

DOI: 10.5846/stxb201403180470

马志良,高顺,杨万勤,吴福忠,谭波,张奎涛.亚热带常绿阔叶林 6 个常见树种凋落叶在不同降雨期间的分解特征.生态学报,2015,35(22):

Ma Z L, Gao S, Yang W Q, Wu F Z, Tan B, Zhang X T. Litter decomposition of six common tree species at different rainy periods in the subtropical region. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22):

亚热带常绿阔叶林 6 个常见树种凋落叶在不同降雨期间的分解特征

马志良,高 顺,杨万勤*,吴福忠,谭 波,张奎涛

四川省林业生态工程省级重点实验室,华西雨屏区森林生态系统定位研究站,四川农业大学生态林业研究所,成都 611130

摘要:地处长江上游的四川盆地亚热带常绿阔叶林具有典型雨热同季的气候特点,季节性干湿交替可能显著影响凋落物分解,但迄今缺乏相应的报道。因此,采用凋落物分解袋法,研究了常绿阔叶林区最具代表性的马尾松(*Pinus massoniana*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、红椿(*Toona ciliata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)等 6 种凋落叶在第一年不同雨热季节的分解特征。结果表明,经历一年的分解,6 种凋落叶质量残留率大小顺序依次为:红椿(27.90%) < 柳杉(41.39%) < 杉木(48.93%) < 麻栎(49.62%) < 马尾松(68.82%) < 香樟(72.23%),6 种凋落叶在不同干湿季节质量损失差异显著($P < 0.05$)。阔叶树种在旱季(MRS、SRS 和 WRS)的质量损失显著高于针叶树种。雨季(ERS 和 LRS)对 6 种凋落叶质量损失的贡献率(69.73%—89.68%)均明显大于旱季(10.32%—30.27%)。6 种凋落叶在不同时期中质量损失速率差异显著($P < 0.05$),且 6 种凋落叶在雨季的质量损失速率明显高于旱季。相关分析结果表明,凋落叶质量损失及其速率均与降雨量和温度呈极显著($P < 0.01$)正相关关系。凋落叶质量损失与初始 C、木质素含量及 C/N、木质素/N 极显著($P < 0.01$)负相关,与 N 含量极显著($P < 0.01$)正相关。这些结果表明亚热带地区森林凋落物分解的质量损失主要发生在雨季,雨季温湿度的改变可显著影响凋落物分解过程。

关键词:雨季;亚热带;凋落物分解;质量损失

Litter decomposition of six common tree species at different rainy periods in the subtropical region

MA Zhiliang, GAO Shun, YANG Wanqin*, WU Fuzhong, TAN Bo, ZHANG Xitao

Key Laboratory of Ecological Forestry Engineering, Long-term Research Station of Forest Ecosystem in Rainy Zone of West China, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: Litter decomposition is an essential process of material cycling in the terrestrial ecosystem that can be the primary source of nutrients for plant growth, and of both nutrients and energy for soil biota. The present consensus is that climate-related precipitation and temperature patterns determine the rate of litter decomposition at the regional scale, while the substrate quality related to plant species manipulates the process of litter decomposition at the ecosystem level. Consequently, much more attention has been focused on litter decomposition as affected by climate, substrate quality, and soil biota in past decades. Theoretically, precipitation, temperature, biological activity, and their combined effects control the process of litter decomposition at different critical periods. As yet, little information has been available on the process of litter decomposition in different rainy and dry periods. Therefore, in order to understand the process of litter decomposition

基金项目:国家自然科学基金项目(3117023, 31200474);“十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05);四川省杰出青年学术与技术带头人培育项目(2012JQ0008, 2012JQ0059);中国博士后科学基金项目(7013M540714)资助

收稿日期:2014-03-18; 网络出版日期:2015-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: scyangwq@163.com

in seasonal rainy and dry periods, a field litterbag experiment was conducted in the Chongzhou Modern Agricultural Research & Development Base of Sichuan Agricultural University, which is located in the subtropical humid climate zone of Sichuan Basin at the upper reaches of the Yangtze River. Foliar litter was selected from *Pinus massoniana*, *Cryptomeria fortunei*, *Cunninghamia lanceolata*, *Cinnamomum camphora*, *Toona ciliata*, and *Quercus acutissima*, which are widely distributed in the subtropical evergreen broadleaved forest. Litterbags were sampled in the dry season, spring minor rainy season, early rainy season, later rainy season, and winter minor rainy season as litter decomposition proceeding from January 18, 2013 to January 18, 2014. In turn, the mass loss rates of foliar litter were measured, and rainfall and temperature were investigated at the same time. The results indicated that the litter mass loss of all six tree species increased as decomposition proceeded. Over one year's decomposition, the remaining litter mass of six tree species was in the order *T. ciliata* (27.90%) < *C. fortunei* (41.39%) < *C. lanceolata* (48.93%) < *Q. acutissima* (49.62%) < *P. massoniana* (68.82%) < *C. camphora* (72.23%). Seasonal rainfall had significant ($P < 0.05$) effects on the litter mass loss of the six species. Compared with needle litter, broad-leaved litter had higher mass loss in the dry season (MRS, SRS, and WRS). The mass loss in the rainy season (ERS and LRS) accounted for 69.73%—89.68% of the mass loss of the entire first decomposition year, while that in the dry season accounted for only 10.32%—30.27%. Meanwhile, the rates of foliar litter mass loss in the rainy season were significantly ($P < 0.05$) higher than those in the dry season regardless of tree species. Pearson correlation analysis results revealed that the litter mass loss rate was significantly ($P < 0.01$) and positively correlated with precipitation and temperature. In addition, mass loss was significantly ($P < 0.01$) and negatively related to the initial concentrations of C, lignin, C/N, and lignin/N in foliar litter, but significantly ($P < 0.01$) and positively related to the initial N concentration in foliar litter. In conclusion, the mass loss of foliar litter occurred mainly in the rainy season in the subtropical humid region, so changes in seasonal rainfall patterns and the corresponding changes in temperature and humidity would significantly affect the process of litter decomposition.

