was the slowest in non forest gaps. ［**Conclusion**］Forest gaps significantly influence the decomposition of litter tannins and total phenolics by modifying understory microenvironmental factors such as canopy openness and soil temperature. These findings advance our understanding of soil ecological balance and material cycling in forest ecosystems.

**Key words:** forest gap; litter decomposition; tannin; total phenol; *Castanopsis kawakamii*

凋落物作为森林生态系统主要碳库，其分解过程是森林碳循环和养分平衡的重要途径[1]。单宁和总酚是凋落物难降解物质的主要组成部分，也是影响凋落物分解后期进程的关键因子。单宁通过与蛋白质或纤维素形成沉淀，或氧化缩合成难降解复合物，抑制凋落物分解；同时，单宁还能通过化学沉淀抑制分解酶的活性，间接影响分解进程[2]。总酚作为衡量凋落物质量损失的重要指标[3]，在分解后期，在土壤酶和微生物新陈代谢共同作用下缓慢降解。综上，研究森林生态系统凋落物分解进程时，有必要分析单宁和总酚的变化规律。

凋落物难降解物质释放过程受凋落物自身特性、林分环境、土壤微生物等生物与非生物因素的综合作用影响[4]。研究表明，凋落叶与凋落枝在单宁和总酚的分解速率上存在差异[5]。凋落叶较凋落枝质地更薄，分解过程更易受外界环境影响。此外，二者元素含量的差异也直接影响了分解速率。凋落物分解对林分环境较为敏感，较高的土壤温度和湿度有助于维持土壤微生物活性，促进难降解物质分解；而土壤 pH 值过高或过低则会抑制微生物活性，降低分解速率[6]。在分解后期，土壤微生物群落作为森林土壤有机质分解的主要参与者[7]，对林下环境变化响应迅速，能够显著影响凋落物分解速率[8]。

林窗作为森林生态系统中普遍存在的中小尺度干扰，是物质循环和群落演替的重要驱动力[9]。林窗增强了林下光照强度，同时因冠层截留功能的减弱，增强了降水对地表凋落物的淋溶作用，提高了地表土壤温度，改善了林内小气候环境[10]。林窗也间接改变了与单宁和总酚分解相关的微生物活性[11]，为凋落物难降解物质的分解提供了有利的环境条件。然而，影响林窗凋落物难降解物质分解的关键因子尚不明确，这限制了对分解机制的深入理解。

亚热带常绿阔叶林是我国分布广泛、树种组成丰富的特有植被类型，在水土保持和生物多样性保护等生态功能方面具有重要地位[12]。三明格氏栲（*Castanopsis kawakamii*）天然林拥有约 700 $hm^2$ 以格氏栲为主要树种的典型亚热带常绿阔叶林[13]。林内格氏栲种群多由百年以上成熟大树组成，林冠层出现严重断层，并形成大量天然林窗[14]。前期研究发现，林窗通过改变森林微环境异质性、土壤微生物功能多样性和植物群落多样性，导致凋落物质量损失，并改变了易分解物质的释放过程[15−16]。然而，目前林窗异质性环境对凋落物难降解物质释放的直接或间接影响尚不清楚。为此，本研究在不同大小的格氏栲天然林窗中，对混合凋落叶和凋落枝开展了为期 1 年的凋落袋分解试验，探究林窗对凋落叶和凋落枝单宁与总酚分解的影响，并揭示影响难降解物质释放的主要因子。本研究拟解决以下科学问题：（1）凋落叶和凋落枝的难分解物质（单宁、总酚）分解对林窗大小的响应是否存在差异？（2）如何量化林窗异质环境和土壤微生物多样性对凋落物单宁与总酚分解的贡献？

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区域概况

三明格氏栲自然保护区位于福建省三明市莘口镇（117°27′09″ ~ 117°30′02″E，26°10′02″ ~ 26°12′43″N），海拔 180.0 ~ 604.2 m，属低山丘陵区。保护区属于典型的中亚热带季风型气候，年均气温 19 ~ 20 ℃，极端最低温度−6 ℃，最高温度 40 ℃[17]。格氏栲天然林以格氏栲为建群种，群落结构复杂多样，乔木层主要树种为格氏栲、米槠（*Castanopsis carlesii*）和马尾松（*Pinus massoniana*）等[18]。

### 1.2 样地设置

基于前期三明格氏栲天然林林窗样地调查，使用尼康相机搭配鱼眼镜头，在实际林窗中央部位向上拍摄冠层半球形照片，根据半球面影像法计算林窗面积[19]。选择大林窗（LG，> 100 $m^2$）、中林窗（MG，50 ~ 100 $m^2$）、小林窗（SG，30 ~ 50 $m^2$）各 3 个，以林窗边缘木为界限设置样地，在距离林窗样地 10 m

外设置 3 个 10 m × 10 m 的非林窗（NG）样地作为对照。使用 Gap Light Analyzer 2.0 软件计算不同大小林窗的冠层开阔度[20]。

在每个林窗与非林窗中心距离地面 1.5 m 和土层 10 cm 处安置纽扣式温湿度记录仪（DS1923-F50，Maxim Integrated，San Jose，CA，USA），每隔 2 h 自动记录并储存样地空气温湿度和土壤温度数据。通过测量林窗内最大树枝长度，以及边缘木和林窗中心连线上树冠的宽度，计算两者比值，得到偏冠率[21]。林窗样地信息详见表 1。

