

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.009

# 土壤动物对黔中地区喀斯特森林凋落物分解的影响

邓承佳, 袁 访, 卜通达, 梁 红, 宋理洪\*

(贵州大学农学院, 贵州 贵阳 550025)

**摘要:** [目的] 揭示土壤动物在喀斯特森林凋落物分解中的作用, 深入认识喀斯特生态脆弱区植物-土壤系统养分循环过程。[方法] 采用凋落物袋法, 以贵州中部地区喀斯特森林优势木本和草本植物凋落物(白茅、圆果化香树和翅荚香槐)为研究对象, 进行持续 1 年的原位分解, 通过排序分析、随机森林模型等多元统计分析方法, 探究不同体型土壤动物群落对森林凋落物分解的影响。[结果] 不同处理间凋落物质量损失率差异显著, 草本植物凋落物白茅质量损失率最高, 木本植物凋落物翅荚香槐损失率最低。一定范围内, 凋落物质量损失率与碳氮比成反比。土壤动物平均增加了 24.89% 的凋落物分解, 中小型土壤动物作用(15.34%)大于大型土壤动物作用(9.55%); 土壤动物对凋落物分解的贡献率在分解前期较后期大。从凋落物袋中共捕获土壤动物 13 733 头, 分属 21 个类群, 优势类群为蜚蠊目和弹尾目; 随机森林模型结果显示, 前气门亚目、长角蜉目、短角蜉目、伪蝎目、中气门亚目、蚁甲科在凋落物分解中起到关键性作用。[结论] 除草本植物外, 黔中喀斯特森林凋落物分解速率与碳氮比成反比。土壤动物在凋落物的分解中具有重要作用, 且在分解前期贡献较大。

**关键词:** 凋落物; 土壤动物; 分解特征; 土壤动物贡献率; 喀斯特森林

**中图分类号:** S718.5

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2022)03-0072-10

凋落物分解是连接地上和地下生态过程的重要纽带, 也是森林生态系统中营养元素循环的关键环节<sup>[1-3]</sup>。凋落物分解是植物向土壤提供养分的基本生态过程, 分解速率受凋落物 C/N 值、分解者群落和植被类型等的影响<sup>[4-6]</sup>。伴随凋落物的分解, 植物养分逐渐回归到土壤中, 因而凋落物质量损失速率及分解过程在维持土壤肥力方面起着关键作用<sup>[7]</sup>。

土壤动物是生存在土壤中和凋落物叶下的各种动物的总称, 是森林生态系统的重要组成部分, 调控土壤生态过程重要的生物驱动因子, 对生态系统功能和稳定性具有重要作用<sup>[8]</sup>。土壤动物通过其繁殖、生长等生命活动提高植物—土壤动物—土壤系统中营养物质的循环速率, 在养分循环中非常关键<sup>[9]</sup>。土壤动物首先会对凋落物进行破碎、对植物残体进

行粉碎由此增加碎屑表面积, 其次通过摄食、分泌排泄物等方式改善土壤微环境, 间接促进微生物的生长, 以此直接、间接地促进凋落物的分解<sup>[10-11]</sup>。土壤动物促进植物凋落物分解的同时, 其群落格局也受凋落物基质的变化而发生改变<sup>[12]</sup>。凋落物分解中不同体型土壤动物也发挥着不同作用, 中小型土壤动物在植物凋落物破碎化和增加凋落物质量损失等方面具有重要作用; 大型土壤动物则通过取食、排泄和掘穴等生命活动, 促进养分元素的循环<sup>[13-14]</sup>。García-Palacios 等<sup>[15]</sup>的研究结果表明, 全球尺度上土壤动物平均可增加 27% 的凋落物质量损失; 其中, 热带旱生林和热带湿润雨林中分别增加了 22% 和 32%, 针叶林中增加了 13%, 落叶林中增加了 21%, 农业生态系统中增加了 30%。以往关

收稿日期: 2021-12-16 修回日期: 2021-12-23

基金项目: 国家自然科学基金(41807055); 贵州省科技厅项目(黔科合后补助[2020]3001)

\* 通讯作者: 宋理洪, 博士, 副教授。主要研究方向: 土壤生态。Email: lihong\_song@qq.com

于森林凋落物分解的研究主要集中在北方长白山地区以及西部的四川地区等地<sup>[16-19]</sup>。近年来, 关于我国喀斯特森林凋落物分解的研究有一些报道, 但对土壤动物在其中作用的认识还不够深入。

本研究以黔中地区喀斯特森林优势植物为对象, 开展土壤动物对凋落物分解的影响研究。将深入喀斯特森林养分循环、土壤动物多样性及其生态功能的认识。本研究拟采用凋落物袋分解法, 调查木本植物(圆果化香树、翅荚香槐)、草本植物(白茅)及其混合凋落物的分解特征和土壤动物群落在其中的作用, 拟重点解决以下问题: ①黔中喀斯特森林不同 C/N 值凋落物的分解特征(质量损失率); ②黔中喀斯特森林凋落物分解过程中土壤动物群落组成特征; ③不同体型土壤动物对凋落物分解的贡献。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

试验小区位于中国科学院地球化学研究所普定喀斯特生态系统定位观测研究站附近(105°45'31"E, 26°21'35"N; 海拔: 1 197 m); 属亚热带季风湿润气候, 冬无严寒, 夏无酷暑, 全年气候温和, 雨量充沛。年均日照时数 1 164.9 h, 无霜期 301 d, 年平均气温 15.1 °C, 年平均降水 1 378.2 mm。该区森林以次生常绿和落叶阔叶混交林为主。优势树种包括圆果化香树(*Platycarya longipes* Wu)、翅荚香槐(*Cladrastis platycarpa* (Maxim.) Makino)、云南鼠刺(*Itea*

