

涂春艳, 黄炳惠, 杨 慧, 等. 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区榿木和马尾松凋落叶分解研究[J]. 中国岩溶, 2018, 37(3): 379-387.  
DOI: 10. 11932/karst20180308

## 桂林毛村岩溶区与碎屑岩区榿木和 马尾松凋落叶分解研究

涂春艳<sup>1,2,3</sup>, 黄炳惠<sup>2,4</sup>, 杨 慧<sup>2,3</sup>, 白 冰<sup>2,3</sup>, 莫碧琴<sup>2,3,4</sup>, 曹建华<sup>2,3\*</sup>

1. 广西师范大学生命科学学院, 广西 桂林 541004;
2. 中国地质科学院岩溶地质研究所/国土资源部、广西岩溶动力学重点实验室, 广西 桂林 541004;
3. 联合国教科文组织国际岩溶研究中心, 广西 桂林 541004;
4. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

**摘 要:**为探究岩溶生态环境对凋落叶分解的影响, 选用碎屑岩区相同树种作为对比, 运用凋落物分解网袋法研究其凋落物分解初期动态, 研究表明: (1) 岩溶区榿木和马尾松凋落叶分解速率总体上均小于碎屑岩区相同树种凋落叶分解速率; (2) 凋落叶分解速率  $k$  与凋落叶初始养分碳含量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与木质素含量呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ); (3) 在凋落叶分解过程中, 各养分释放规律具有一定的差异, 凋落叶养分元素碳在分解过程中呈现出净释放; (4) 岩溶区树种的碳释放速率比碎屑岩区慢, 说明岩溶区两树种的凋落在一定程度上延长了 C 的循环周期。

**关键词:** 岩溶区; 碎屑岩区; 榿木; 马尾松; 凋落叶分解; 养分释放

**中图分类号:** S714      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-4810(2018)03-0379-09

### 0 引 言

凋落物分解作为全球碳平衡的一个关键环节, 其分解快慢影响着碳的循环速率及陆地与大气间的碳分配问题<sup>[1-3]</sup>。通常, 凋落叶的分解受到地理位置、气候条件、凋落叶质量等多种因素的综合调控<sup>[4]</sup>。彭少麟等<sup>[5]</sup>研究认为, 在全球和区域大尺度上, 气候条件是决定性影响因子, 局部范围内, 凋落叶性质是主导因素, 且凋落叶 C/N 和木质素含量被认为是最重要的凋落叶质量因子。陈法霖等<sup>[6]</sup>研究指出, 在相同的土壤和气候条件下, 凋落物初始碳、氮、磷、钾、钙、镁和木质素的含量共同调控凋落叶的分解速率。其中凋落叶分解速率与凋落叶的初始 N、P、K 等浓度显著正相关, 与凋落叶初始 C、木质素的含量、木质素/N、木质素/P、C/N、C/P 呈显著负相关<sup>[7-9]</sup>。可

见, 凋落叶分解速率与凋落叶质量关系密切, 凋落叶质量可以表征凋落叶的相对可分解性, 并依赖于凋落叶中易分解成分与难分解成分的含量及相对比例, 不同研究区域得到的凋落叶初始理化性质与分解速率的关系差别比较大。中国西南岩溶区是我国非常重要的生态功能区, 岩溶生态系统受到岩溶地质条件的制约, 是一个特殊的生态系统<sup>[10-13]</sup>。与碎屑岩区相比, 岩溶区主要由碳酸盐岩组成, 土壤富钙偏碱, 土壤有机质含量高。岩溶区这些特点使生长于岩溶区的植被带有岩溶环境的烙印<sup>[14-16]</sup>。马尾松 (*Pinus massoniana*) 是南方最主要用材树种之一, 具有分布广、速生、丰产、适应能力强、综合利用程度高等特点, 现今马尾松已作为广西水土保持和荒山绿化的常用树种, 是石漠化治理的树种之一<sup>[17-18]</sup>。榿木 (*Loro-*

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(41530316); 广西自然科学基金面上项目(2017GXNSFAA198153); 广西科学研究与技术开发计划项目(桂科能 1598023-1); 科技部政府间科技合作项目(10-18); 国土资源部/广西岩溶动力学重点实验室开放课题(KDL201506)

第一作者简介: 涂春艳(1991-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生态学。

通信作者: 曹建华(1963-), 博士, 研究员, 主要研究方向为岩溶生物地球循环。E-mail: jhcaogl@karst.ac.cn。

收稿日期: 2017-04-26

*petalum chinense*)群落为亚热带岩溶区分布广泛的一种典型次生林类型<sup>[19]</sup>,两树种生态适应性强,在岩溶区与碎屑岩区皆生长良好。因此,本次实验选取两树种作为研究对象,探讨岩溶生境下的凋落叶分解规律及其与碳循环的关系,并与碎屑岩区进行对比,对于了解不同生态系统的物质循环速率及岩溶区植被恢复重建具有重要的意义。

### 1 研究区概况

岩溶区及碎屑岩区都位于桂林市东南部距桂林市区约 30 km 的潮田乡毛村流域内。该流域面积约为 10 km<sup>2</sup>,地理位置范围为 25°10'11"~25°12'30"N, 110°30'00"~110°33'45" E<sup>[20-21]</sup>。各样地之间距离在 2 km 之内,4 个样地概况见表 1。