### 1.3　凋落袋分解试验设计

2018 年 4 月，在林窗与非林窗样地的东、南、西、北、中 5 个方位各设置 1 个 1 m × 1 m 的凋落物收集框，定期收集样品并带回实验室。未受干扰的森林凋落物通常由多个物种组成，本研究主要以格氏栲的叶和枝为研究对象。把样品带回实验室后进行混合，采用蒸馏水清洗表面杂物，随后在 65 ℃ 烘箱中烘 48 h 至质量恒定，以制备凋落物分解袋。分别称取烘干后的凋落叶 20 g 和凋落枝 30 g，装入规格为 20 cm × 20 cm、孔径为 0.5 mm 的尼龙网袋中。剩余样品用于测定初始单宁与总酚含量。2018 年 5 月底，在各方位凋落物框周围设置凋落物分解小样方，清理地表枯枝落叶后，每个小样方放置 6 袋凋落叶分解袋和 6 袋凋落枝分解袋，共计 360 袋凋落叶网袋与 360 袋凋落枝网袋。放置时确保分解袋间隔 2 cm 以上，并平铺于地表。样品每 3 个月回收一次，分别在分解 90、180、270 和 360 d 后收集，共取样 4 次。每次取样时，随机从每个小样方中取回 1 袋凋落叶网袋和 1 袋凋落枝网袋，去除网袋上的残留泥土和细根等杂质，装入已标记好的聚乙烯封口袋，带回实验室后用纯水清洗，置于 65 ℃ 烘箱中烘干至质量恒定，用于测定难降解物质含量。

**表 1　林窗研究样地概况**

Tab. 1　Overview of forest gap research sites

| 林窗 | 林窗面积/m² | 冠层开阔度/% | 偏冠率/% | 海拔/m |
|---|---|---|---|---|
| LG1 | 210.56 | 23.93 | 27.25 | 224 |
| LG2 | 200.38 | 31.96 | 33.69 | 211 |
| LG3 | 207.57 | 29.91 | 31.81 | 214 |
| MG1 | 74.22 | 11.56 | 36.39 | 196 |
| MG2 | 50.59 | 17.33 | 35.47 | 214 |
| MG3 | 74.65 | 19.21 | 26.84 | 188 |
| SG1 | 32.11 | 5.67 | 31.51 | 225 |
| SG2 | 31.59 | 7.46 | 39.68 | 203 |
| SG3 | 36.78 | 8.32 | 38.43 | 214 |
| NG1 | | 5.62 | | 221 |
| NG2 | | 5.47 | | 221 |
| NG3 | | 5.53 | | 221 |

注：LG. 大林窗；MG. 中林窗；SG. 小林窗；NG. 非林窗。下同。

### 1.4　凋落物难降解物质测定

用植物粉碎机将烘干的凋落物样品粉碎并过 30 目筛，采用乙醇提取法提取单宁和总酚[15]。用香草醛–盐酸法测定单宁含量[22−23]，福林酚试剂法（F-C 法）测定总酚含量[24]。两次测量中，目标物质含量的减少量与对应时间间隔的比值即为分解速率。

### 1.5　土壤理化性质测定

凋落物袋回收后，收集凋落袋下方 0 ~ 10 cm 土壤样品，用于土壤含水量和土壤真菌微生物多样性测定。

采用环刀法测量土壤含水量[25]。土壤真菌多样性测定：称取 0.5 g 土样，采用十六烷基三甲基溴化铵法提取总 DNA，用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测提取的 DNA 质量。对 ITS 高变区片段进行 PCR 扩增，ITS 扩增引物为 ITS1F（5′-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3′）和 ITS2R（5′-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3′）。使用 Omega 凝胶回收 PCR 产物。使用 NanoDrop 2000 核酸检测仪对 PCR 产物进行定量分析。按照相应比例混合 PCR 产物，利用 Illumina Miseq 平台进行高通量测序。

测序结束后，使用 FLASH v1.2.7 软件对样品的 reads 进行 overlap 拼接，以获得原始 Tags 数据（Raw Tags）。随后，使用 Trimmomatic v0.33 软件过滤 Raw Tags，依据 Qiime v1.9.1 的质量控制流程对 Tags 进行鉴定，去除嵌合体序列，从而得到高质量 Tags 数据。使用 UCHIME v4.2 软件对高质量 Tags 数据进行嵌合体序列的鉴定与去除，最终获得有效数据[26]。通过 Uparse 7.0.1090 软件对有效数据中的非重复序列进行去除处理。最后，通过 Alpha 多样性分析，计算每个样本在 97% 相似度水平下的 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数，以此评估土壤真菌多样性的复杂性[27]。