Key Words: rainy season; subtropical regions; litter decomposition; mass loss

凋落物是森林生态系统物质和能量流动的关键环节之一,在维持森林生态系统生产力、净碳储量、土壤有机质的形成、森林植被群落演替等方面具有不可替代的作用和地位,其分解由降水淋溶、动物的咀嚼和啃食、土壤干湿交替和冻融循环和生物代谢等相互联系的物理、化学和生物作用共同完成^[1]。我国亚热带常绿阔叶林区具有雨热同季的气候特点,明显的季节性干湿交替可通过增加凋落物的物理破碎^[2]和调控生物分解者活动^[3]等影响凋落物分解。亚热带常绿阔叶林凋落物大量发生在秋末冬初^[4-5],新鲜凋落物虽然具有较高的易分解组分含量^[6],但由于冬季降水少、气温低,分解者的活性较低,造成凋落物分解相对缓慢^[7]。随着凋落物分解的进行,季节性降雨期的来临使得水热条件得到明显改善,分解者活性和淋溶强度显著提高,在一定程度上促进了凋落物分解^[8],但经历一个旱季分解的凋落物,基质质量随着大量易分解组分的损失明显下降,一定程度上又限制了凋落物分解进程^[9]。可见,季节性干湿交替环境下凋落物分解过程并不清晰。然而,近年来开展的相关研究多关注亚热带常绿阔叶林凋落物产量^[10]、总体分解特征如年分解速率^[11]和养分释放^[12]、以及分解者活动^[4, 13]等方面,有关季节性降雨对凋落物分解的影响研究相对较少。更为重要的是,气候变化情景下季节性降雨格局的改变可能使季节性降雨对凋落物分解的影响更为重要。

四川盆地亚热带常绿阔叶林夏季高温多雨,季节性降雨期长达5—6个月。由于相对较好的水热环境,凋落物在季节性降雨期间可能具有更为明显的分解特征,并受到不同树种凋落物质量的影响,但相关过程缺乏必要关注。因此,本文以四川盆地亚热带常绿阔叶林区6种常见树种马尾松(*Pinus massoniana*)、柳杉(*Cryptomeria fortunei*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、香樟(*Cinnamomum camphora*)、红椿(*Toona ciliata*)、麻栎(*Quercus acutissima*)凋落叶为研究对象,根据降雨特征,采用凋落物袋法研究了季节性降雨期间凋落叶分解过程及其对季节性干湿交替的响应,以期为更好的认识亚热带常绿阔叶林区凋落物分解过程提供基础理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

凋落物分解实验在四川省崇州市桤泉镇四川农业大学现代农业研发基地进行。该基地坐落于四川省川西平原西部,地理坐标 103°49'E, 30°55'N, 海拔 516 m, 属四川盆地亚热带湿润季风气候。年平均气温 16.0 °C, 年平均降雨量 1015.2 mm, 降雨主要集中在 5—9 月, 降雪稀少。年平均日照时数为 1161.5 h, 平均无霜期为 283 d, 土壤类型为老冲积黄壤。研究区域内无乔木、灌木等木本植物, 草本植物主要有青蒿 (*Artemisia annua*)、空心莲子草 (*Alternanthera philoxeroides*)、狗尾草 (*Setaria viridis*)、稗草 (*Echinochloa crusgalli*)、虻子草 (*Leptochloa panicea*)、牛繁缕 (*Malachium aquaticum*)、藜 (*Chenopodium album*)、野苋菜 (*Amaranthus viridis*) 等。

1.2 试验方法

1.2.1 试验设计和样品处理

2012 年 10 月底在四川盆地典型生态系统用尼龙网收集马尾松、柳杉、杉木、香樟、红椿、麻栎的新鲜凋落叶。收集好的 6 种凋落叶带回实验室, 经自然风干后, 每个树种准确称取 10 g 装入凋落物袋内 (规格为 20 cm × 20 cm, 网孔大小为底部 0.5 mm, 表面层 1 mm) 并标记, 每种凋落叶分别装 15 袋, 共计 90 袋。另外分别称取相同质量 (10 g) 的 6 种树种凋落叶各 3 份, 在 65 °C 下烘干至恒重, 测定含水量, 用于推算放置在凋落物袋内凋落叶的初始干质量 (马尾松 8.71 g、柳杉 8.89 g、杉木 8.89 g、香樟 8.78 g、红椿 8.78 g、麻栎 8.78 g)。烘干的凋落叶样品粉碎后用于初始全 C、N、P、木质素和纤维素含量的测定。其中, 全 C 采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定 (LY/T 1237—1999); 样品全 N 和全 P 待测液用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法制备 (NY/T 2017—2011), 全 N 采用半微量凯氏定氮法测定 (LY/T 1228—1999), 全 P 采用钼锑抗比色法测定 (LY/T 1270—1999); 木质素和纤维素含量采用酸性洗涤纤维法 (acid detergent fiber method) 测定^[14]。6 种凋落叶分解前基质特征见表 1。