表 1 样地概况

Table 1 General situation of sampling site

取样区	树种	经纬度	海拔/m	生境
岩溶区	榿木	25°11'58.19" N 110°32'32.77" E	336	以榿木为主的灌木林,有零星乔木(如香樟、圆叶乌桕等)分布,郁闭度>80%
	马尾松	25°11'59.44" N 110°32'38.2" E	365	马尾松树龄在 5~6 年,林下多为蕨类、炸酱草等草本及藤本植物,郁闭度>70%
碎屑岩区	榿木	25°10'51.77"N 110°32'55.84"E	294	以榿木为主的灌木林,夹有木荷、枫树等乔木,郁闭度>80%
	马尾松	25°10'48.93"N 110°33'12.45"E	278	马尾松树龄在 5~6 年,林下有草本,周边有少量盐肤木,郁闭度>80%

岩溶区样地主要分布上泥盆统融县组(D<sub>3r</sub>)纯石灰岩和中泥盆统东岗组(D<sub>2d</sub>)白云岩、石灰岩和云质灰岩,碎屑岩区的地质层为中泥盆统下部(D<sub>1</sub><sup>2</sup>)的一套含 Fe 的砂岩。研究区属于湿热多雨的中亚热带湿润气候,夏季高温、湿热,秋季雨量迅速减少,受东南季风活动影响,降雨存在着时间和空间上的分配不

均,月平均气温为 19.64~20.39 °C,年平均降雨量为 1 949.5 mm,降雨主要集中在 3—8 月,占全年降雨量的 70% 以上<sup>[20-21]</sup>。实验期间年降雨量为 2 828.16 mm(图 1),平均气温为 19.12 °C。降雨主要集中在 4—8 月和 11 月,最高气温出现在 6—9 月。

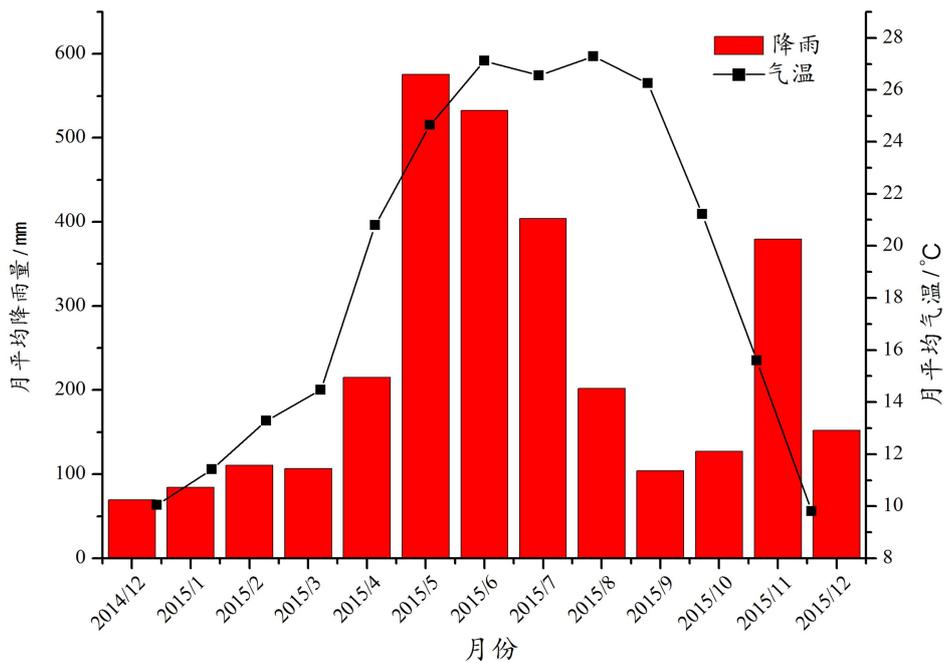


图 1 桂林毛村 2014 年 12 月—2015 年 12 月平均气温和降雨量

Fig. 1 Average temperature and precipitation of Maocun in Guilin from December 2014 to December 2015

## 2 材料与方 法

### 2.1 样品采集及处理

在 2014 年秋季(9—11 月), 两树种落叶期, 用尺寸为 3 m×4 m 的尼龙网, 在离地约 40 cm 的高度收集凋落叶, 拣选出所需的树种凋落叶, 送实验室清洗干净后烘干至恒重, 充分混匀后选取一部分进行粉碎用于凋落叶初始元素分析, 其余用于分解。

### 2.2 实验设计

凋落叶的分解采用野外网袋分解方法, 根据两树种的比叶面积(叶的单面面积与其干重之比)差异, 榿木和马尾松分别选用孔径 1 mm 和 0.5 mm 的尼龙网缝制成 30 cm×20 cm 的分解袋。实验周期 1 年, 每月 1 袋, 每袋凋落叶干重为 15 g, 每个样地内 36 袋, 即每月设置 3 个重复, 四个样地共 144 袋, 于 2014 年 12 月放置于实验样地地表, 与土壤充分接触进行原地分解, 放置前除去 0~10 cm 腐殖层, 目的是避免原有凋落叶层及腐殖质对实验的干扰, 放置分解袋前采集样地内土壤样品做初值分析。于 2015 年 1 月开始, 每月定期取回分解网袋, 仔细去除泥沙等杂质, 烘干至恒重后称重, 计算分解量, 对每个季度回收的样品粉碎保存作养分分析<sup>[22]</sup>。

### 2.3 室内实验

植物凋落叶总碳用浓硫酸—重铬酸钾外加热法滴定; 植物全氮用半微量凯氏定氮法测定; 植物全磷用碱熔—钼锑抗比色法测定; 植物全钾、全钙经氢氟酸—高氯酸消煮后用原子吸收火焰光度法测定; 植物纤维素、木质素用范氏酸性洗涤方法测定。

### 2.4 数据分析

采用 Microsoft Excel2003 整理实验数据, SPSS16.0 软件进行单因素方差分析、差异性分析和相关性分析等数理统计分析, 用 Origin8.5 做图。