### 1.6　数据统计与分析

首先对数据进行正态性检验，随后分别以凋落枝和凋落叶为研究对象，采用双因素方差分析（因素为林窗大小和分解时间），探讨其对单宁和总酚分解的影响。为揭示林窗环境因子、土壤真菌指数与凋落物单宁、总酚分解之间的相关性，将冠层开阔度、林窗偏冠率、空气温度、空气湿度、土壤温度、土壤含水量、土壤真菌 ACE 指数、Chao1 指数、Shannon-Wiener 指数和 Simpson 指数等作为解释变量，凋落物难降解物质作为响应变量，采用“linkET”包中的

mantel_test 函数计算矩阵间的相关性。

为阐明驱动凋落叶与凋落枝单宁和总酚分解变化的主要因子，采用冗余分析建立响应变量（单宁、总酚）与解释变量（各影响因子）之间的线性关系模型，量化解释变量对响应变量变异的解释比例，从而识别关键驱动因子。为避免解释变量间的共线性，剔除方差膨胀因子（variance inflation factor，VIF）> 10 的影响因子，并用“StepAIC”法筛选出赤池信息量准则最低的模型作为最优模型。剔除共线性后的自变量包括冠层开阔度、空气温度、空气湿度、土壤温度、土壤含水量、ACE 指数和 Shannon-Wiener 指数，以凋落物难降解物质为响应变量，采用“vegan”包 rda 函数构建不同大小林窗凋落物单宁、总酚分解与影响因子的冗余分析模型。利用“lavvan”包 sem 函数构建结构方程模型，用“semPlot”包中 semPaths 函数绘制模型路径，以解释林窗、环境因子及土壤真菌对凋落物难降解物质的分解驱动机制。由于非林窗并非完全郁闭林分，采用冠层开阔度代替林窗面积进行相关分析。以上分析均在 R 4.4.0 版本中进行，采用“ggplot2”包对结果实现可视化。

## 2 结果与分析

### 2.1 林窗与非林窗微环境因子变异

不同大小林窗的冠层开阔度、空气温度、土壤温度和土壤含水量随林窗面积增加呈上升趋势，而土壤 ACE 指数、Chao1 指数和 Shannon-Wiener 指数随林窗面积增加变化不显著（表 2）。

### 2.2 不同大小林窗各分解时期凋落物单宁变化

双因素方差分析表明，林窗大小、凋落物分解时间均极显著影响凋落叶与凋落枝单宁含量（$p < 0.001$），且林窗大小与分解时间的交互效应对凋落叶单宁含量影响极显著（$p < 0.001$）（表 3）。在分解初期，凋落叶与凋落枝的单宁分解速率最快，随着分解时间推移，单宁分解速率逐渐减缓（表 4）。大林窗凋落叶单宁分解速率最快，而非林窗分解速率最慢；小林窗凋落枝单宁分解速率最快，而中林窗分解速率最慢。随分解时间增加，不同大小林窗内凋落物单宁含量均呈下降趋势，且在 90 d 时下降最明显。总体来看，凋落叶单宁分解速率高于凋落枝。

### 2.3 不同大小林窗各分解时期凋落物总酚变化

双因素方差分析表明，林窗大小、凋落物分解时间均极显著影响凋落叶与凋落枝总酚含量（$p < 0.001$），且林窗面积与分解时间的交互效应对凋落叶总酚含量影响极显著（$p < 0.001$）（表 5）。分解初期，凋落叶与凋落枝总酚分解速率最快，随着分解时间推移，总酚分解速率逐渐减缓（表 6）。其中，大林窗凋落叶总酚分解速率最快、小林窗分解速率最慢；中林窗凋落枝总酚分解速率最快，而非林窗分解速率最慢。随分解时间增加，各林窗凋落物总酚含量呈下降趋势，且在 90 d 时下降最明显。总体来看，凋落叶总酚分解速率高于凋落枝。

### 2.4 凋落物难降解物质与环境因子分析

Mantel-test 结果表明（图 1），格氏栲天然林林窗与非林窗内凋落叶单宁含量与土壤温度呈显著正相

**表 2 不同大小林窗的环境因子与土壤真菌多样性差异**

Tab. 2 Differences in environmental factors and soil fungal diversity among forest gaps of varied sizes

| 林窗 | 冠层开阔度/% | 空气温度/℃ | 空气湿度/% | 土壤温度/℃ | 土壤含水量/(g·kg$^{-1}$) | ACE指数 | Chao1指数 | Simpson指数 | Shannon-Wiener指数 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 大林窗 | 28.60a | 25.15a | 90.08b | 24.38a | 302.77a | 580.38a | 586.37a | 0.11a | 3.59a |
| 中林窗 | 16.04b | 25.20a | 85.34c | 24.25a | 280.72b | 597.26a | 603.43a | 0.05b | 4.05a |
| 小林窗 | 7.70c | 24.91b | 90.14b | 23.40b | 277.90b | 595.21a | 598.50a | 0.07ab | 3.84a |
| 非林窗 | 5.47d | 24.27b | 91.75a | 23.01c | 269.56b | 633.10a | 631.37a | 0.04b | 4.23a |

注：同组不同字母表示差异性显著（$p < 0.05$）。下同。

**表 3 林窗大小和分解时间与凋落物单宁含量的双因素方差分析**

Tab. 3 Two way ANOVA results for the effects of forest gap size and decomposition time on litter tannin contents

| 组分 | 因子 | 自由度 df | $F$ | $p$ |
|---|---|---|---|---|
| 凋落叶 | 林窗大小 | 3 | 11.396 | < 0.001 |
| | 分解时间 | 4 | 160.873 | < 0.001 |
| | 林窗大小 × 分解时间 | 12 | 3.252 | < 0.001 |
| 凋落枝 | 林窗大小 | 3 | 7.819 | < 0.001 |
| | 分解时间 | 4 | 20.960 | < 0.001 |
| | 林窗大小 × 分解时间 | 12 | 1.720 | 0.068 |

