

# 模拟降水分配季节变化对南亚热带常绿阔叶林凋落物的影响

焦敏<sup>1,2</sup>, 申卫军<sup>1\*</sup>

(1. 中国科学院华南植物园, 中国科学院退化生态系统植被恢复与管理重点实验室, 广州 510650; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 为探讨降水季节分配的变化对南亚热带常绿阔叶林凋落物的影响, 在广东省鹤山国家野外生态观测站模拟干季更干(DD)和延长干季(ED)的野外降水控制实验, 对森林生态系统中凋落物变化进行了分析研究。结果表明, 该试验林年凋落物总量为 9.24 t hm<sup>-2</sup>, 在不同时期均以叶凋落物为主, 约占 50.7%~69.3%。DD 处理显著减少了干季(10-3 月)叶凋落物量( $P<0.01$ )。虽然 DD 处理下全年总凋落物量比对照降低了 10.3%, 但差异不显著。ED 处理也减少了春季(4-5 月)的叶和花果及总凋落物量, 全年总凋落物量则比对照增加了 11.3%, 但 ED 处理对春季和全年凋落物量的影响均差异不显著。两种干旱处理对凋落物叶质量总体上影响不明显, 但 DD 处理显著减小了火力楠(*Michelia macclurei*)凋落叶的木质素含量。因此, 降水格局的变化可能会影响南亚热带森林土壤的碳汇能力。

**关键词:** 降水格局; 干旱; 凋落物; 南亚热带常绿阔叶林

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2014.06.002

## Effects of Seasonal Precipitation Variation on Litter-fall in Lower Subtropical Evergreen Broad-leaved Forest

JIAO Min<sup>1,2</sup>, SHEN Wei-jun<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Vegetation Restoration and Management of Degraded Ecosystems, South China Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to understand the effects of precipitation pattern on litter-fall in lower subtropical evergreen broad-leaved forest, a field precipitation manipulation experiment at Heshan National Forest Research Station (Guangdong Province, China) was designed to simulate decreasing dry-season (October–March) and spring (April–May) rainfall and the litter-fall responses in the forest was studied. The results showed that annual litter-fall of the experimental forest was 9.24 t hm<sup>-2</sup>, of which leaf litter was the main composition at different stages, accounting for 50.7%–69.3% of the total. The decreasing dry-season rainfall (DD) treatment significantly reduced leaf litter production ( $P<0.01$ ). The whole-year litter production was also reduced by 10.3% under the DD treatment compared to the control, but not statistically significant. Decreasing spring rainfall (ED) also reduced flower-, fruit-, and leaf-litter as well as the total during the spring time, but the whole-year litter production was increased by 11.3% compared to the control. No statistically significant difference of ED effects on the spring and whole-year litter production was found. Neither DD nor ED treatments had obvious impacts on the quality of leaf litter,

收稿日期: 2014-03-04 接受日期: 2014-05-06

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(31130011); 广东省自然科学基金重点项目(S2012020011084)资助

作者简介: 焦敏(1989~), 硕士研究生, 主要从事降水季节分配变化对凋落物方面的研究。E-mail: jiaomin@scib.ac.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shenweij@scbg.ac.cn

but DD treatment significantly reduced lignin content in leaf litter of *Michelia macclurei* ( $P < 0.05$ ). Therefore, the changes in precipitation pattern could influence the soil carbon sink in the lower subtropical forests of China.

**Key words:** Precipitation pattern; Drought; Litter-fall; Evergreen broad-leaved forest

气候变化对陆地生态系统关键的生态过程有着重要的影响,目前全球主要的气候变化是  $\text{CO}_2$  浓度和温度的升高,以及降水格局的变化<sup>[1]</sup>,降水格局变化相对于前两种气候变化具有更强的时空变异性<sup>[2]</sup>和复杂性<sup>[2]</sup>。目前,有关降水格局变化对生态系统影响的研究较少。降水通过控制陆地生态系统水分供应以及大气湿度来影响陆地生态系统的关键生态过程<sup>[3-4]</sup>,同时降水变化也影响着其他气候因子,如温度对陆地生态系统的作用<sup>[1,5]</sup>。降水格局变化主要是指降水量、时间、强度和季节分配的时空变异,以及不同形式降水(雨、雪、雾、雹)的相对贡献率的变化<sup>[6]</sup>。目前大多数降水实验主要关注于降水量的变化<sup>[2]</sup>,对降水的其他特征变化研究较少。但降雨季节分配格局已经在许多区域正经历着比较明显的变化<sup>[7]</sup>。据中国 1982–1999 年的气象资料,有明显的夏季降雨增多,秋季降雨减少,并且全年总量保持不变的趋势<sup>[8]</sup>。这种季节性变化导致了雨季和干季持续时间及雨量的变化,将对陆地生态系统的植物物候产生重要的影响<sup>[9]</sup>。中国亚热带地区也表现出雨季强降雨( $50 \sim 100 \text{ mm d}^{-1}$ )增加,干季降雨次数减少的季节变化趋势<sup>[10]</sup>。中国亚热带常绿阔叶林植被对全国碳汇的贡献率为 65%<sup>[11]</sup>,目前,有关降水季节变化将对亚热带常绿阔叶林森林生态系统的碳循环过程产生的影响研究较少。