(1) 凋落叶分解失重率的大小可以反映凋落叶的分解速率, 失重率越大, 则表示该凋落叶分解速率越快, 凋落叶失重率的计算<sup>[22-23]</sup>:

$$A = \frac{X_0 - X_t}{X_0} \times 100\% \quad (1)$$

凋落叶月分解量:

$$A = X_{t-1} - X_t \quad (2)$$

式中:  $A$  为失重率;  $X_0$  为凋落叶初始质量;  $X_t$  为分解时间  $t$  的凋落叶残留量;  $X_{t-1}$  为分解时间  $t$  前一时间点  $t-1$  的凋落叶残留量。

(2) 由于凋落物的分解周期比较长, 通过短时期的实验手段难以揭示凋落物的分解过程, 而模型则是

凋落物分解的较好研究手段, 在凋落叶分解的时间衰减模型中常常采用 Olson 指数衰减模型模拟凋落叶分解<sup>[24-27]</sup>。通过短期实验所得数据, 利用 Olson 衰减指数模型方程式进行拟合, 得到各树种凋落叶衰减指数方程及分解系数  $k$ :

$$y = X_t / X_0 = ae^{-kt} \quad (3)$$

式中:  $y$  为分解  $t$  时间凋落叶残留量与初始量的比值;  $X_0$  为凋落叶初始质量;  $X_t$  为分解  $t$  时间后的凋落叶残留量;  $t$  为分解的时间;  $a$  为拟合参数;  $k$  为凋落叶年分解系数, 通常称之为分解指数( $k$  值越大, 凋落叶的分解速度越快)。

用  $k$  值来估算各凋落物分解的半衰期:

$$t_{0.5} = \ln 0.5 / (-k) \quad (4)$$

$$t_{0.95} = \ln 0.05 / (-k) \quad (5)$$

式中:  $t_{0.5}$  为凋落叶分解 50% 所需时间(a);  $t_{0.95}$  为凋落叶分解 95% 所需时间(a)。

在已知时间  $t$  和分解系数  $k$  条件下, 利用 Olson 指数衰减模型对凋落叶分解动态进行模拟, 计算分解  $t$  时间后的凋落叶残留量, 得到模拟值:

$$X_t = X_0 e^{-kt} \quad (6)$$

(3) 凋落叶养分释放率<sup>[24-25]</sup>:

$$E = \frac{W_0 C_0 - W_t C_t}{W_0 C_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $E$  为养分释放率;  $W_0$  为凋落叶初始质量;  $C_0$  为凋落叶初始养分浓度;  $W_t$  为分解  $t$  时刻凋落叶残留量;  $C_t$  为分解  $t$  时间凋落叶养分浓度。

## 3 结果与分析

### 3.1 凋落叶失重率及月分解量

凋落叶失重率的大小可以反映凋落叶的分解效率。图 2 显示, 不同地质背景生境下的相同树种间的凋落叶失重率变化趋势基本一致, 相同树种的凋落叶失重率总体上为岩溶区低于碎屑岩区, 榿木凋落叶分解速率快于马尾松凋落叶分解。

对每个月凋落叶分解失去的质量计算, 结果表明(图 3), 凋落叶分解量最大的月份基本集中在 5 月、6 月和 10 月这三个月, 这与全年的降雨量及气温存在一定关联性, 5、6 月降雨量大且气温高, 有利于加速凋落叶的分解。一年分解过程中, 榿木凋落叶分解总量大于马尾松凋落叶分解量, 碎屑岩区树种凋落叶的分解总量基本大于岩溶区树种。1—10 月, 碎屑岩区凋落叶的月分解量基本大于岩溶区, 而 11—12 月则刚好相反。

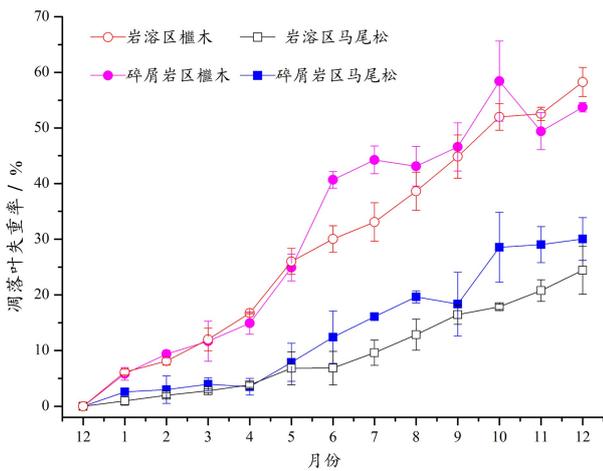


图 2 不同地质背景下凋落叶失重率变化

Fig. 2 Variation of weight loss rate of leaf litter under different geological conditions

### 3.2 凋落叶分解模型

根据 Olson 衰减指数模型建立指数方程,可计算每种凋落叶分解 50%和分解 95%所需要的时间。结

果如表 2 所示,岩溶区和碎屑岩区生境下的榿木树种凋落叶分解系数  $k$  相近,说明两凋落叶分解速率相近;而碎屑岩区马尾松树种的凋落叶分解常数为岩溶区的 1.57 倍,说明碎屑岩区马尾松凋落叶分解速率快于岩溶区;实际测得值与 Olson 衰减指数模型拟合值进行相关性分析,各相关系数均大于 0.9,说明 Olson 衰减指数模型的模拟结果与实际情况较为符合。根据模型对凋落叶分解的衰减期(50%和 95%)进行预测,结果为岩溶区和碎屑岩区榿木凋落叶分解的衰减期所需时间基本接近,即岩溶区与碎屑岩区的榿木凋落叶分解速率基本一致;而马尾松树种的凋落叶分解的半衰期所需时间则为岩溶区长于碎屑岩区。同样,用 Olson 衰减指数模型对分解 50%所需时间的预测结果显示和实际实验结果基本一致,说明用 Olson 衰减指数模型估测基本符合实验实际情况。由于在一年的实验期间凋落物的分解没有达到 95%,因此对分解 95%所需时间的估测是否与最终实际实验结果相符合,在本次实验还不能得到验证,还有待进一步的实验验证。