**表 4　不同大小林窗凋落物单宁含量随分解时间变化**

Tab. 4　Variation of litter tannin content with decomposition time in forest gaps of varied sizes　　g/kg

| 组分 | 林窗 | 分解时间/d | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 90 | 180 | 270 | 360 |
| 凋落叶 | LG | 14.00 ± 3.78a | 4.46 ± 1.77a | 3.54 ± 1.21a | 3.47 ± 1.01a | 2.21 ± 0.64a |
| | MG | 10.67 ± 2.95b | 3.93 ± 1.22a | 2.61 ± 1.14b | 2.31 ± 0.55b | 1.80 ± 0.50b |
| | SG | 9.77 ± 3.28b | 3.70 ± 0.64a | 2.58 ± 0.66b | 2.23 ± 0.67b | 1.65 ± 0.43b |
| | NG | 8.22 ± 0.52b | 4.08 ± 0.40a | 3.18 ± 0.64ab | 2.58 ± 0.43b | 1.97 ± 0.58ab |
| 凋落枝 | LG | 10.71 ± 7.25a | 5.30 ± 3.02a | 3.94 ± 2.80a | 2.47 ± 1.67ab | 2.75 ± 0.90a |
| | MG | 5.01 ± 2.67b | 2.02 ± 1.37b | 2.20 ± 0.49b | 2.02 ± 0.52b | 1.97 ± 0.67b |
| | SG | 10.79 ± 6.74a | 4.03 ± 2.40a | 3.20 ± 1.34ab | 2.87 ± 0.92a | 2.09 ± 0.85b |
| | NG | 5.65 ± 2.38ab | 3.62 ± 1.56ab | 2.79 ± 0.99ab | 1.99 ± 0.07b | 1.74 ± 0.59b |

**表 5　林窗大小和分解时间对凋落物总酚分解的双因素方差分析**

Tab. 5　Two way ANOVA results for the effects of forest gap size and decomposition time on litter total phenol decomposition

| 组分 | 因子 | 自由度 df | *F* | *p* |
|---|---|---|---|---|
| 凋落叶 | 林窗大小 | 3 | 23.512 | < 0.001 |
| | 分解时间 | 4 | 150.727 | < 0.001 |
| | 林窗大小 × 分解时间 | 12 | 2.555 | < 0.001 |
| 凋落枝 | 林窗大小 | 3 | 9.117 | < 0.001 |
| | 分解时间 | 4 | 55.859 | < 0.001 |
| | 林窗大小 × 分解时间 | 12 | 0.865 | 0.583 |

**表 6　不同大小林窗凋落物总酚含量随分解时间变化**

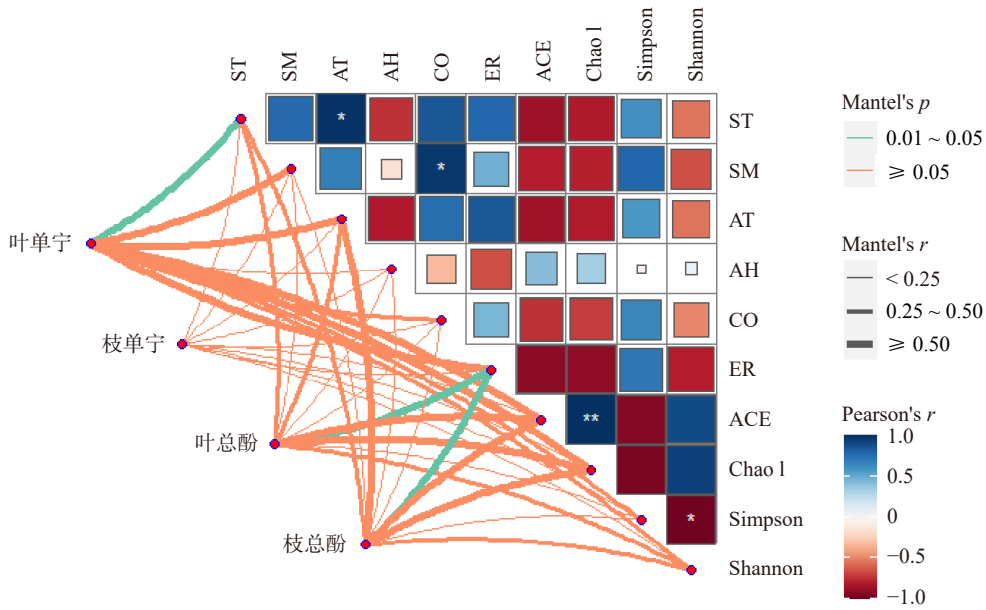
Tab. 6　Variation of litter total phenol contents with decomposition time in forest gaps of varied sizes　　g/kg