*yunnanensis* Franch.) 和窄叶石栎(*Lithocarpus onfinis* Huang)等; 草本主要有白茅(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)、千里光(*Senecio scandens* Buch-Ham.) 和矛叶荩草(*Arthraxon lanceolatus* (Roxb.) Hochst.)等<sup>[20-21]</sup>。

### 1.2 样品布设及样地设置

2019年10月于样地附近收集新鲜凋落物。其中, 木本植物圆果化香树和翅荚香槐采集新鲜凋落叶, 草本植物白茅采集当年干枯的茎叶。将采集到的凋落物分装、带回实验室洗净风干。按表1设置草本植物凋落物、木本植物凋落物和混合凋落物处理, 共5种。5种处理凋落物初始 C/N 值见表1。其中, 草本植物白茅的茎 C/N 值为 100.44±2.42、叶 C/N 值为 33.61±1.53。按表1称取 6.00±0.01 g 凋落物, 装入尺寸 15 cm × 20 cm、孔径分别为 0.01 mm、2 mm、和 4 mm 的凋落物袋中(凋落物袋近地面孔径均为 0.01 mm, 大气接触面为上述相应孔径)。0.01 mm 凋落物袋排除所有土壤动物; 2 mm 凋落物袋允许中小型土壤动物进入; 4 mm 凋落物袋允许大型、中小型土壤动物进入<sup>[22]</sup>。2020年1月在研究区域分别选取5个约 100 m<sup>2</sup>、分布均匀、距离适中、养分光照等相似的样地(5次重复), 将分装好的凋落物袋随机摆放在样地中, 使其接近凋落物凋落后的自然环境。每样地中放置5种凋落物处理的3种孔径凋落物袋各5袋(总计: 5次采样 × 5样地重复 × 5凋落物组合 × 3孔径=375袋), 布设完样地后随即进行第一次采样, 将第一次采集凋落物袋带回实验室计算路途损耗量。

表1 试验处理

Table 1 Experimental treatments

处理 Treatment	物种名称 Species name	质量 Mass/g	C/N值 C/N ratio
I	白茅(IC)	6.00	70.05±2.04
II	圆果化香树(PL)	6.00	37.40±0.91
III	翅荚香槐(CP)	6.00	39.61±1.98
IV	圆果化香树 + 翅荚香槐(PL + CP)	3.00 + 3.00	39.10±0.75
V	圆果化香树 + 翅荚香槐 + 白茅(PL + CP + IC)	2.00 + 2.00 + 2.00	50.23±3.82

(注: 表中数值为平均值±标准误, n=5; 各类型组合均为完整叶放入凋落物袋混合)

### 1.3 凋落物样品的采集处理与土壤动物分离鉴定

分别于2020年的1月2日、4月15日、7月27日、10月10日, 2021年1月13日将凋落物样品取回。每次采样, 分别在5个重复样地中取

3种网孔5种凋落物组合的凋落物袋各一袋(5凋落物组合 × 3孔径 × 5重复=75袋)。采用Tullgren干漏斗法分离中小型土壤动物, 手捡法采集大型土壤动物。参考《中国土壤动物检索图鉴》<sup>[23]</sup>, 鉴定

到目或科水平并计数；在土壤动物分离完成后，将凋落物样品置于 60 °C 恒温烘箱，烘干至恒质量并记录。

#### 1.4 数据统计与分析

根据各类群土壤动物个体数量占总数量的百分比来划分数量等级，个体数占总数 10.0% 以上的土壤动物为优势类群，1.0%~10.0% 土壤动物为常见类群，1.0% 以下土壤动物为稀有类群<sup>[23]</sup>。

凋落物质量损失率  $L_c$  (%)、土壤动物对凋落物质量损失的贡献率  $C_f$  (%) 等计算公式如下：

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

$$C_f = L_f / L_t \times 100\%$$

$$C_{fb} = C_{fa} - C_{fm}$$

式中， $L_c$  为质量损失率， $M_0$  为初始凋落物质量 (g)， $M_t$  为经时间  $t$  后的凋落物残留量 (g)； $C_f$  为土壤动物贡献率； $L_f$  为土壤动物引起的凋落物质量损失 (所有土壤动物时，4 mm 孔径内与 0.01 mm 孔径内凋落物质量损失之差；中小型土壤动物时，2 mm 孔径内与 0.01 mm 孔径内凋落物质量损失之差)； $L_t$  为全部质量损失 (所有土壤动物时，即为 4 mm 孔径内凋落物质量损失；中小型土壤动物时，即为 2 mm 孔径内凋落物质量损失)； $C_{fb}$  为大型土壤动物贡献率， $C_{fa}$  为所有土壤动物贡献率， $C_{fm}$  为中小型土壤动物贡献率。

采用单因素方差分析及最小显著差异法比较不同分解期内各孔径凋落物袋内的凋落物质量损失率、中小型和大型土壤动物对黔中地区喀斯特森林凋落物质量损失率的贡献，采用主坐标分析 (PCoA) 研究不同孔径凋落物袋土壤动物群落结构特征。使用随机森林模型 (Random forest) 评估土壤动物不同类群对凋落物质量损失贡献的重要程度及其显著性。数据统计分析与作图采用 R 语言，“multicomp”“rFPermute”“ggplot2”等程序包完成。

## 2 结果

### 2.1 黔中喀斯特森林优势植物凋落物分解特征

5 种处理凋落物质量损失率均随分解时间延长逐渐升高 (图 1)。分解初期 (1 月至 4 月) 与分解末期 (10 月至次年 1 月) 各处理凋落物质量损失率增长幅度均相对平缓，分解中期 (4 月至 7 月、7 月至 10 月) 凋落物质量损失率增长幅度较大。在 4 次采样中，不同处理间凋落物分解速率