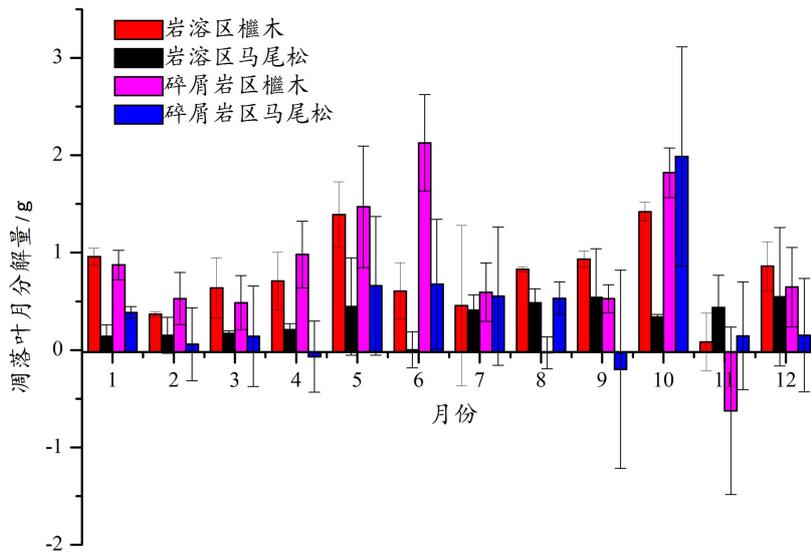


图 3 凋落叶月分解量

Fig. 3 Amount of litter decomposition per month

表 2 凋落叶分解残留率变化的指数方程

Table 2 Exponential equations of changes in leaf litter decomposition residual rates

取样区	树种	模拟方程	相关系数	分解系数	半分解期/a	分解 95%所需时间/a
岩溶区	榿木	$y=1.087e^{-0.91t}$	0.970 2 **	0.91	0.853	3.384
	马尾松	$y=1.038e^{-0.28t}$	0.962 3 **	0.28	2.609	10.832
碎屑岩区	榿木	$y=1.044e^{-0.9t}$	0.933 2 **	0.9	0.818	3.376
	马尾松	$y=1.072e^{-0.44t}$	0.915 8 **	0.44	1.733	6.966

注:  $t$  为分解时间;  $y$  为分解  $t$  时间凋落叶残留量; \*\* 表示极显著相关 ( $P < 0.01$ )。

### 3.3 凋落叶初始养分含量

凋落叶初始元素含量, 又称为凋落叶初始质量参数, 是凋落叶品质的反映, 在一定程度上影响着凋落叶的分解速率和养分释放, 采用凋落叶初始质量指标预测分解速率是凋落叶分解研究的重要内容<sup>[28-29]</sup>。由表 3 可知, 4 种凋落叶初始养分含量中, 总有机碳和木质素含量均较大, 是凋落叶的主要组成成分, 其

次依次为纤维素、N、Ca、K、P。4 种凋落叶的初始养分浓度存在差异, 岩溶区马尾松凋落叶的木质素含量显著高于碎屑岩区马尾松凋落叶。岩溶区榿木凋落叶的 N、P、纤维素显著高于碎屑岩区, C/N、C/P、木质素/N 及木质素/纤维素等比值则显著低于碎屑岩区榿木凋落叶, 其中岩溶区榿木凋落叶 Ca 浓度是碎屑岩区榿木凋落叶的 1.7 倍。

表 3 凋落叶初始养分

Table 3 Initial nutrient content of litter

样品编号	岩溶区		碎屑岩区	
	榿木	马尾松	榿木	马尾松
有机碳/%	34.85±0.81b	44.09±0.28a	35.92±0.52b	43.62±0.43a
全氮/%	5.92±0.19a	5.74±0.14ab	5.15±0.02bc	4.91±0.28c
全磷/%	0.057±0.00a	0.049±0.00b	0.042±0.00c	0.035±0.00d
全钙/%	3.54±0.17a	0.82±0.01c	2.07±0.08b	0.81±0.08c
全钾/%	0.27±0.02a	0.12±0.01b	0.29±0.02a	0.18±0.00b
木质素/%	50.45±0.22c	60.84±1.07a	51.41±0.36c	58.63±0.29b
纤维素/%	22.11±0.73a	19.450±0.33b	18.51±0.54b	18.23±0.46b
C/N	5.71±0.08d	7.71±0.05b	6.94±0.11c	8.87±0.03a
C/P	590.17±5.52c	907.63±14.60b	854.61±22.65b	1248.50±52.46a
木质素/N	8.52±0.54c	10.60±0.75ab	9.98±0.09bc	11.94±0.08a
木质素/纤维素	2.28±0.17b	3.13±0.10a	2.78±0.13a	3.22±0.15a

注: 同一行中不同小写字母表示不同岩性背景下不同树种凋落叶初始含量差异显著( $P < 0.05$ )。

### 3.4 凋落叶养分释放动态

凋落叶养分释放率反映了不同时期凋落叶的养分归还情况, 正值为释放, 负值为固持。4 个实验样地中, 凋落叶养分元素 C 在分解过程中均为持续净释放的状态, 且呈相对稳定的上升态势(图 4A)。前 3 个月释放速度较为平缓, 3—6 月释放最快, 与凋落叶的失重率结果较为一致。且在分解过程中碎屑岩区树种凋落叶的 C 释放速率快于岩溶区相同树种凋落叶的 C 释放, 而相同岩性条件下, 榿木凋落叶的 C 释放快于马尾松凋落叶。4 种凋落叶养分元素 N 的释放规律较为一致(图 4B), 均为先固持后释放。在一年的分解过程中, 榿木树种凋落叶的 P 元素基本表现为净释放(图 4C), 且岩溶区榿木凋落叶 P 元素释放速率大于碎屑岩区榿木凋落叶。4 种凋落叶的