| 组分 | 林窗 | 分解时间/d | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 90 | 180 | 270 | 360 |
| 凋落叶 | LG | 24.20 ± 3.16a | 14.09 ± 7.48a | 13.99 ± 2.93a | 9.59 ± 4.01a | 5.51 ± 2.10a |
| | MG | 21.71 ± 3.79ab | 10.75 ± 3.32b | 6.34 ± 5.50b | 3.71 ± 2.04b | 3.30 ± 1.77b |
| | SG | 20.20 ± 3.64b | 12.48 ± 2.00ab | 4.32 ± 1.88b | 3.92 ± 1.49b | 3.61 ± 1.75b |
| | NG | 21.93 ± 1.16ab | 11.03 ± 1.20b | 8.03 ± 1.28ab | 5.78 ± 1.44b | 3.82 ± 1.62ab |
| 凋落枝 | LG | 14.85 ± 4.54a | 10.21 ± 3.43b | 9.64 ± 3.49a | 6.43 ± 3.38b | 5.05 ± 1.64a |
| | MG | 14.03 ± 3.96a | 11.23 ± 2.56ab | 7.99 ± 3.13b | 4.81 ± 1.75b | 3.25 ± 1.75b |
| | SG | 16.40 ± 2.71a | 12.94 ± 2.78a | 11.01 ± 2.30a | 8.46 ± 2.39a | 5.90 ± 2.37a |
| | NG | 13.59 ± 3.37a | 10.28 ± 3.25ab | 8.85 ± 2.12ab | 7.15 ± 1.31ab | 6.17 ± 1.49a |

关($p < 0.05$)，凋落叶、枝的总酚含量均与偏冠率呈显著正相关($p < 0.05$)。土壤温度、偏冠率可能是驱动凋落物单宁、总酚分解变化的潜在因子。

冗余分析表明(图 2)，林窗异质环境、土壤微生物多样性对凋落叶单宁含量解释量为 73.00%，对凋落枝单宁含量解释量为 72.25%，对凋落叶总酚含量解释量为 75.60%，对凋落枝总酚含量解释量为 63.97%。凋落叶单宁含量与林窗冠层开阔度呈正相关，与土壤 ACE 指数、Shannon-Wiener 指数呈负相关；凋落枝单宁含量与林窗冠层开阔度呈正相关，与空气温度呈负相关；凋落叶总酚含量与土壤含水量呈正相关，与 Shannon-Wiener 指数呈负相关；凋落枝总酚含量与空气湿度、土壤温度呈正相关。

基于结构方程模型(图 3)的分析结果，林窗对环境因子、土壤真菌以及凋落物难降解物质有直接正向影响，同时也通过环境因子和土壤真菌间接作




ST. 土壤温度；SM. 土壤含水量；AT. 空气温度；AH. 空气湿度；CO. 林窗冠层开阔度；ER. 偏冠率；ACE. 土壤真菌 ACE 指数；Chao1. 土壤真菌 Chao1 指数；Shannon. 土壤真菌 Shannon-Wiener 指数；Simpson. 土壤真菌 Simpson 指数。下同。绿色线代表显著相关，橙色线条代表无显著相关关系，线条粗细代表相关性大小。*表示 $p < 0.05$，**表示 $p < 0.01$。

图 1 凋落物分解过程中单宁、总酚含量与影响因子相关性分析

Fig. 1 Correlation analysis between tannin and total phenolic contents with their influencing factors during litter decomposition process

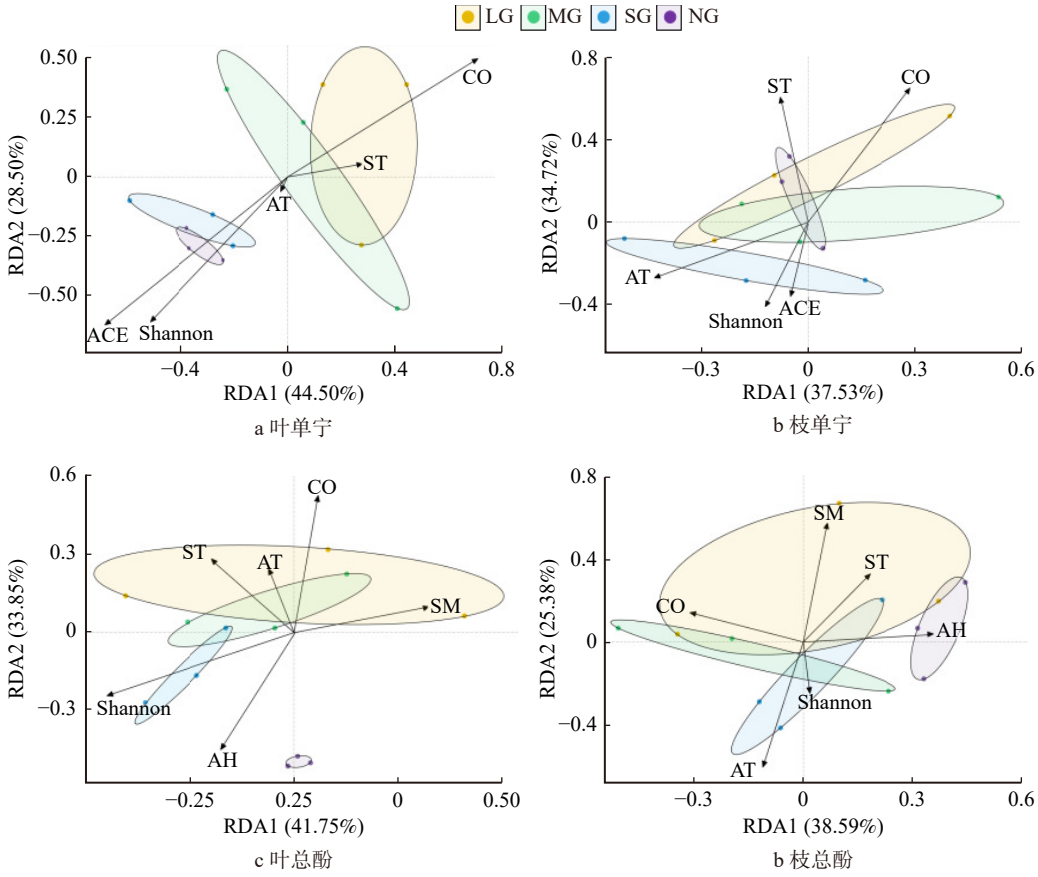
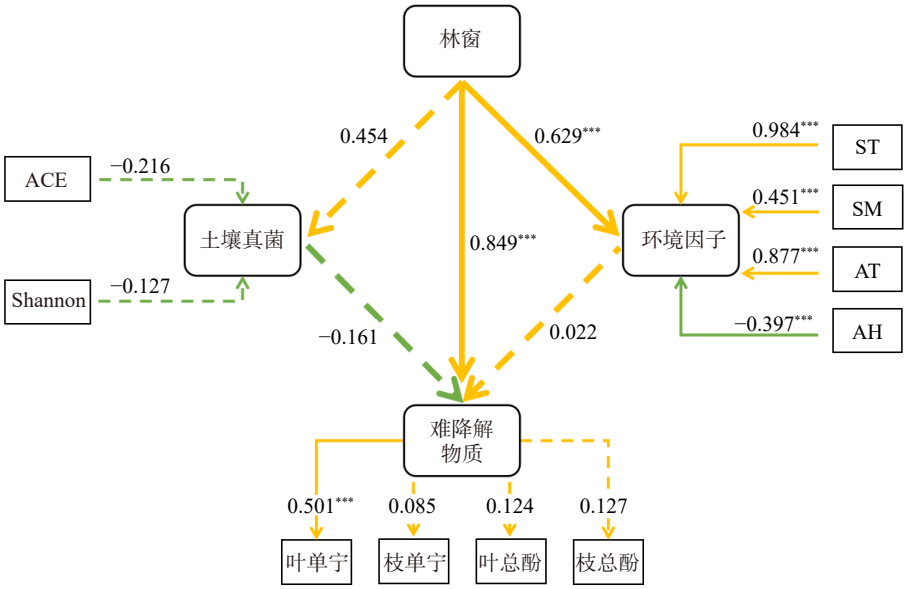