表 1 凋落叶分解前基质质量特征
Table 2 Initial quality in six species leaf litters

物种 Species	C (g/kg)	N (g/kg)	P (g/kg)	C/N	C/P	N/P	木质素 Lignin/%	纤维素 Cellulose/%	木质素/N Lignin/N
马尾松 <i>P. massoniana</i>	441.99±10.83a	10.72±0.33abc	0.81±0.03c	41.23±0.88a	543.52±29.41a	13.19±0.83a	34.87±1.10b	20.03±1.26cd	32.53±1.30bc
柳杉 <i>C. lanceolata</i>	425.12±5.51a	11.99±0.36ab	0.87±0.06bc	35.48±0.65a	489.87±38.73a	13.82±1.33a	36.23±0.98b	25.03±1.33a	30.26±1.68c
杉木 <i>C. fortunei</i>	393.95±2.05b	10.19±1.19c	0.76±0.06c	39.25±7.54a	518.16±60.46a	13.36±1.58a	38.92±0.58a	24.39±2.69ab	38.51±4.03a
香樟 <i>C. camphora</i>	379.11±9.61bc	10.51±0.87bc	1.23±0.12a	36.19±2.18a	308.07±30.08b	8.54±1.08b	38.38±1.02a	22.09±1.87abc	37.02±3.13ab
红椿 <i>T. ciliata</i>	350.36±2.52c	12.23±1.49a	0.98±0.13b	28.95±3.73b	363.29±49.52b	12.78±2.95a	28.75±0.95c	17.65±1.65d	23.84±3.92d
麻栎 <i>Q. acutissima</i>	428.59±12.50a	11.06±0.66abc	0.78±0.06c	38.78±1.20a	552.24±50.29a	14.26±1.63a	38.80±0.87a	20.35±0.67bcd	35.14±1.37abc

表中同列不同的小写字母表示不同类型凋落物之间差异显著, $P < 0.05$

设置 3 块样地作为重复, 于 2013 年 1 月 18 日去除样地土壤表面的植物和凋落物, 将上述凋落物袋平铺于地表, 每种凋落物袋在每块样地内放置 5 袋。样品埋设后, 在试验地地表凋落物袋内设置一个纽扣式温度记录器 (iButton DS1923-F5, Maxim/Dallas Semiconductor, Sunnyvale, USA), 设定为每 120 min 读取一次温度数据, 自动记录试验期间地表的温度变化, 试验期间的日平均温度变化特征如图 1A。根据崇州市多年降雨资料, 将试验时间划分为微量降雨期 (MRS: 2013 年 1 月 18 日—2013 年 2 月 19 日)、春季少雨期 (SRS: 2013 年 2 月 19 日—2013 年 4 月 22 日)、雨季前期 (ERS: 2013 年 4 月 22 日—2013 年 8 月 19 日)、雨季后期 (LRS: 2013 年 8 月 19 日—2013 年 10 月 22 日) 和冬季少雨期 (WRS: 2013 年 10 月 22 日—2014 年 1 月 18 日) 5 个

时期。试验期间的降水特征见图 1B、表 2。其中,2013 年 1 月 18 日—4 月 22 日及 2013 年 10 月 22 日—2014 年 1 月 18 日降雨不集中、降雨量小(总降雨量为 98 mm),占试验期间总降雨量的 8.13%;试验地降雨主要发生在 2013 年 4 月 22 日—10 月 22 日(总降雨量为 1106.9 mm),占试验期间总降雨量的 91.87%,表现为明显的雨季和旱季。具体采样时间为 2013 年 2 月 19 日、4 月 22 日、8 月 19 日、10 月 22 日和 2014 年 1 月 18 日,每次从每块样地内采集 6 种凋落物袋各 1 袋,带回实验室。小心去除表面泥土和新长入的细根,于 65 °C 烘干至恒重,称重后用于质量损失数据的计算。

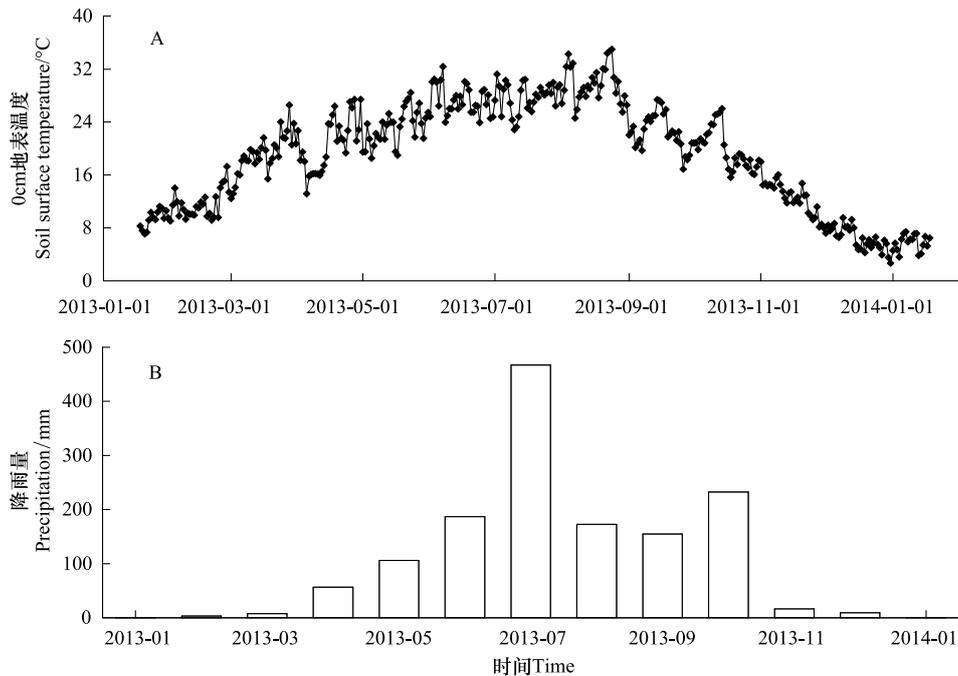


图 1 试验期间地表温度动态和月实际降水量

Fig. 1 Dynamics of average surface temperature and month actual precipitation during the experiment

降雨量资料从 <http://sc.weather.com.cn/qxfw/index.shtml> 中获得

表 2 Rainfall intensity and precipitation of the experiment plot during the experiment