均表现出显著差异 ( $P < 0.05$ , 图 1)。原位分解 1 年后，草本植物白茅凋落物质量损失率最高 (处理 I, 50.58%)，草本、木本植物混合凋落物损失率居中 (处理 V, 39.04%)，木本植物凋落物翅荚香槐损失率最低 (处理 III, 38.15%)；凋落物分解速率总体表现为草本植物凋落物较木本植物凋落物分解快 (图 1)。

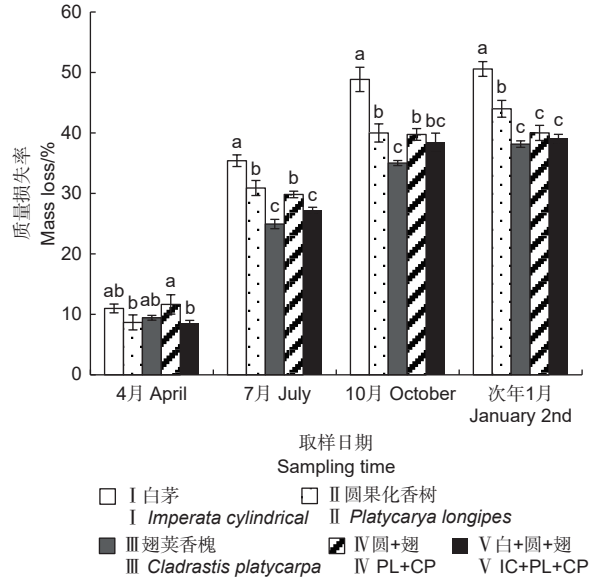
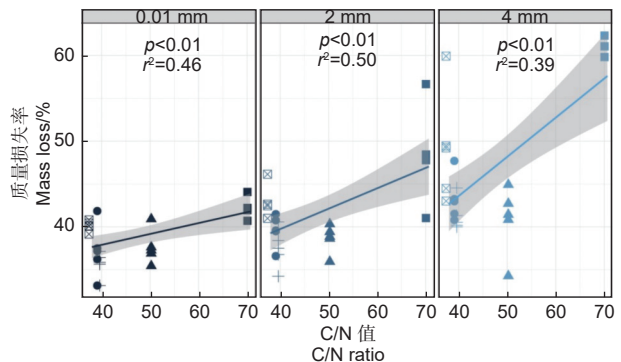


图 1 白茅、圆果化香树、翅荚香槐及其混合凋落物的质量损失率

Fig. 1 Litter mass loss rate. I, *Imperata cylindrical* (IC); II, *Platycarya longipes* (PL); III, *Cladrastis platycarpa* (CP); IV, PL + CP; V, IC + PL + CP.

凋落物的 C/N 与其质量损失率的回归分析结果显示，凋落物质量损失率与凋落物初始 C/N 正相关 (图 2)。排除含草本 (白茅) 凋落物的

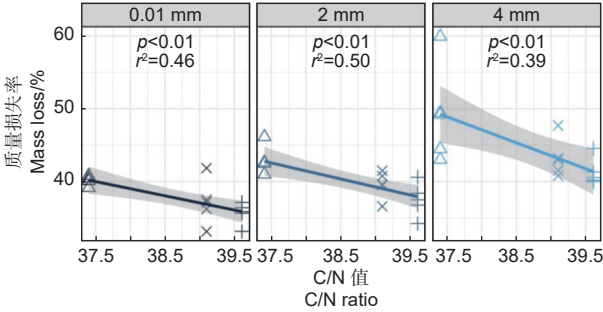


“□”为圆果化香树，“+”为翅荚香槐，“■”为白茅，“●”为圆果化香树 + 翅荚香槐，“▲”为白茅 + 圆果化香树 + 翅荚香槐

图 2 凋落物 C/N 比与质量损失率回归分析

Fig. 2 Regression analysis graph of C/N ratio and mass loss rate

处理 (处理 I、处理 V) 进一步分析结果显示, 凋落物质量损失率与其初始 C/N 值显著负相关 ( $P < 0.01$ ): 损失率在碳氮比为 37.40 的处理 II 圆果化香树时最高, 达 43.99%; 损失率在碳氮比为 39.61 的处理 III 翅荚香槐时最低, 为 38.15% (图 3)。



“△”为圆果化香树, “+”为翅荚香槐, “×”为圆果化香树 + 翅荚香槐)

图 3 3 种类型凋落物 C/N 比与质量损失率回归分析 (不含白茅)

Fig. 3 Regression analysis graph of C/N ratio and mass loss rate without *Imperata cylindrica*

## 2.2 凋落物分解过程中土壤动物群落特征

试验期凋落物袋内, 共捕获到土壤动物 13 733 头, 隶属于 21 个类群。其中, 2 mm 网孔凋落物袋中共收集到土壤动物 6 840 头, 隶属于 21 个类群, 优势类群为前气门亚目、中气门亚目、甲螨亚目以及长角蚋目, 共占总个体数的 87.79%; 常见类群为膜翅目、鞘翅目和环总科, 共占总个体数的 7.19%; 稀有类群 14 类, 共占总个体数的 5.01% (表 2)。4 mm 网孔凋落物袋中共收集到土壤动物 6 893 头, 隶属于 21 个类群, 其中优势类群为前气门亚目、中气门亚目、甲螨亚目和长角蚋目, 共占总个体数的 85.97%; 常见类群为膜翅目、鞘翅目、蜘蛛目和环总科, 共占总个体数的 9.52%; 稀有类群 13 类, 共占总个体数的 4.51% (表 2)。

PCoA 分析结果显示 (图 4): 凋落物分解袋内, 土壤动物群落结构仅在不同采样时期 (即, 凋落物分解不同阶段) 具有显著差异 ( $P < 0.01$ ),