图 2 不同大小林窗下凋落物单宁、总酚含量与影响因子的冗余分析

Fig. 2 Redundancy analysis of litter tannin and total phenolic contents with their influencing factors in different size of canopy gaps

用于凋落物难降解物质。具体表现为空气温度、土壤温度、土壤含水量对凋落物难降解物质分解起正效应，而空气湿度、土壤真菌 ACE 指数和 Shannon-Wiener 指数则起负效应。




GFI > 0.9，CFI > 0.9，NFI > 0.9，RMSEA < 0.10

箭头上的值表示标准路径系数，黄色、绿色、实线和虚线箭头分别表示正相关关系、负相关关系、显著相关和不显著相关。GFI. 拟合优度指数；CFI. 比较拟合指数；NFI. 规范拟合指数；RMSEA. 近似误差均方根。

图 3　林窗大小和林下微环境对叶片与枝条凋落物单宁及总酚分解的驱动机制

Fig. 3　Driving mechanism of gap size and understory microclimate regulating the decomposition of tannins and total phenolics in leaf and branch litter

## 3　讨　　论

### 3.1　林窗凋落物单宁分解特征

凋落物中单宁等高分子物质分解是一个缓慢的过程。林窗通过改善林内微环境，间接调控凋落物难降解物质的分解过程[28]。研究表明，林窗促进凋落物单宁分解，这可能是因为不同大小林窗通过改变林内水热资源条件，影响分解者的活性，从而一定程度上促进凋落物分解[29]。在整个凋落物分解过程中，大林窗凋落叶单宁分解速率显著高于其他林窗，主要源于林窗形成的生态环境异质性。结构方程模型显示，冠层开阔度通过提升空气与土壤温湿度加速凋落物单宁分解，大林窗形成的高温高湿环境有效促进了这一过程。该结论与 Canessa 等[30]研究结果一致。小林窗凋落枝单宁分解速率最高，这可能与凋落叶单宁多为可溶性酚类物质有关，其分解更易受外界环境驱动[3]。Mantel 检验进一步证实，土壤温度对凋落叶单宁具有显著调控作用，大林窗促进土壤温度增加，加速了林内凋落叶单宁分解进程。相比之下，凋落枝单宁依赖土壤真菌长期作用，常形成难分解的复合物。小林窗稳定的微环境更利于土壤真菌定殖[31]。凋落物分解前期，格氏栲天然林大林窗凋落叶单宁分解速率最快，主要归因于不同林窗对雨水淋溶作用的差异。该阶段正处于降水繁多的生长季（5—9 月），也是淋溶作用最为显著的时期。大林窗减少了冠层对降雨的截留，使更多降水直接作用于凋落物层，从而增强了淋溶效应，促进单宁快速分解。