Table 2 试验期间试验地点降雨等级、次数及降雨量

采样时期 Sampling time	小雨 Light rain	中雨 Moderate rain	大雨 Heavy rain	暴雨 Rainstorm	大暴雨 Downpour	降雨量 Precipitation (mm)
MRS	3	0	0	0	0	2.3
SRS	14	2	0	0	0	58.8
ERS	29	9	1	5	1	925.2
LRS	19	6	3	0	0	181.7
WRS	22	0	0	0	0	36.9

小雨:24 小时降水量小于 10 mm;中雨:24 小时降雨量在 10.1—25 mm 之间;大雨:24 小时降雨量在 25.1—50 mm 之间;暴雨:24 小时降雨量在 50.1—100 mm 之间;大暴雨:24 小时降雨量在 100.1—200 mm 之间。MRS, micro rainy stage, 微量降雨期;SRS, Spring rainy stage, 春季少雨期;ERS, early stage of rainy season, 雨季前期;LRS, late stage of rainy season, 雨季后期;WRS, Winter rainy stage, 冬季少雨期

1.2.2 数据计算

凋落物质量残留率计算公式如下: $H_w(\%) = M_t/M_0 \times 100$;

各时期凋落物质量损失贡献率计算公式如下: $C_w(\%) = (M_{t-1} - M_t) / (M_0 - M_T) \times 100$;

各时期凋落物质量损失速率(以天计)计算公式如下: $R_w = (M_{t-1} - M_t) / \Delta T$;

各时期凋落物质量损失计算公式如下: $P_w(\%) = (M_{t-1} - M_t) / M_0 \times 100$ 。

式中, M_0 为凋落叶分解袋埋置前烘干凋落叶质量 (g); M_t 为各采样时间凋落叶内凋落叶的残留量 (g); ($M_{t-1} - M_t$) 为相邻两次采集凋落叶分解袋的残留量差 (g); ΔT 为相邻两次采样时间的间隔天数 (d); M_T 为最后一次采样时凋落叶袋内凋落叶残留量 (g)。

1.2.3 数据统计与分析

试验数据统计与分析采用 Excel 2003 和 SPSS 20.0 完成。使用单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和最小显著差异法 (LSD) 比较 6 种凋落叶初始基质质量与各采样时期的质量损失和质量损失速率; 采用 Pearson 相关分析方法分析凋落叶质量损失与初始基质质量之间的关系; 采用线性回归方法分析凋落叶质量损失与降雨量和温度的之间的关系。制图使用 Origin 9.0 完成。

2 结果与分析

2.1 凋落叶质量损失

6 种凋落叶质量损失如图 2 和图 3。6 种凋落叶分解过程质量残留规律一致, 均表现为随时间的进行凋落叶干物质残留率不断减少。经历一年的分解, 6 种凋落叶质量残留率大小顺序依次为: 红椿 (27.90%) < 柳杉 (41.39%) < 杉木 (48.93%) < 麻栎 (49.62%) < 马尾松 (68.82%) < 香樟 (72.23%), 红椿凋落叶质量残留率均显著 ($P < 0.01$) 低于其它 5 种凋落叶 (图 2)。

总体来看, 在一年的分解中, 整个雨季 (ERS 和 LRS) 对 6 种凋落叶质量损失的贡献率 (69.73%—89.68%) 均明显大于旱季 (MRS、SRS 和 WRS) 的贡献率 (10.32%—30.27%) (图 3)。值得注意的是, 阔叶树种香樟、红椿、麻栎凋落叶在旱季也有较大的质量损失 (分别占总质量损失 17.96%、18.88%、30.27%), 均高于针叶树种马尾松、柳杉、杉木凋落叶在旱季的质量损失 (分别占总质量损失的 12.07%、13.42%、10.32%)。

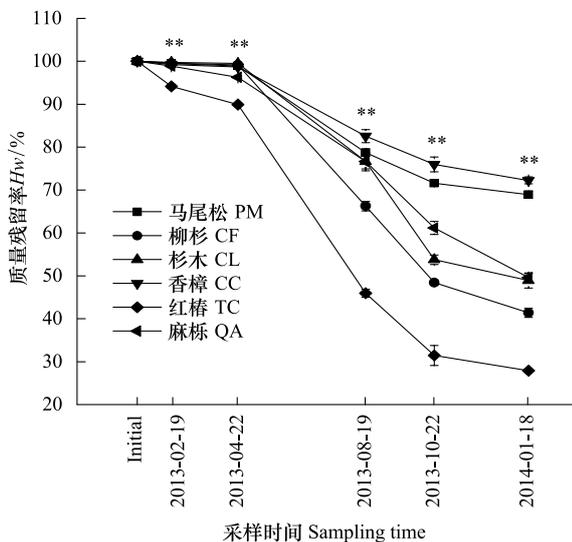


图 2 6 个树种凋落叶分解过程中质量残留率的动态变化

Fig. 2 Dynamics of mass remaining of six species leaf litter decomposing

图中横线表示标准误差; ** 表示不同树种之间差异显著 ($P < 0.01$)。PM, *Pinus massoniana*, 马尾松; CF, *Cryptomeria fortunei*, 柳杉; CL, *Cunninghamia lanceolata*, 杉木; CC, *Cinnamomum camphora*, 香樟; TC, *Toona ciliata*, 红椿; QA, *Quercus acutissima*, 麻栎

2.2 凋落叶质量损失速率

由图 4 可见, 6 种凋落叶在不同分解关键时期质量损失速率差异显著 ($P < 0.05$)。总体来看, 凋落叶在

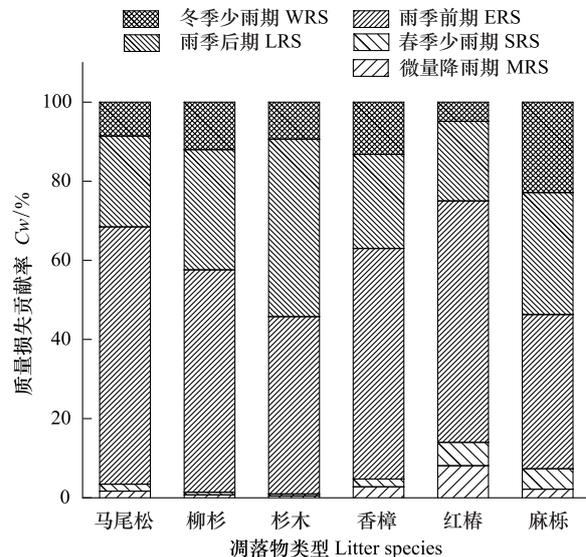


图 3 各采样时期 6 个树种凋落叶质量损失的贡献率

Fig. 3 Contribution rates (%) of six species litter mass loss during different sampling period