表 2 不同孔径网袋凋落物中土壤动物统计

Table 2 Composition of groups and individuals of soil fauna in different-sized meshes during litter decomposition

土壤动物名称 Soil fauna species name	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>		圆果化香树 <i>Platycarya longipes</i>		翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i>		圆+翅 PL+CP		白+圆+翅 IC+PL+CP		汇总 Individual number				多度 Abundance		
	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	2 mm	4 mm	
个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	个体数	百分比	个体数	百分比	个体数	百分比
前气门亚目 Prostigmata	457	375	392	363	546	438	537	602	431	481	2 363	34.55	2 259	32.77	+++	+++	
中气门亚目 Mesostigmata	236	363	281	268	495	344	350	421	420	435	1 782	26.05	1 831	26.56	+++	+++	
甲螨亚目 Oribatida	145	76	121	148	234	234	202	245	180	192	882	12.89	895	12.98	+++	+++	
愈腹亚目 Symphypleona	11	9	8	3	6	9	20	6	8	16	53	0.77	43	0.62	+	+	
长角蚋目 Entomobryomorpha	115	158	179	184	318	226	199	211	167	162	978	14.30	941	13.65	+++	+++	
短角蚋目 Neelipleona	3	9	20	3	17	19	17	6	7	27	64	0.94	64	0.93	+	+	
等足目 Isopoda	0	0	2	0	4	6	10	7	1	2	17	0.25	15	0.22	+	+	
锯谷盗科 Silvanidae	3	1	5	5	4	8	8	1	3	2	23	0.34	17	0.25	+	+	
双翅目幼虫 Diptera-larvae	7	13	10	10	13	7	11	16	11	13	52	0.76	59	0.86	+	+	
膜翅目 Hymenoptera	15	9	57	142	16	12	163	171	34	67	285	4.17	401	5.82	++	++	
鞘翅目 Coleoptera	36	14	11	17	29	25	23	21	21	23	120	1.75	100	1.45	++	++	

续表 2

土壤动物名称 Soil fauna species name	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>		圆果化香树 <i>Platycarya longipes</i>		翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i>		圆+翅 PL+CP		白+圆+翅 IC+PL+CP		汇总 Individual number				多度 Abundance	
	2 mm 个体数	4 mm 个体数	2 mm 个体数	4 mm 个体数	2 mm 个体数	4 mm 个体数	2 mm 个体数	4 mm 个体数	2 mm 个体数	4 mm 个体数	2 mm 个体数	百分比	4 mm 个体数	百分比	2 mm	4 mm
伪蝎目 Pseudoscorpiones	3	9	1	2	6	4	5	5	4	7	19	0.28	27	0.39	+	+
蜈蚣目 Scolopendromorpha	0	0	0	2	1	3	2	0	0	1	3	0.04	6	0.09	+	+
叶甲科 Chrysomelidae	1	0	2	4	2	1	0	1	3	1	8	0.12	7	0.10	+	+
蜈蚣科 Scolopendrelidae	0	3	0	1	2	2	3	2	1	2	6	0.09	10	0.15	+	+
鳞翅目幼虫 Lepidoptera-larvae	1	2	2	1	1	3	0	1	8	7	12	0.18	14	0.20	+	+
蜘蛛目 Araneae	7	10	14	20	14	9	15	20	8	10	58	0.85	69	1.00	+	++
姬马陆目 Julida	0	5	5	4	6	6	3	6	1	4	15	0.22	25	0.36	+	+
环总科 Cricone-matoidea	5	22	1	12	25	12	45	20	11	20	87	1.27	86	1.25	++	++
蚁甲科 Pselaphidae	1	2	0	2	1	0	0	1	3	1	5	0.07	6	0.09	+	+
蟹科 Termitidae	3	1	1	3	1	7	0	0	3	7	8	0.12	18	0.26	+	+
	1 049	1 081	1 112	1 194	1 741	1 375	1 613	1 763	1 325	1 480	6 840	100	6 893	100.00		

(表中土壤动物为所有分解阶段的总个体数; +++优势类群, 占总数的10%以上; ++常见类群, 占总数的1%~10%; +稀有类群, 占总数的1%以下)