K 元素释放速率表现为先增加后降低(图 4D), 岩溶区榿木凋落叶元素 K 的释放速率大于碎屑岩区榿木凋落叶, 12 月至次年 9 月岩溶区马尾松凋落叶的 K 释放速率均大于碎屑岩区马尾松凋落叶。

### 3.5 凋落叶分解常数与初始养分浓度的相关分析

为研究凋落叶质量与凋落叶分解速率之间的关系, 对凋落叶分解速率常数  $k$  与初始养分含量进行 Pearson 相关分析, 结果如表 4 所示。在凋落叶分解过程中, 凋落叶的分解常数  $k$  与凋落叶初始元素 C 有显著的负相关关系, 与木质素有极显著负相关关系, 而与元素 K 有显著正相关关系, 与 C/N、C/P、木质素/N、木质素/纤维素等比值具有一定的负相关, 但均未达到显著水平, 与凋落叶初始元素 N、P 相关性不显著。

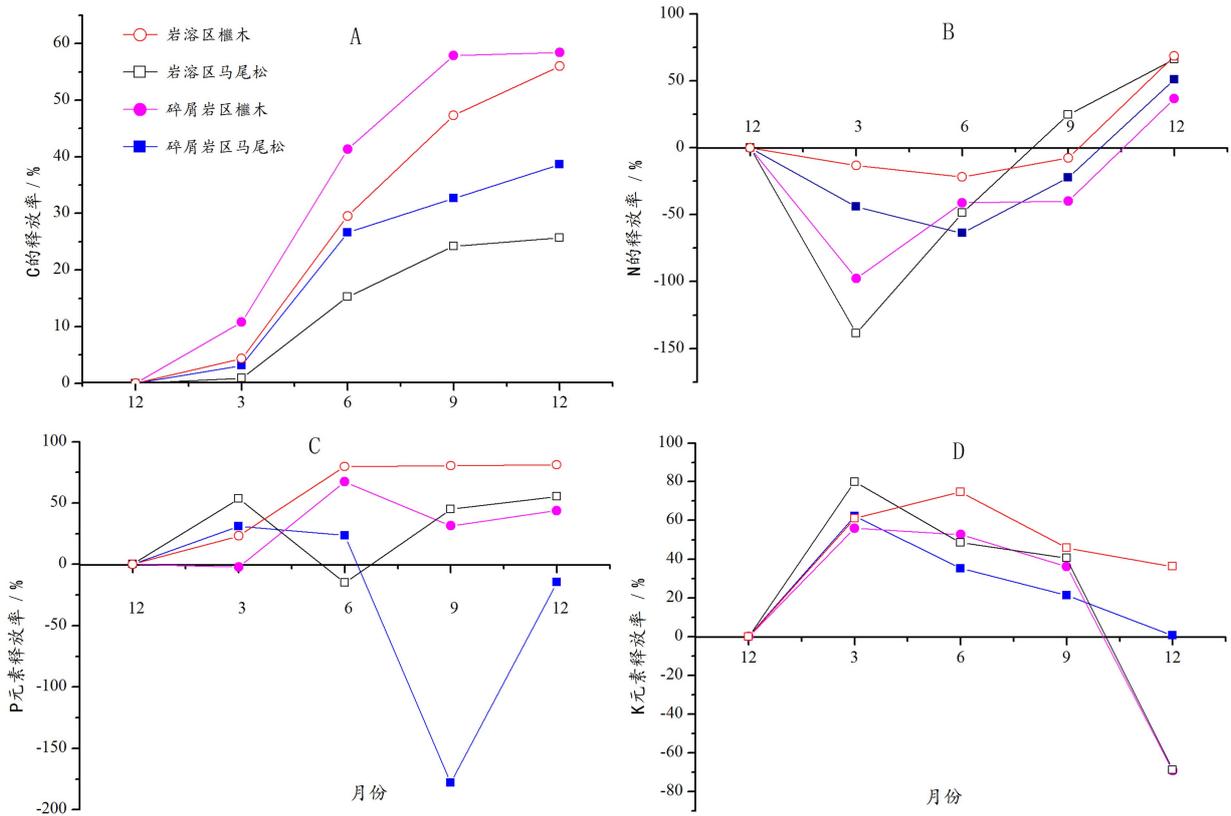


图 4 凋落叶养分元素的释放速率

Fig. 4 Release rate of litter nutrient elements

表 4 凋落叶初始养分浓度与凋落叶分解速率常数(k)的相关性(n=4)

Table 4 Correlation between litter nutrient concentration and initial leaf litter decomposition rate constant (k)

养分	分解常数 k	C	N	P	K	木质素	纤维素	C/N	C/P	木质素/N
C	-0.981 *									
N	0.112	-0.299								
P	0.35	-0.52	0.968 *							
K	0.987 *	-0.938	-0.049	0.196						
木质素	-0.998 **	0.99 *	-0.174	-0.41	-0.974 *					
纤维素	0.423	-0.561	0.867	0.941	0.283	-0.485				
C/N	-0.746	0.861	-0.739	-0.872	-0.632	0.783	-0.825			
C/P	-0.644	0.78	-0.819	-0.921	-0.516	0.686	-0.841	0.989 *		
木质素/N	-0.731	0.849	-0.758	-0.889	-0.613	0.771	-0.852	0.999 **	0.99 *	
木质素/纤维素	-0.845	0.919	-0.595	-0.778	-0.752	0.88	-0.841	0.946	0.898	0.951 *