MRS, micro rainy stage, 微量降雨期; SRS, Spring rainy stage, 春季少雨期; ERS, early stage of rainy season, 雨季前期; LRS, late stage of rainy season, 雨季后期; WRS, Winter rainy stage, 冬季少雨期

雨季(ERS 和 LRS)的质量损失速率显著($P < 0.05$)均高于旱季(MRS、SRS 和 WRS)。其中,马尾松和香樟凋落叶在各时期中质量损失速率表现为 $ERS > LRS > WRS > MRS > SRS$; 柳杉和杉木凋落叶表现为 $LRS > ERS > WRS > MRS > SRS$; 红椿凋落叶表现为 $ERS > LRS > MRS > SRS > WRS$; 麻栎凋落叶表现为 $LRS > ERS > WRS > SRS > MRS$ 。

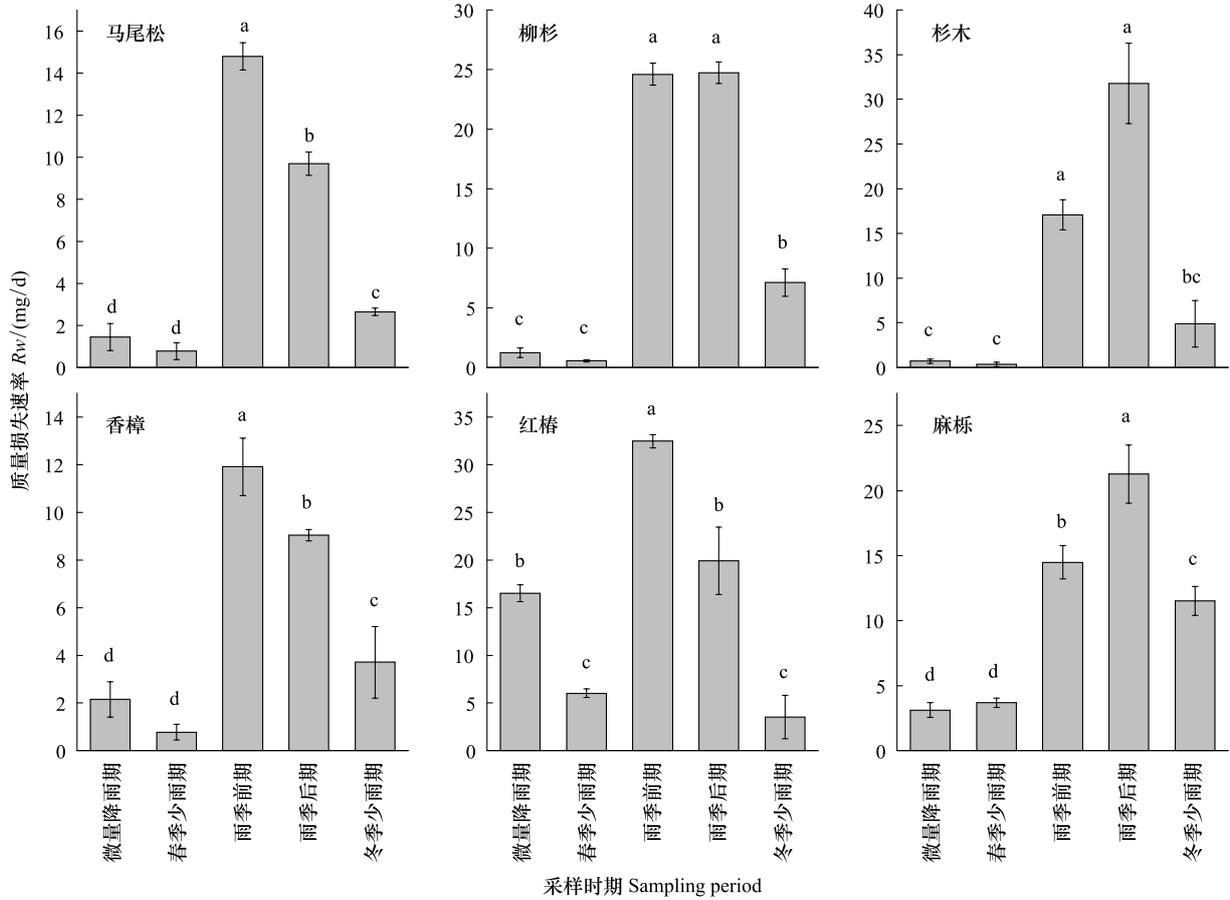


图4 各分解时期6个树种凋落叶质量损失速率

Fig. 4 Leaf litter mass loss rates of six species during different sampling period

2.3 凋落叶各分解时期质量损失及速率与初始基质质量的关系

凋落叶各分解时期质量损失及速率与初始基质质量的相关系数于表3中列出。由表3可见,凋落叶质量

表3 各采样时期凋落叶质量损失和质量损失速率与初始基质质量的相关关系

Table 3 Correlation analyses among mass loss, mass loss rates and initial litter quality