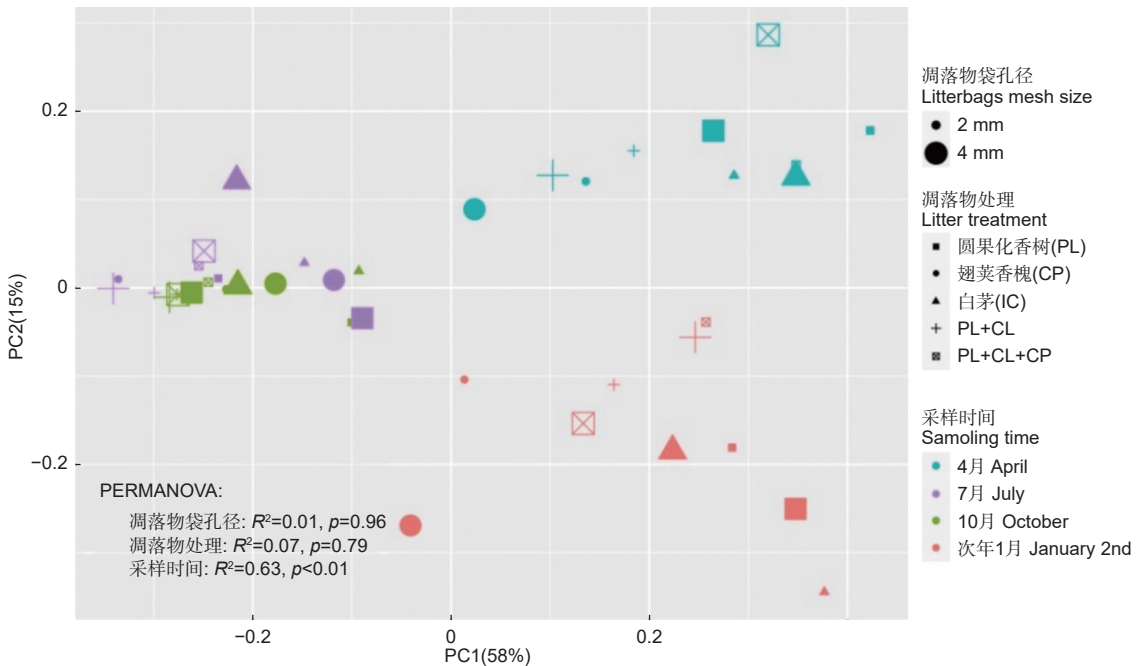


图 4 土壤动物群落 PCoA

Fig. 4 PCoA plot of soil fauna community

而不同孔径和不同凋落物处理的凋落物袋中, 土壤动物群落结构差异不显著 ( $P > 0.05$ )。土壤动物个体数在不同孔径凋落物袋中的差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 在不同取样时间 (不同分解阶段) 差异显

著 ( $P < 0.01$ , 表 3); 土壤动物类群数在不同孔径凋落物袋和不同取样时间中的差异均不显著 ( $P > 0.05$ , 表 4)。

表 3 凋落物分解过程中不同孔径凋落物袋和不同取样时间土壤动物个体数量双因素方差分析

Table 3 Statistic results of soil fauna individuals under different mesh size litterbags and sampling time

变异来源 Source of variation	$p$				
	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	圆果化香树 <i>Platycarya longipes</i>	翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i>	圆+翅 PL+CP	白+圆+翅 IC+PL+CP
孔径 Mesh	0.018	0.950	0.559	0.953	0.484
取样日期 Sampling time	0.011	0.005	0.183	<0.001	<0.001
孔径×取样日期 Mesh×Sampling time	0.100	0.381	0.104	0.751	0.979

表 4 凋落物分解过程中不同孔径凋落物袋和不同取样时间土壤动物类群数量双因素方差分析

Table 4 Statistic results of soil fauna group numbers under different mesh size litterbags and sampling time

变异来源 Source of variation	$p$				
	白茅 <i>Imperata cylindrica</i>	圆果化香树 <i>Platycarya longipes</i>	翅荚香槐 <i>Cladrastis platycarpa</i>	圆+翅 PL+CP	白+圆+翅 IC+PL+CP
孔径 Mesh	0.518	0.031	0.376	0.977	0.187
取样日期 Sampling time	0.095	0.496	0.254	0.747	0.278
孔径×取样日期 Mesh×Sampling time	0.736	0.506	0.512	0.258	0.762

### 2.3 喀斯特生境土壤动物对凋落物分解的贡献

经 1 年原位分解, 0.01 mm、2 mm 和 4 mm 孔径凋落物袋内的凋落物质量损失率分别为 38.56%、41.36% 和 47.14%, 差异显著 ( $P < 0.05$ , 图 5), 土壤动物作用显著。土壤动物对凋落物质量损失率的贡献为 24.89%; 其中, 中小型土壤动物对凋落物质量损失的贡献率平均为 15.34%

(11.41%~17.59%), 大型土壤动物对植物凋落物质量损失贡献率平均为 9.55% (6.83%~13.39%) (图 6)。在 4 月的样品采集中, 中小型土壤动物对 5 种凋落物质量损失率的贡献显著大于大型土壤动物的贡献 ( $P < 0.05$ ); 另外 3 次的样品采集中, 中小型土壤动物与大型土壤动物对凋落物质量损失率的贡献无显著差异 ( $P > 0.05$ ); 总体上, 土壤动物对凋落物分解的贡献率在分解前期较后期大 (图 6)。

随机森林模型结果显示: 前气门亚目、长角蚋目、短角蚋目、伪蝎目、中气门亚目和蚁甲科等 6 个类群依次在黔中地区喀斯特森林凋落物的分解中起重要作用 (图 7,  $P < 0.05$ )。

### 3 讨论与分析

凋落物分解是受凋落物质量、分解者群落等多种生态因子调控的物理和化学过程<sup>[22, 24]</sup>。决定分解速率的重要因子之一是凋落物的 C/N 值, 凋落物的初始 C/N 值越低, 分解越快<sup>[25-27]</sup>。本研究中, 草本凋落物白茅 (处理 I) 在整个分解时期质量损失