### 3.2　林窗凋落物总酚分解特征

总酚也是凋落物难降解物质的重要组成部分，对凋落物分解过程以及森林生态系统物质流动和养分循环具有重要作用[10]。在凋落物整个分解阶段，大林窗凋落物总酚分解速率高于非林窗，中林窗凋落物总酚分解速率高于小林窗。这可能与不同大小林窗导致的水热资源差异有关。随林窗面积增加，冠层对光照和降水阻截减弱，光降解和淋溶作用增强，间接加快凋落物总酚分解。冗余分析显示，土壤温度和含水量与凋落物总酚含量显著相关，进一步证实了大林窗高温高湿的微环境有利于凋落物总酚分解。这与 Aomiao 等[32]研究结果一致。与土壤温度促进凋落物总酚分解相反，空气温度与凋落枝总酚分解呈负相关。这可能是因为空气温度升高导致湿度减小，从而抑制微生物生长和酶活性。

整个分解过程中，凋落叶单宁、总酚分解速率大于凋落枝，这主要因为凋落叶质地轻薄易分解，凋落枝厚实透水性差[11]。在分解前期，凋落叶和枝总酚分解速率达到最大值，且大林窗中分解速率最快。这一结果与结构方程模型的结论一致，表明较大的林窗通过增强淋溶作用和改善温湿条件，对难降解物质的分解起到了关键作用。

林窗通过改变光照强度和时间，间接影响林下土壤微生物环境，进而影响凋落物难降解物质分解[3]。林窗冠层开阔度与偏冠率是凋落叶总酚、单宁分解的主要驱动因子。结构方程模型结果表明，土

壤微生物多样性与凋落物难降解物质分解无显著相关性，这可能是因为林窗减少了凋落物输入和植物根系分泌物，导致微生物代谢底物供应不足[33]。

## 4 结　　论

林窗大小显著影响凋落物难降解物质的含量。大林窗凋落叶的单宁分解最快，而非林窗最慢；小林窗凋落枝的单宁分解最快，中林窗最慢；大林窗凋落叶总酚的分解最快，小林窗最慢；中林窗凋落枝总酚的分解最快，非林窗最慢。凋落叶单宁和总酚分解速率始终大于凋落枝。林窗通过调控环境因子影响难降解物质的分解，其中冠层开阔度的影响最为显著，土壤温度显著影响单宁分解，偏冠率在总酚分解中起重要作用，而土壤微生物多样性的影响相对较小。综上所述，林窗通过改变冠层开阔度和土壤温度等环境因子，调控了凋落物难降解物质的分解。这为解析森林土壤物质循环的生态调控途径提供了新的理论视角。

## 参 考 文 献


[1] 侯卓男, 李欣彤, 张新军, 等. 海拔和坡向对色季拉山高山杜鹃凋落物分解的影响 [J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(4): 264−273.
Hou Z N, Li X T, Zhang X J, et al. Effects of elevation and slope orientation on litter decomposition of *Rhododendron simsii* in Mount Segrila[J]. Journal of China Agricultural University, 2024, 29(4): 264−273.

[2] Hartzfeld P W, Forkner R, Hunter M D, et al. Determination of hydrolyzable tannins (gallotannins and ellagitannins) after reaction with potassium iodate[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2002, 50(7): 1785−1790.

[3] 杜婷, 陈玉莲, 毕境徽, 等. 林窗对川西亚高山凋落叶总酚和缩合单宁损失动态的影响 [J]. 植物生态学报, 2023, 47(5): 660−671.
Du T, Chen Y L, Bi J H, et al. Effects of forest gap on losses of total phenols and condensed tannins of foliar litter in a subalpine forest of western Sichuan, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(5): 660−671.

[4] 梁艺凡. 亚热带人工林凋落物层细根对凋落叶分解的影响及机制 [D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
Liang Y F. Subtropical plantation litter layer fine roots on litter decomposition effects and mechanisms[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2020.

[5] Guo C, Tuo B, Ci H, et al. How detritivores, plant traits and time modulate coupling of leaf versus woody litter decomposition rates across species[J]. Journal of Ecology, 2023, 111(1): 227−239.

[6] 吴邦利. 枯落物分解响应喀斯特生境异质性和季节变化研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
Wu B L. Litter decomposition response karst habitat heterogeneity and seasonal variation research[D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.

[7] Dong X D, Gao P, Zhou R, et al. Changing characteristics and influencing factors of the soil microbial community during litter decomposition in a mixed *Quercus acutissima* Carruth. and *Robinia pseudoacacia* L. forest in northern China[J]. Catena, 2021, 196: 104811.

[8] Yin Q L, Wu J Q, Wang X, et al. Deepened snow cover accelerates litter decomposition by stimulating microbial degradation[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2024, 193: 109402.

[9] Scharenbroch B C, Bockheim J G. Impacts of forest gaps on soil properties and processes in old growth northern hardwood hemlock forests[J]. Plant and Soil, 2007, 294(1−2): 219−233.

[10] 张艳, 张丹桔, 张健, 等. 马尾松人工林林窗大小对两种凋落叶难降解物质含量的影响 [J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 785−796.
Zhang Y, Zhang D J, Zhang J, et al. *Pinus massoniana* plantation gap size on two litter types difficult-to-degrade substance content effects[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2015, 39(8): 785−796.

[11] Chen J J, Zhu J, Wang Z W, et al. Canopy gaps control litter decomposition and nutrient release in subtropical forests[J]. Forests, 2023, 14(4): 673.

[12] Chen S, Jiang C, Bai Y, et al. Effects of forest gap on soil microbial communities in an evergreen broad-leaved secondary forest[J]. Forests, 2022, 13(12): 2015.

[13] 刘金福, 洪伟, 樊后保, 等. 中国珍稀格氏栲林的数量特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2002, 8(1): 14−19.
Liu J F, Hong W, Fan H B, et al. China rare *Castanopsis kawakamii* forest quantitative characteristics[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2002, 8(1): 14−19.