项目 Item	采样时间 Sampling time	C (g/kg)	N (g/kg)	P (g/kg)	C/N	C/P	N/P	木质素 Lignin (%)	纤维素 Cellulose (%)	木质素/N Lignin/N
质量损失	2013/2/19	-0.719**	0.665**	0.224	-0.866**	-0.480*	0.013	-0.877**	-0.745**	-0.815**
Mass loss / P_w (%)	2013/4/22	-0.644**	0.662**	0.150	-0.816**	-0.389	0.095	-0.819**	-0.793**	-0.783**
	2013/8/19	-0.546*	0.855**	0.008	-0.874**	-0.292	0.276	-0.884**	-0.447	-0.909**
	2013/10/22	-0.494*	0.750**	-0.222	-0.752**	-0.090	0.464	-0.686**	-0.191	-0.729**
	2014/1/18	-0.402	0.754**	-0.295	-0.699**	0.005	0.547*	-0.584*	-0.156	-0.672**
	MRS	-0.719**	0.665**	0.224	-0.866**	-0.480**	0.013	-0.877**	-0.744**	-0.816**
质量损失速率	SRS	-0.501*	0.612*	0.042	0.695**	-0.243	0.195	-0.686**	-0.801**	-0.686**
Mass loss rates / R_w (mg d ⁻¹)	ERS	-0.494*	0.861**	-0.045	-0.829**	-0.234	0.324	-0.833**	-0.276	-0.882**
	LRS	-0.065	0.102	-0.573*	-0.070	0.381	0.586*	0.120	0.459	0.065
	WRS	0.358	0.109	-0.357	0.154	0.420	0.435	0.385	0.140	0.176

* 表示存在显著相关性 ($P < 0.05$); ** 表示存在极显著相关性 ($P < 0.01$)

损失与初始 C、木质素含量及 C/N、木质素/N 极显著 ($P < 0.01$) 负相关,与 N 含量极显著 ($P < 0.01$) 正相关。凋落叶前期分解过程(MRS、SRS 和 ERS)质量损失速率与初始 C、木质素、纤维素含量及 C/N、木质素/N 极显著 ($P < 0.01$) 负相关,与 N 含量极显著 ($P < 0.01$) 正相关。

2.4 凋落叶各分解时期质量损失及速率与降水量和温度的关系

凋落叶质量损失及其速率均与降雨量极显著 ($P < 0.01$) 正相关 (R^2 分别为 0.65 和 0.32),说明 6 种凋落叶分解过程受降雨量影响极显著 ($P < 0.01$) (图 5)。同时,凋落叶分解过程受平均温度的影响,在凋落物分解过程中质量损失及其速率均与平均温度极显著 ($P < 0.001$) 相关 (R^2 分别为 0.49 和 0.41) (图 6)。

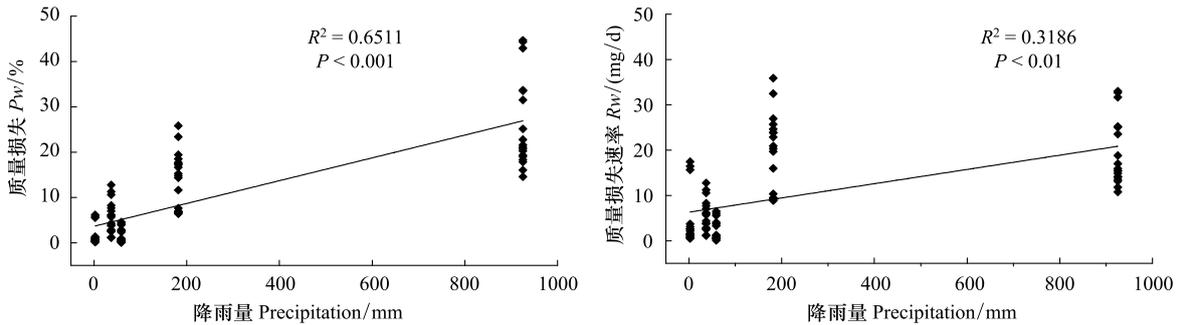


图 5 凋落叶各分解时期质量损失和质量损失速率与采样期间降雨量的相关关系

Fig. 5 Correlation among mass loss, mass loss rates of each decomposition stage and precipitation during each sampling period

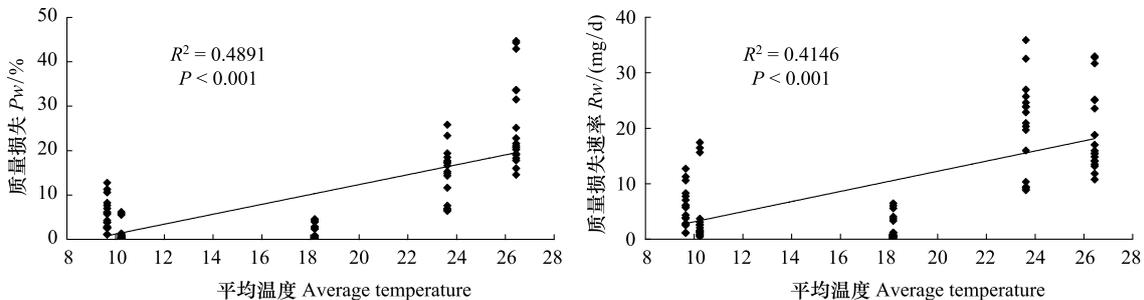


图 6 凋落叶各分解时期质量损失和质量损失速率与采样期间平均温度的相关关系

Fig. 6 Correlation among mass loss, mass loss rates of each decomposition stage and average temperature during each sampling period