注: \*\* 在 0.01 水平显著相关(双尾检验); \* 在 0.05 水平显著相关(双尾检验)。

## 4 讨论

### 4.1 凋落叶分解速率与气候关系

根据以往大量的研究表明<sup>[30-32]</sup>,温度是影响凋落叶分解的重要外部因子之一,随着温度升高,

微生物活性增强,从而促进凋落叶分解。根据图 1 与图 3 的结果对比显示,上半年凋落叶月分解量变化趋势与温度变化趋势大体相近,说明随着温度升高,凋落叶分解速率加快,下半年,除 10 月份异常外,基本随温度的降低,凋落叶分解速率呈减缓趋势。其次,

降雨量作为影响凋落叶分解的另一重要气候因素,除直接淋溶作用外还通过改变土壤湿度和凋落叶水分含量来影响土壤微生物的活性,从而影响凋落叶的分解速率<sup>[33]</sup>。本实验中凋落叶月分解量最大的 5—6 月份正对应降雨量最大的月份,说明在温度适宜的情况下,降雨量增加能加快凋落叶分解速率,反之,温度不适宜情况下,过多的降雨量则会影响微生物活动而减缓凋落叶分解,比如 11 月的凋落叶分解情况。

#### 4.2 凋落叶分解与凋落叶性质

凋落叶性质主要包括物理性质和化学性质,凋落叶的物理性质主要包括叶的韧度和比叶面积(叶的平面面积与其干重之比),化学性质主要为凋落叶质量。Taylor 等<sup>[34]</sup>的研究指出,在凋落叶分解的前期,主要受养分(主要是 N)含量的控制,后期则转换为由木质素或木质素/N 值控制其分解速率。随后的许多研究实验证明凋落叶的 N 浓度、木质素含量、C/N 值、木质素/N 值等与凋落叶分解速率有强相关性<sup>[1]</sup>。

本实验中凋落叶分解速率及凋落叶月分解量结果皆表明榿木树种凋落叶分解速率大于马尾松凋落叶分解速率。榿木属阔叶型,马尾松为针叶型,根据已有的研究表明<sup>[35-37]</sup>,凋落叶的比叶面积越大则意味着单位重量的凋落叶和地面接触的面积就越大,因而也就有利于更多的微生物在其上面定居,从而加速凋落叶的分解。同时比叶面积小也就意味着叶片较厚,角质类物质多,从而不利于降雨淋溶、土壤动物的机械破坏及菌丝的入侵,使得凋落叶分解进程受阻,减小其分解速率<sup>[38]</sup>,造成阔叶凋落叶失重率大于针叶林。从凋落叶化学性质分析,在本实验中,凋落叶分解速率与凋落叶初始 C 元素呈显著负相关,与木质素呈极显著负相关。马尾松凋落叶的初始 C 含量、木质素含量、C/N、C/P、木质素/N 及木质素/纤维素等比值比榿木凋落叶大, N、P 等养分含量比榿木凋落叶低,其中木质素作为叶片坚韧度的主要贡献者,叶的坚韧度能加强对分解者的抗性,从而造成其分解速率慢于榿木凋落叶。所以本实验中,无论是岩溶区亦或碎屑岩区,马尾松凋落叶分解速率均比榿木凋落叶分解速率慢,这一结果与严海元<sup>[39]</sup>对缙云山马尾松凋落物研究的结果相一致。

不同的地质条件下其土壤的透气性、水分状况、养分的供给及微生物等方面具有差异性,这些差异影响着生长在这一环境下的植物凋落叶性质,进而影响凋落叶分解速率。岩溶区榿木凋落叶的 N、P 浓度均

比碎屑岩区榿木含量高, C/N、C/P、木质素/纤维素等比值较碎屑岩区相同树种小且差异显著,而元素 C、木质素、木质素/N 差异不显著。根据以往的研究结论推断<sup>[6,34,40]</sup>,所得规律应是岩溶区榿木分解快于碎屑岩区榿木,而本实验研究所得结果与之相反,究其原因可能与岩溶区榿木凋落叶中钙含量高有关。由表 3 结果可知,岩溶区榿木的钙浓度( $35\ 400\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )是碎屑岩区榿木凋落叶钙含量( $20\ 700\ \text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )的 1.7 倍。根据李小方等<sup>[41]</sup>对毛村岩溶区与碎屑岩区榿木叶片显微镜结构和钙形态的对比研究表明,岩溶区榿木叶片细胞壁中钙含量明显高于碎屑岩区,且多出的钙元素以难溶态和酸溶态的形式赋存起来。由曹建华等<sup>[42]</sup>对不同地质条件下植物叶片中钙形态对比研究结果表明,岩溶区叶片细胞壁中的钙主要以果胶的形式赋存,丰富的果胶钙能提高细胞壁刚性,维持细胞膜的稳定性。以上研究结果说明岩溶区榿木凋落叶高含量的钙元素增加了凋落叶分解的难度。岩溶区马尾松与碎屑岩区马尾松的钙含量差异不显著,但钙的赋存形态及是否对岩溶区马尾松凋落叶分解起阻碍作用还有待进一步研究。