[14] 陈博, 江蓝, 谢子扬, 等. 格氏栲天然林林窗植物物种多样性与系统发育多样性 [J]. 生物多样性, 2021, 29(4): 439−448.
Chen B, Jiang L, Xie Z Y, et al. *Castanopsis kawakamii* natural forest gap plant species diversity and phylogenetic diversity[J]. Biodiversity Science, 2021, 29(4): 439−448.

[15] 冯雪萍. 格氏栲天然林林窗凋落物与土壤的生态化学计量特征研究 [D]. 福州: 福建农林大学, 2017.
Feng X P. *Castanopsis kawakamii* natural forest gap litter and soil ecological stoichiometry characteristics research[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2017.

[16] 王雪琳, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栲林窗土壤微生物群落功能多样性季节动态特征 [J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(7): 77−88.
Wang X L, Liu J F, He Z S, et al. *Castanopsis kawakamii* gap soil microbial community functional diversity seasonal dynamics characteristics[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2020, 42(7): 77−88.

[17] He Z S, Liu J F, Su S J, et al. Effects of forest gaps on soil properties in *Castanopsis kawakamii* nature forest[J]. PLoS One, 2015, 10(10): 141203.

[18] He Z S, Wang L J, Jiang L, et al. Effect of microenvironment on

species distribution patterns in the regeneration layer of forest gaps and non-gaps in a subtropical natural forest, China[J]. Forests, 2019, 10(2): 90.

[19] 胡理乐, 李俊生, 吴晓莆, 等. 林窗几何特征的测定方法 [J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1911−1919.
Hu L L, Li J S, Wu X P, et al. Forest gap geometric characteristics measurement method[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1911−1919.

[20] Xu J, Xue L, Su Z. Impacts of forest gaps on soil properties after a severe ice storm in a *Cunninghamia lanceolata* stand[J]. Pedosphere, 2016, 26(3): 408−416.

[21] 何亚平, 费世民, 徐嘉, 等. 川西南山地云南松林窗边界木偏冠现象与影响因素 [J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 66−71.
He Y P, Fei S M, Xu J, et al. Southwest Sichuan mountain *Pinus yunnanensis* forest gap border tree crown eccentricity phenomenon and influencing factors[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2007, 29(6): 66−71.

[22] Price M L, Van S S, Butler L G. A critical evaluation of the vanillin reaction as an assay for tannin in sorghum grain[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1978, 26(5): 1214−1218.

[23] 李春阳, 许时婴, 王璋. 香草醛−盐酸法测定葡萄籽, 梗中原花青素含量的研究 [J]. 食品科学, 2004, 25(2): 157−161.
Li C Y, Xu S Y, Wang Z. Vanillin-hydrochloric acid method determination grape seed, stem proanthocyanidins content research[J]. Food Science, 2004, 25(2): 157−161.

[24] 杨亚丽, 呼天明, 刘洪瑜, 等. 普那菊苣总酚提取工艺的研究 [J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 156−159.
Yang Y L, Hu T M, Liu H Y, et al. Puna chicory total phenolics extraction process research[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 156−159.

[25] 姚佳峰, 郭钰, 董媛, 等. 枯落物厚度对华北落叶松人工林天然更新的影响 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(4): 1025−1032.
Yao J F, Guo Y, Dong Y, et al. Litter thickness on *Larix principis-rupprechtii* plantation natural regeneration effects[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4): 1025−1032.

[26] Haas B, Gevers D, Earl A M, et al. Chimeric 16S rRNA sequence formation and detection in sanger and 454-pyrosequenced PCR amplicons[J]. Genome Research, 2011, 21(3): 494−504.

[27] Hortal J, Borges P A V, Gaspar C. Evaluating the performance of species richness estimators: sensitivity to sample grain size[J]. Journal of Animal Ecology, 2006, 75(1): 274−287.

[28] Lenk A, Richter R, Kretz L, et al. Effects of canopy gaps on microclimate, soil biological activity and their relationship in a European mixed floodplain forest[J]. Science of the Total Environment, 2024, 941: 173572.

[29] Li X, Zhang D, Zhang Y, et al. Forest gap size can efficiently promote litter decomposition and nutrient release in south-western China[J]. Southern Forests: a Journal of Forest Science, 2019, 81(2): 185−194.

[30] Canessa R, van den Brink L, Saldana A, et al. Relative effects of climate and litter traits on decomposition change with time, climate and trait variability[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(1): 447−458.

[31] Thirunavukkarasu A, Hedenström M, Sparrman T, et al. Unraveling the dynamics of lignin chemistry on decomposition to understand its contribution to soil organic matter accumulation[J]. Plant Soil, 2024, 505(1−2): 1−18.

[32] Aomiao W, Rui Y, Xu Z F, et al. Forest gaps slow lignin and cellulose degradation of fir (*Abies faxoniana*) twig litter in an alpine forest[J]. Geoderma, 2022, 424: 116010.

[33] Schliemann S A, Bockheim J G. Influence of gap size on carbon and nitrogen biogeochemical cycling in northern hardwood forests of the Upper Peninsula, Michigan[J]. Plant and Soil, 2014, 377(1−2): 323−335.

（责任编辑　孟　瑶　李　契
责任编委　刘世荣）