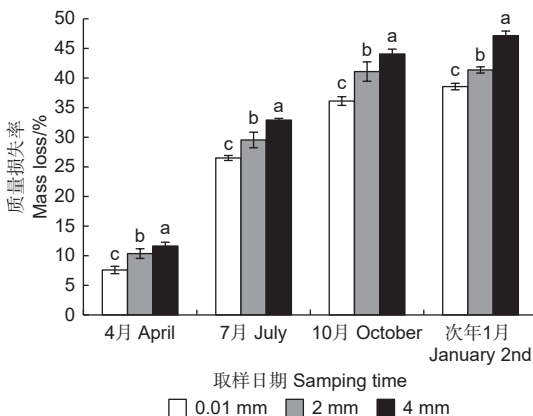


图 5 不同孔径凋落物袋中凋落物质量损失率

Fig. 5 Mass loss rate of litters in different-mesh-size litterbags

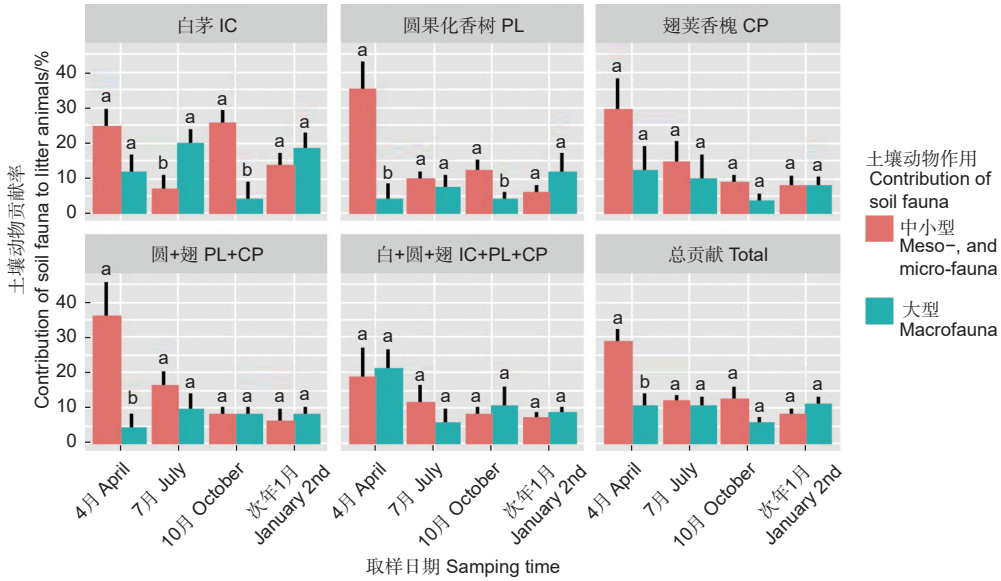


图 6 中小型、大型土壤动物对凋落物分解的贡献率

Fig. 6 Contribution of soil fauna to litter decomposition. I, *Imperata cylindrica* (IC); II, *Platycarya longipes* (PL); III, *Cladrastis platycarpa* (CP); IV, PL + CP; V, IC + PL + CP.

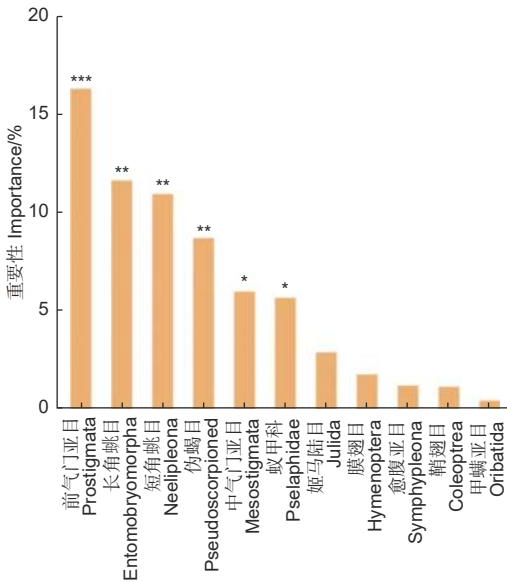


图 7 随机森林模型中土壤动物各类群的重要性

Fig. 7 Random forest (RF) mean predictor importance (percentage of increase of mean square error) of various groups of soil fauna. \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$ , \*\*\*  $P < 0.001$ .

率比其他处理均较高，但其初始 C/N 值明显高于其他处理（表 1，图 1）。相关分析结果显示，凋落物质量损失率与凋落物初始 C/N 正相关（图 2）。笔者发现，白茅分解过程中叶片损失较多（原位分解 1 年后，几乎全部分解）、茎损失较少。可能的原因是草本植物白茅叶片的 C/N 值（33.61）较低、茎的 C/N 值（100.44）较高，因而分解初期

叶片被快速分解损失，产生较高的质量损失率。赵红梅等<sup>[28]</sup>在准噶尔盆地对 5 种草本植物凋落物的研究也显示：叶片 C/N 值（19~53）< 茎 C/N 值（39~136），叶片损失速率较茎的损失速率快。排除含白茅凋落物的处理进一步分析发现，凋落物质量损失率与其初始 C/N 值显著负相关（ $P < 0.01$ ，图 3）。表明除白茅以外，一定范围内 C/N 值较低的凋落物质量损失率则越高。Frouz 等<sup>[29]</sup>研究显示，当凋落物的 C/N 值小于 20 时，其分解速率能达到一个很高水平。而过高的 C/N 值会抑制微生物的活性，降低参与凋落物分解的土壤节肢动物密度和类群数量，从而导致凋落物分解较慢<sup>[18, 30]</sup>。

本研究中，捕获的土壤动物优势类群为螨目和弹尾目（表 2）。这两类土壤动物食性广，主要取食植物凋落物碎屑、细菌以及真菌，少部分亦捕食其他小型土壤动物<sup>[31]</sup>。整个研究期间，2 mm、4 mm 两种孔径凋落物袋中土壤动物群落组成相似，可能的原因主要是：①大型土壤动物（如膜翅目、蜘蛛目、蜈蚣目、姬马陆目等），其捕食或取食行动是短暂性的，且有些土壤动物只在阴暗条件或者夜间才出来活动<sup>[32]</sup>，而本研究均在白天取回凋落物袋，这在一定程度上减少了凋落物袋内大型土壤动物的捕获数量；②大型土壤动物活动能力强，在野外进行样品收集时，它们可能已经从凋落物袋中逃逸<sup>[13]</sup>；③中小型土壤动物在所捕获的土壤动物类群中占绝大部分，且在数量上占有绝对优势。