3 讨论与结论

3.1 季节性降雨与凋落物分解的关系

普遍认为,凋落物质量损失随着降雨量的增加而增加^[15-17]。本项研究表明,亚热带常绿阔叶林 6 种常见树种第一年的凋落物质量损失为 27.77%—72.10%,其中,69.73%—89.68%发生在雨季(RES 和 LRS),即雨热同季的 4 月底—10 月中旬。这与 Anaya 等对热带森林生态系统凋落物分解的研究结果一致^[15]。可能的原因包括两方面:一方面,雨季的降雨可促进凋落物化学成分淋溶,降雨量越大,表层凋落物淋溶越快^[15],降雨对亚热带森林生态系统凋落物分解有直接的正效应;另一方面,在亚热带湿润气候区,雨热同季的气候变化有利于分解者(土壤动物和微生物)活动^[8],森林地表凋落物层具有强大的持水能力^[18],雨季更为频繁的降雨和较大的降雨量所提供良好的土壤水分条件持续时间更久^[19],这将更有利于生物分解者的繁殖、生长和采食活动,从而增加凋落物的分解速率^[20]。此外,凋落叶质量损失及其速率与降雨量及温度的相关分析结果表明,凋落叶质量损失及其速率均与降雨量和温度呈极显著 ($P < 0.01$) 正相关关系。中国长期凋落物分解实验研究结果显示,气候是控制凋落物分解的主要因子,年均降雨量对凋落物分解影响显著^[21]。我国中东部不同气

候带森林凋落物分解速率也表现为随温度和降雨量的增加而增大^[10]。本研究结果与此一致。

经历 3 个月旱季分解后,6 种物种凋落叶在雨季的质量损失急速加快,原因之一可能是凋落叶在经过初期旱季(MRS 和 SRS)分解,化学成分发生变化,同时积累了一定的可溶性物质,在随后的季节性降雨期通过淋溶作用的方式爆发式释放^[2]。雨季强大的降雨脉冲对凋落物表面造成的物理破碎也可能是加速其分解的另一个原因^[22]。而经历一个季节性降雨期分解的凋落叶可能只剩余更加难分解的组分(如木质素和纤维素等),导致 WRS 时期的凋落叶质量损失和质量损失速率均显著($P < 0.01$)降低(图 4)。然而,不同树种的凋落物质量损失对降雨格局的响应存在很大差异。

3.2 基质质量与不同关键时期凋落物质量损失的关系

与树种相关的凋落物基质质量决定着生态系统水平的凋落物分解^[23]。初始基质质量中的 C、N、木质素浓度及 C/N、木质素/N 能够作为凋落物分解速率的预测指标^[16]。已有的多数研究表明,凋落物初始 N 含量高会加速分解,而木质素含量高将延缓分解^[24-25]。本研究中,红椿凋落叶的 N 含量最高,木质素含量最低,因而分解最快,历经一年分解后,质量残留率仅为 27.90%,显著($P < 0.05$)低于其它 5 种凋落叶。而香樟和麻栎凋落叶 N 含量较低,木质素含量较高,且叶表面蜡质程度较高,分解较慢。相关分析结果表明,凋落叶质量损失与初始 C、木质素含量及 C/N、木质素/N 极显著($P < 0.01$)负相关,与初始 N 含量极显著($P < 0.01$)正相关。凋落叶初期分解过程(MRS、SRS 和 ERS)质量损失速率与初始 C、木质素、纤维素含量及 C/N、木质素/N 极显著($P < 0.01$)负相关,与初始 N 含量极显著($P < 0.01$)正相关(表 3)。这也验证了初始基质质量中 N 含量、C/N、木质素/N 等是预测凋落物在亚热带常绿阔叶林区早期分解过程的良好指标这一结论^[25]。

本研究还发现,不同树种凋落叶在不同关键时期质量损失及其速率具有显著差异(图 2 和图 4)。凋落物自身特性(易分解和难分解成分)和降雨量交互作用可能是控制凋落物在不同关键时期分解的主要因子^[26]。不同树种凋落叶的组成成分存在显著差异(表 1),造成在不同分解阶段对降雨的响应不同。凋落物在分解初期主要向环境中释放可溶性物质和矿质养分,可溶性物质(易分解成分)含量高的凋落物在雨季更易受降雨淋溶作用的促进而具有更大的质量损失速率^[15, 27],而纤维素、木质素等难分解物质含量高的凋落叶在分解初期由于受到细胞壁上木质素-纤维素复合体的保护^[28],降雨不能直接作用于凋落物易分解成分,从而造成质量损失在时间上的后延。值得注意的是,在旱季少量降雨情景下,阔叶树种凋落叶的质量损失(17.96%—30.27%)明显高于针叶树种凋落叶(10.32%—13.42%)(图 3),这说明具有较大叶面积的阔叶树种凋落叶分解对旱季少量降雨的响应比针叶树种更为敏感。

综上所述,四川盆地亚热带常绿阔叶林区凋落叶分解主要发生在雨季,温湿度对凋落叶分解过程影响显著。在未来全球气候变化过程中,亚热带常绿阔叶林区夏季气温升高、降雨量增加^[29],季节性降雨期间具有较快的凋落物分解速率,提高了林地养分归还速度,这将能够为正处于生长季的植物提供更多的有效养分,促进森林生态系统的物质循环。

参考文献(References):

- [1] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889-2895.
- [2] 赵红梅, 黄刚, 马健, 李彦, 周丽. 荒漠区地表凋落物分解对季节性降水增加的响应. 植物生态学报, 2012, 36(6): 471-482.
- [3] 武海涛, 吕宪国, 杨青, 姜明. 土壤动物主要生态特征与生态功能研究进展. 土壤学报, 2006, 43(2): 314-323.
- [4] 王文君, 杨万勤, 谭波, 刘瑞龙, 吴福忠. 四川盆地亚热带常绿阔叶林土壤动物对几种典型凋落物分解的影响. 生态环境学报, 2013, 22(9): 1488-1495.
- [5] 张德强, 叶万辉, 余清发, 孔国辉, 张佑昌. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物的研究. 生态学报, 2000, 20(6): 938-944.
- [6] Fröberg M, Berggren Kleja D, Hagedorn F. The contribution of fresh litter to dissolved organic carbon leached from a coniferous forest floor. European Journal of Soil Science, 2007, 58(1): 108-114.
- [7] Austin A T, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. Nature, 2006, 442(7102): 555-558.
- [8] Anaya C A, Jaramillo V J, Martínez-Yrizar A, García-Oliva F. Large rainfall pulses control litter decomposition in a tropical dry forest: evidence from an 8-year study. Ecosystems, 2012, 15(4): 652-663.