岩溶区高含量的钙离子使土壤腐殖质中的胡敏酸含量比较高,且稳定性好,土壤中不易分解的腐殖质使岩溶土壤的有机质含量比碎屑岩区土壤有机质含量高<sup>[14-16]</sup>。岩溶区马尾松在这种高有机质含量的土壤中生长使其凋落叶中 C 和木质素的含量高于碎屑岩区凋落叶中的含量,其中木质素作为植物残体中最难分解的化学成分,其含量大会抑制凋落叶分解,使凋落叶分解速率明显减慢。这可能是造成岩溶区马尾松凋落叶在 N、P 养分含量比碎屑岩区高而分解速率却比碎屑岩区慢的原因之一。

#### 4.3 凋落叶分解与元素释放

在分解过程中各化学元素的浓度变化及释放特征,会因凋落叶的性质、土壤环境及气候条件等不同而呈现不同的变化和释放规律。C 元素作为凋落叶的主要成分及木质素纤维素的主要构成元素,根据 C 元素释放率变化图可知,C 元素在各类凋落叶分解中均表现为净释放特性,是释放量最大的元素,C 元素的释放率与凋落叶的失重率变化趋势是一致的,呈极显著正相关,这与曾昭霞<sup>[43]</sup>及王静<sup>[44]</sup>对岩溶区凋落叶分解的研究中 C 的释放规律相似。在本次试验中,岩溶区榿木、马尾松的 C 释放率比碎屑岩区相同树种的 C 释放率慢,也说明岩溶区凋落叶分解在一

一定程度上延缓了C的循环周期。

N元素含量的变化受分解者的影响较大,本实验中凋落叶N表现为富集—释放的养分迁移模式,此结果与Swift<sup>[45]</sup>的研究结果相一致。在凋落叶分解的初期养分N呈现出富集状态,是由于凋落叶分解初期在12至次年3月,此阶段降雨量少,凋落叶的淋溶作用不强,主要受微生物分解活动影响,当凋落叶中的可利用性氮浓度无法满足微生物群落新陈代谢、繁殖及分解活动所需的N含量时,为满足自身生长需求,微生物从环境中获取N源进行固定,进而使得凋落叶中养分N出现富集,当N浓度较高时,能够满足微生物生长需求后,养分N进行释放。

## 5 结 论

(1)凋落叶的分解不仅受到气候的影响,不同地质环境土壤元素的初始含量也对凋落叶的分解速率具有重要的影响。利用Olson衰减指数模型对岩溶区和碎屑岩区两树种的凋落叶分解速率进行了模拟,得出的结果与实际较为一致。这说明该模型可以较好的模拟凋落叶分解动态。

(2)岩溶区两树种凋落叶分解速率均比碎屑岩区相同树种要低,这与岩溶区土壤富钙偏碱的地球化学背景值增加了分解难度有关,这在一定程度上减缓了岩溶区C的释放速率,延长了C的周转周期。

## 参考文献

- [1] 刘强,彭少麟.植物凋落物生态学[M].北京:科学出版社,2010:3.
- [2] Loranger G, Ponge J F, Imbert D, et al. Leaf decomposition in two semi-evergreen tropical forests: influence of litter quality [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2002, 35(4):247-252.
- [3] 杨万勤,冯瑞芳,张健,等.中国西部3个亚高山森林土壤有机层和矿质层碳储量和生化特性[J].生态学报,2007,27(10):4157-4165.
- [4] 李志安,邹碧,丁永祯,等.森林凋落物分解重要影响因子及其研究进展[J].生态学杂志,2004,23(6):77-83.
- [5] 彭少麟,刘强.森林凋落物动态及其对全球变暖的响应[J].生态学报,2002,22(9):1534-1544.
- [6] 陈法霖,江波,张凯,等.退化红壤丘陵区森林凋落物初始化学组成与分解速率的关系[J].应用生态学报,2011,22(3):565-570.
- [7] 卢俊培,刘其汉.海南岛尖峰岭热带林凋落物分解过程的研究[J].林业科学研究,1989(1):25-33.
- [8] 郭继勋,祝廷成.羊草草原枯枝落叶分解的研究:枯枝落叶分解与生态环境的关系[J].生态学报,1993,13(3):214-220.
- [9] 曹富强,刘朝晖,刘敏,等.森林凋落物及其分解过程的研究进展[J].广西农业科学,2010,41(7):693-697.
- [10] 朱双燕,王克林,曾馥平,等.桂西北喀斯特次生林凋落物养分归还特征[J].生态环境学报,2009,18(1):274-279.
- [11] 袁道先.全球岩溶生态系统对比:科学目标和执行计划[J].地球科学进展,2001,16(4):461-466.
- [12] 曹建华,袁道先,章程,等.受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[J].地球与环境,2004,32(1):1-8.
- [13] 刘燕华.脆弱生态环境与可持续发展[M].商务印书馆,2001.
- [14] 曹建华,袁道先,潘根兴.岩溶生态系统中的土壤[J].地球科学进展,2003,18(1):37-44.
- [15] 曹建华,袁道先,裴建国,等.受地质条件制约的中国西南岩溶生态系统[M].北京:地质出版社,2005:10-111.
- [16] 邓艳,蒋忠诚,曹建华,等.弄拉典型峰丛岩溶区青冈栎叶片形态特征及对环境的适应[J].广西植物,2004,24(4):317-322.
- [17] 陆晓辉,丁贵杰.马尾松人工纯林凋落松针数量及基质质量动态[J].生态学报,2017,37(22):7568-7575.
- [18] 覃勇荣,王燕,刘旭辉,等.马尾松对喀斯特石漠化地区土壤有机质的影响[J].中国农学通报,2009,25(5):104-109.
- [19] 覃扬浚,马姜明,梅军林,等.漓江流域岩溶区櫟木群落不同恢复阶段凋落物分解初期动态[J].生态学报,2017,37(20):6792-6799.
- [20] 杨慧,张连凯,曹建华,等.桂林毛村岩溶区不同土地利用方式土壤有机碳矿化及土壤碳结构比较[J].中国岩溶,2011,30(4):410-416.
- [21] 严毅萍.岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳碳库及周转时间的影响[D].桂林:广西师范大学,2012.
- [22] 王静.不同地质背景生境下两种优势植物凋落物分解研究[D].桂林:广西师范大学,2013.
- [23] 许晓静.不同环境下几种园林树木落叶分解及N、P动态的研究[D].安徽:安徽农业大学,2007.
- [24] Joslin J D, Henderson G S. Organic matter and nutrients associated with fine root turnover in a white oak stand. [J]. *Forest Science*, 1987, 33(2):330-346.
- [25] 葛晓改,曾立雄,肖文发,等.三峡库区森林凋落物化学计量学性状变化及与分解速率的关系[J].生态学报,2015,35(3):779-787.
- [26] 胡肆慧,陈灵芝,陈清朗,等.几种树木枯叶分解速率的试验研究[J].植物生态学与地植物学学报,1987(2):124-132.
- [27] 刘增文,高文俊,潘开文,等.枯落物分解研究方法和模型讨论[J].生态学报,2006,26(6):1993-2000.
- [28] 胡宁,马志敏,蓝家程,等.石漠化区植被恢复过程凋落物分解特征及其对有机碳/氮的影响:以重庆中梁山为例[J].中国岩溶,2016,35(5):539-549.
- [29] 杨林,邓长春,陈亚梅,等.川西高山林线交错带凋落物分解速率与初始质量的关系[J].应用生态学报,2015,26(12):3602-3610.
- [30] 王其兵,李凌浩,白永飞,等.模拟气候变化对3种草原植物群落混合凋落物分解的影响[J].植物生态学报,2000,24(6):674-679.
- [31] 刘强,彭少麟,毕华,等.热带亚热带森林叶凋落物交互分解