土壤动物是凋落物分解中至关重要的生物因子<sup>[33]</sup>。本研究结果显示,土壤动物对黔中地区喀斯特森林凋落物质量损失的贡献率为24.89%;其中,中小型土壤动物11.41%~17.59%(平均15.34%),大型土壤动物6.83%~13.39%(平均9.55%)。表明黔中喀斯特地区大型和中小型土壤动物对森林凋落物分解都有较大贡献,这与在长白山<sup>[22]</sup>开展的研究结果相似。中小型土壤动物(蝉螨目与弹尾目)往往是各研究区的优势类群,同时也是影响凋落物分解的主要类群(表2),它们具有发育良好的口器,能够分解破碎有机物,在凋落物分解过程中起着关键性作用<sup>[34]</sup>,中小型节肢动物迁移能力弱,通常具有很强的生境特化能力,以甲螨亚目为代表的螨类尤为典型<sup>[35]</sup>。由此中小型土壤动物在分解中的贡献率大于大型土壤动物。分解前期(1~4月),新鲜凋落物通常含土壤动物所需的营养物质,凋落物进入生态系统首先经过植食性土壤动物的取食、咀嚼和混合,而后被真菌、细菌侵入,因而土壤动物贡献率较高<sup>[13, 30, 36]</sup>。凋落物分解过程中,营养物质逐渐减少,难以分解的物质(木质素、纤维素等)相对增多,由此分解前期土壤动物贡献作用最大,而后则主要由微生物完成,导致后期土壤动物贡献率较低<sup>[13, 37]</sup>。

随机森林模型结果表明,前气门亚目、长角蜱目、短角蜱目、伪蝎目、中气门亚目和蚁甲科是参与黔中喀斯特森林凋落物分解的关键类群,占据主导地位。中气门亚目、前气门亚目为杂食性土壤动物,食性广;而长角蜱目、短角蜱目、伪蝎目为食菌性食肉性土壤动物,有利于形成更为复杂的食物网<sup>[31-32]</sup>,因而这几类土壤动物在分解中起着重要作用。

## 4 结论

在黔中喀斯特森林,通过土壤动物对区域优势木本和草本植物凋落物分解的研究,主要有以下结论:

(1) 不同凋落物处理间质量损失率差异显著。一定范围内凋落物质量损失率与碳氮比成反比,C/N值越低质量损失率越大。

(2) 凋落物袋中优势类群为蝉螨目和弹尾目,中小型土壤动物在所捕获的土壤动物类群中占有优势。

(3) 土壤动物对凋落物分解的平均贡献率为

24.89%,中小型土壤动物作用(15.34%)>大型土壤动物作用(9.55%),土壤动物在凋落物分解前期的作用较大;前气门亚目、长角蜱目、短角蜱目、伪蝎目、中气门亚目和蚁甲科是参与凋落物分解的关键类群。

## 参考文献:

- [1] Zan P, Sun T, Mao Z. Effects of soil fauna on litter decomposition using field microcosms across 16 co-occurring temperate tree species[J]. *Australian Forestry*, 2021, 84(1): 33-38.
- [2] Song X X, Wang Z K, Tang X L, et al. The contributions of soil mesofauna to leaf and root litter decomposition of dominant plant species in grassland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 155: 103651.
- [3] Yang X, Wang Y T, Xu Q N, et al. Soil fertility underlies the positive relationship between island area and litter decomposition in a fragmented subtropical forest landscape[J]. *Catena*, 2021, 204: 105414.
- [4] Kotze D J, Setälä H. Urbanisation differently affects decomposition rates of recalcitrant woody material and labile leaf litter[J]. *Urban Ecosystems*, 2021, <https://doi.org/10.1007/s11252-021-01125-3>.
- [5] Wang B, Verheyen K, Baeten L, et al. Herb litter mediates tree litter decomposition and soil fauna composition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, doi:10.1016/j.soilbio.2020.108063.
- [6] 潘禹,宋娅丽,王克勤,等.模拟N沉降对滇中亚高山典型森林凋落物分解及土壤微生物的影响[J]. *林业科学研究*, 2021, 34(3): 88-97.
- [7] 罗佳,周小玲,陈建华,等.桉树人工林土壤养分对凋落物分解的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2017, 37(11): 132-139.
- [8] 傅声雷.土壤生态学—土壤食物网及其生态功能[M].北京:科学出版社,2019.
- [9] 殷秀琴,宋博,邱丽丽.红松阔叶混交林凋落物-土壤动物-土壤系统中N、P、K的动态特征[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 128-134.
- [10] Ma C, Yin X Q, Wang H X. Soil fauna effect on *Dryas octopetala* litter decomposition in an Alpine tundra of the Changbai Mountains, China[J]. *Alpine Botany*, 2019, 129(1): 53-62.
- [11] 王媛,王庆贵,孙元,等.土壤动物生态功能与陆地生态系统各环境因子的关系[J]. *中国农学通报*, 2020, 36(23): 54-59.
- [12] 黄玉梅,刘盼,陈莹佳,等.草坪草白三叶枯落物质量损失过程及土壤动物的贡献[J]. *应用与环境生物学报*, 2016, 22(4): 654-659.
- [13] 李艳红,杨万勤,罗承德,等.桉-栎不同混合比例凋落物分解过程中土壤动物群落动态[J]. *生态学报*, 2013, 33(1): 159-167.
- [14] 严珺,吴纪华.植物多样性对土壤动物影响的研究进展[J]. *土壤*, 2018, 50(2): 231-238.
- [15] García-Palacios P, Maestre F T, Kattge J, et al. Climate and lit-