- [9] Prescott C E. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry*, 2010, 101(1-3): 133-149.
- [10] Wang J J, Wang Y J, Lai L M, Zhao X C, Wang F, Shen G Z, Lai J S, Lu H B, Zhao C Q, Zheng Y R. Litter production and decomposition of different forest ecosystems and their relations to environmental factors in different climatic zones of mid and eastern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4818-4825.
- [10] 王健健, 王永吉, 来利明, 赵学春, 王飞, 申国珍, 赖江山, 鲁洪斌, 赵春强, 郑元润. 我国中东部不同气候带成熟林凋落物生产和分解及其与环境因子的关系. *生态学报*, 2013, 33(15): 4818-4825.
- [11] 季晓燕, 江洪, 洪江华, 马元丹. 亚热带 3 种树种凋落叶厚度对其分解速率及酶活性的影响. *生态学报*, 2013, 33(6): 1731-1739.
- [12] 仲米财, 王清奎, 高洪, 于小军. 中亚热带主要树种凋落叶在杉木人工林中分解及氮磷释放过程. *生态学杂志*, 2013, 32(7): 1653-1659.
- [13] 王文君, 杨万勤, 谭波, 刘瑞龙, 吴福忠. 四川盆地亚热带常绿阔叶林不同物候期凋落物分解与土壤动物群落结构的关系. *生态学报*, 2013, 33(18): 5737-5750.
- [14] Rowland A P, Roberts J D. Lignin and cellulose fractionation in decomposition studies using acid-detergent fibre methods. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1994, 25(3-4): 269-277.
- [15] Anaya C A, García-Oliva F, Jaramillo V J. Rainfall and labile carbon availability control litter nitrogen dynamics in a tropical dry forest. *Oecologia*, 2007, 150(4): 602-610.
- [16] Swift M J, Heal O W, Anderson J M, Anderson D J, Greig-Smith P, Pitelka F A. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Berkly: University of California Press, 1979: 108-109.
- [17] 唐仕姗, 杨万勤, 殷睿, 熊莉, 王海鹏, 王滨, 张艳, 彭艳君, 陈青松, 徐振峰. 中国森林生态系统凋落叶分解速率分解速率的分布特征及其控制因子. *植物生态学报*, 2014, 38(6): 529-539.
- [18] Pérez-Suárez M, Arredondo-Moreno J T, Huber-Sannwald E. Early stage of single and mixed leaf-litter decomposition in semiarid forest pine-oak: the role of rainfall and microsite. *Biogeochemistry*, 2012, 108(1-3): 245-258.
- [19] Knapp A K, Fay P A, Blair J M, Collins S L, Smith M D, Carlisle J D, Harper C W, Danner B T, Lett M S, McCarron J K. Rainfall variability, carbon cycling, and plant species diversity in a mesic grassland. *Science*, 2002, 298(5601): 2202-2205.
- [20] Cardenas R E, Dangles O. Do canopy herbivores mechanically facilitate subsequent litter decomposition in soil? A pilot study from a Neotropical cloud forest. *Ecological Research*, 2012, 27(5): 975-981.
- [21] Zhou G Y, Guan L L, Wei X H, Tang X L, Liu S G, Liu J X, Zhang D Q, Yan J H. Factors influencing leaf litter decomposition: an intersite decomposition experiment across China. *Plant and Soil*, 2008, 311(1-2): 61-72.
- [22] Brandt L A, King J Y, Hobbie S E, Milchunas D G, Sinsabaugh R L. The role of photodegradation in surface litter decomposition across a grassland ecosystem precipitation gradient. *Ecosystems*, 2010, 13(5): 765-781.
- [23] Cornwell W K, Cornelissen J H C, Amatangelo K, Dorrepaal E, Eviner V T, Godoy O, Hobbie S E, Hoorens B, Kurokawa H, Pérez-Harguindeguy N, Queded H M, Santiago L S, Wardle D A, Wright I J, Aerts R, Allison S D, van Bodegom P, Brovkin V, Chatain A, Callaghan T V, Díaz S, Garnier E, Gurvich D E, Kazakou E, Klein J A, Read J, Reich P B, Soudzilovskaia N A, Vaieretti M V, Westoby M. Plant species traits are the predominant control on litter decomposition rates within biomes worldwide. *Ecology Letters*, 2008, 11(10): 1065-1071.
- [24] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytkowski R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, 87(9): 2288-2297.
- [25] 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 马元丹, 郭培培. 柳杉凋落物在中国亚热带和热带的分解. *生态学报*, 2010, 30(7): 1758-1763.
- [26] Berg B, Berg M P, Bottner P, Box E, Breymeyer A, Ca de Anta R, Couteaux M, Escudero A, Gallardo A, Kratz W, Madeira M, Mälikönen E, McClaugherty C, Meentemeyer V, Muñoz F, Piussi P, Remacle J, Vi de Santo A. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and Eastern United States: some relationships with climate and litter quality. *Biogeochemistry*, 1993, 20(3): 127-159.
- [27] Heaney A, Proctor J. *Chemical elements in litter in forests on Volcan Barva, Costa Rica. Mineral Nutrients in Tropical Forest and Savanna Ecosystems*, Oxford: Blackwell Scientific, 1989: 225-271.
- [28] Godoy O, Castro-Díez P, Van Logtestijn R S P, Cornelissen J H C, Valladares F. Leaf litter traits of invasive species slow down decomposition compared to Spanish natives: a broad phylogenetic comparison. *Oecologia*, 2010, 162(3): 781-790.
- [29] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change in 2007-The Physical Science Basis*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.