- 的研究[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2004, 43(4):86-89.
- [32] 孙志高, 刘景双. 湿地枯落物分解及其对全球变化的响应[J]. 生态学报, 2007, 27(4):1606-1618.
- [33] 李雪峰, 韩士杰, 张岩. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2):261-266.
- [34] Taylor B R, Parsons W F J. Nitrogen and Lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test[J]. Ecology, 1989, 70(1):97-104.
- [35] 韩其晟, 任宏刚, 刘建军. 秦岭主要森林凋落物中易分解和难分解植物残体含量及比值研究[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(5):6-10.
- [36] 何帆, 王得祥, 雷瑞德. 秦岭火地塘林区四种主要树种凋落叶分解速率[J]. 生态学杂志, 2011, 30(3):521-526.
- [37] 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 等. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究[J]. 生态学报, 2006, 26(4):1037-1046.
- [38] 王希华, 黄建军, 闫恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究[J]. 植物生态学报, 2004, 28(4):457-467.
- [39] 严海元. 缙云山马尾松林凋落物的微生物分解及养分释放特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2011.
- [40] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2003, 35(3):391-399.
- [41] 李小方, 曹建华, 杨慧, 等. 富钙偏碱的岩溶土壤对柃木叶片显微结构的影响[J]. 信阳师范学院学报:自然科学版, 2008, 21(3): 412-416.
- [42] 曹建华, 朱敏洁, 黄芬, 等. 不同地质条件下植物叶片中钙形态对比研究:以贵州茂兰为例[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2011, 30(3): 251-260.
- [43] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2015, (7): 682-693.
- [44] 王静, 徐广平, 曾丹娟, 等. 岩溶区和非岩溶区两种优势植物凋落叶分解的比较研究[J]. 广西植物, 2013, 33(3):338-345.
- [45] Swift M J. Decomposition in terrestrial ecosystems[M]. Oxford: Blackwell, 1979: 213-217.

## Study on leaf litter decomposition of *Loropetalum chinense* and *Pinus massoniana* in karst areas and clastic rock areas in Maocun, Guilin

TU Chunyan<sup>1,2,3</sup>, HUANG Binghui<sup>2,4</sup>, YANG Hui<sup>2,3</sup>, BAI Bing<sup>2,3</sup>, MO Biqin<sup>2,3,4</sup>, CAO Jianhua<sup>2,3</sup>

(1. College of Life Science, Guangxi Normal University, Guilin, Guangxi 541004, China;

2. Institute of Karst Geology, CAGS/Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR&GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China;

3. The International Research Center on Karst (IRCK) under the Auspices of UNESCO, Guilin, Guangxi 541004, China;

4. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

**Abstract** The purpose of this work was to explore the impact of the karst ecological environment on the decomposition of tree litter, and the role of litter decomposition in karst ecosystems in global carbon balance. We utilized field litter bag method to determine the decomposition rate and nutrient release of two species, *Loropetalum chinense* and *Pinus massoniana*, both in karst areas and clastic rock areas. The results show that (1) the litter decomposition rates of *Loropetalum chinense* and *Pinus massoniana* in karst areas are generally lower than that in clastic rock areas. (2) The litter decomposition rate coefficient ( $k$ ) has a significant negative correlation with the carbon content of initial leaf litter nutrient ( $P < 0.05$ ) and a extremely significant negative correlation with the lignin content ( $P < 0.01$ ). (3) In the decomposition process, the release patterns of different nutrients are various. The nutrient element carbon in the leaf litter shows a continuous decrease during the whole decomposition process. (4) The carbon release rate of the two species in karst areas is lower than that in clastic rock areas, which extends the carbon cycle to a certain extent and plays a positive role in global climate change.

**Key words** karst area, clastic rock area, *Loropetalum chinense*, *Pinus massoniana*, leaf litter decomposition, nutrient release

(编辑 吴华英)