- ter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes[J]. *Ecology Letters*, 2013, 16: 1045-1053.
- [16] Qiu L L, Yin X Q, Jiang Y F. Contributions of soil meso- and microfauna to nutrient release during broadleaved tree litter decomposition in the Changbai Mountains.[J]. *Environmental Entomology*, 2019, 48(2): 395-403.
- [17] Li X Q, Dong W H, Song Y, *et al.* Soil mesofauna participating in driving home-field advantage differ between litter mass loss and nutrient release[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 163: 103909.
- [18] 刘静如, 郭可馨, 谌 亚, 等. 亚热带森林凋落叶分解过程土壤节肢动物群落的变化特征[J]. *生态学报*, 2021, 41 ( 7 ): 2770-2782.
- [19] 蓝丽英, 杨万勤, 吴福忠, 等. 川西亚高山森林土壤动物对杨树和箭竹凋落物分解过程中微生物群落的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30 ( 9 ): 2983-2991.
- [20] 钟巧连, 刘立斌, 许 鑫, 等. 黔中喀斯特木本植物功能性状变异及其适应策略[J]. *植物生态学报*, 2018, 42 ( 5 ): 562-572.
- [21] 贺忠权, 刘长成, 蔡先立, 等. 黔中高原喀斯特常绿与落叶阔叶混交林类型及群落特征[J]. *植物生态学报*, 2021, 45 ( 6 ): 670-680.
- [22] 包剑利, 殷秀琴, 李晓强. 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*, 2015, 35 ( 10 ): 3320-3328.
- [23] 尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [24] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 等. 环境因素对干旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2013, 24 ( 11 ): 3300-3310.
- [25] Pei G T, Liu J, Peng B, *et al.* Nitrogen, lignin, C/N as important regulators of gross nitrogen release and immobilization during litter decomposition in a temperate forest ecosystem[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 440: 61-69.
- [26] Wang Y N, Li F Y, Song X, *et al.* Changes in litter decomposition rate of dominant plants in a semi-arid steppe across different land-use types: Soil moisture, not home-field advantage, plays a dominant role[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2020, 303: 107119.
- [27] Bradford M A, Berg B, Maynard D S, *et al.* Understanding the dominant controls on litter decomposition[J]. *Journal of Ecology*, 2016, 104(1): 229-238.
- [28] 赵红梅, 程军回, 张文太, 等. 古尔班通古特沙漠5种植物凋落物分解特征[J]. *中国沙漠*, 2020, 40 ( 2 ): 165-176.
- [29] Frouz J, Roubířková A, Heděnc P, *et al.* Do soil fauna really hasten litter decomposition? A meta-analysis of enclosure studies[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2015, 68(5): 18-24.
- [30] 刘瑞龙, 李维民, 杨万勤, 等. 土壤动物对川西高山/亚高山森林凋落物分解的贡献[J]. *应用生态学报*, 2013, 24 ( 12 ): 3354-3360.
- [31] 邵元虎, 张卫信, 刘胜杰, 等. 土壤动物多样性及其生态功能[J]. *生态学报*, 2015, 35 ( 20 ): 6614-6625.
- [32] 龙 健, 张明江, 赵 畅, 等. 土壤动物对茂兰喀斯特森林凋落物分解过程中元素释放的作用[J]. *生态学杂志*, 2019, 38 ( 9 ): 2671-2682.
- [33] Lin H, He Z H, Hao J W, *et al.* Effect of N addition on home-field advantage of litter decomposition in subtropical forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2017, 398: 216-225.
- [34] 梁志伟, 红 梅, 德海山, 等. 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*, 2021(12),4279 - 4288. <https://doi.org/10.13287/j.1001-9332.202112.041>.
- [35] 张安宁, 刘任涛, 陈 蔚, 等. 干旱区气候因子对枯落物分解和土壤动物的影响[J]. *干旱区研究*, 2021, 38 ( 3 ): 867-874.
- [36] 徐 璇, 王维枫, 阮宏华. 土壤动物对森林凋落物分解的影响: 机制和模拟[J]. *生态学杂志*, 2019, 38 ( 9 ): 2858-2865.
- [37] 刘佳楠, 常海涛, 赵 娟, 等. 宁夏荒漠草原柠条锦鸡儿枯落物分解特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39 ( 11 ): 4039-4048.

# Influence of Soil Fauna on Litter Decomposition in Central Guizhou Karst Forest

DENG Cheng-jia, YUAN Fang, BU Tong-da, LIANG Hong, SONG Li-hong

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

**Abstract:** [Objective] To reveal the role of soil fauna on litter decomposition in karst forests and understand deeply the nutrients recycling in the plant-soil system in the ecologically fragile karst region. [Method] A one-year field litterbag experiment with local dominant herbaceous and woody species litter, i.e., *Imperata cylindrica* (IC), *Platycarya longipes* (PL), and *Cladrastis platycarpa* (CP), was carried out to study the influence of soil fauna with different body sizes on litter decomposition through ordination analysis and random forest model. [Result] Results showed that litter mass loss rate differed significantly among litter treatments. The highest and lowest mass loss rate was recorded by herbaceous litter (IC) and woody litter (CP), respectively. Litter mass loss rate was negatively correlated with litter C/N values. On average, soil fauna contributed 24.89% to forest litter decomposition, of which the contribution rate of meso-, and micro-fauna to litter decomposition was 15.34%, higher than that of macrofauna (9.55%), Soil fauna mainly contributed to litter mass loss in the early stage of decomposition. A total of 13 733 individuals of soil fauna which belonged to 21 groups were captured in litterbags. Acarina and Collembola were the dominant groups. Prostigmata, Entomobryomorpha, Neelipleona, Pseudoscorpiones, Mesostigmata, and Pselaphidae played a vital role in litter decomposition through random forest model. [Conclusion] In the central Guizhou karst forest, litter mass loss rate is negatively correlated with litter C/N values, except herbaceous litter. Soil fauna has a positive effect on litter decomposition, especially in the early stage of decomposition. **Keywords:** litter; soil fauna; decomposition characteristics; contribution of soil fauna; karst forest

(责任编辑: 崔 贝)