凋落物分解是大气  $\text{CO}_2$  的重要来源<sup>[12-13]</sup>,凋落物质量和产量是影响凋落物分解的速率<sup>[14]</sup>和土壤碳输入的重要因素,对于森林生态系统碳循环研究有着重要的意义。凋落物质量即凋落物的化学属性,被 Swift 定义为凋落物的相对可分解性<sup>[15]</sup>。气候因子会通过改变凋落物的化学组分来影响凋落物的分解<sup>[16]</sup>,但降水变化究竟对凋落物质量有何影响目前还不清楚。此外,降水也是影响植物凋落速率的重要因子<sup>[17]</sup>。目前已有降水变化对凋落物量影响的研究报道<sup>[18]</sup>,主要研究了降水量、频率、降水事件大小对凋落物凋落速率的影响,认为降水与繁殖器官的凋落速率呈强烈的正相关,降水频率比降水事件大小更能影响凋落物的凋落,但对降水季节变化的相关研究较少。

本研究根据中国亚热带未来可能的降水变化趋势,利用野外降雨控制实验,探索降水季节分配变化对中国亚热带常绿阔叶林凋落物产量和质量的影响,为预测未来降水格局变化下中国亚热带常绿阔叶林森林生态系统的碳平衡动态提供科学依据。

## 1 研究地概况

试验样地位于广东省中部的鹤山森林生态系统国家野外科学观测研究站( $112^\circ 54' \text{ E}$ ,  $22^\circ 41' \text{ N}$ ),属亚热带季风气候区,年均温为  $21.7^\circ \text{C}$ ,极端最高温为  $37.5^\circ \text{C}$ ,最低温为  $0^\circ \text{C}$ ,年均降雨量为  $1700 \text{ mm}$ ,年蒸发量为  $1600 \text{ mm}$ 。土壤为砖红壤性红壤,发育母质为砂页岩。

试验林为鹤山站内的阔叶乡土树种混交林,于 1985 年人工栽植,栽植密度为  $3.5 \text{ m} \times 3.5 \text{ m}$ 。优势树种为荷木(*Schima superba*),亚优势树种为火力楠(*Michelia macclurei*),还有少量的藜蒴(*Castanopsis fissa*)、红锥(*C. hystrix*)和阴香(*Cinnamomum burmannii*)等亚热带常绿阔叶林常见树种,平均树高和胸径分别约  $14 \text{ m}$  和  $22 \text{ cm}$ ,平均冠幅为  $2.8 \text{ m} \times 2.8 \text{ m}$ ;每个样方内每种乔木约有 24 株;林下灌木主要有九节(*Psychotria asiatica*)、三叉苦(*Melicope pteleifolia*)和梅叶冬青(*Ilex asprella*)等;草本层主要有山菅(*Dianella ensifolia*)和乌毛蕨(*Blechnum orientale*)等。整个样地坡向东南,平均坡度约为  $15^\circ$ 。

## 2 研究方法

### 2.1 降水季节分配变化处理

试验处理共设 4 种,分别为:(1) 干季更干、湿季更湿(Drier dry season and wetter wet season, 简称为 DD),隔除干季(10–3 月)约 67% 的林下穿透水,并在湿季(4–9 月)以大强度降水(约  $50 \text{ mm}$ )分多次等量地加回样方,保持全年降水总量不变;(2) 延长干季、湿季更湿(Extended dry season and wetter wet season, 简称为 ED),隔除 4–5 月约 67% 的林

下穿透水(10–3月没有隔除),并在湿季(6–9月)以大强度降水(约50 mm)分多次等量地加回样方,保持全年降雨总量不变。DD和ED处理样方四周挖60~80 cm深的隔离沟并插入厚5 mm、高1 m的PVC板以隔断地表径流和壤中流;(3)隔离沟对照(Trenched control, 简称为TC),同DD和ED一样有隔离沟,但无遮雨设施;(4)空白对照(Ambient control, 简称为AC),未做任何试验处理,在林内地内圈出相同大小的样方,作为原状对照。

试验采用随机区组设计,每种处理4个重复,随机布置于4个区组,共16个12 m×12 m样方。遮雨设施由遮雨槽、支撑架和排水管构成。遮雨槽用厚3 mm的透明PVC膜两边固定在不锈方钢上制成,长均为12 m,宽50~100 cm不等,依样方内大树之间的空隙而定。每个样方内有10~12条遮雨槽,遮雨槽打开后的总宽度约8.0 m,遮除率约为67%。遮雨槽挂在高约1.5 m的支撑架上,每个样方的支撑架由16根镀锌钢管理入土壤构成立柱,并在立柱上焊接横梁形成。遮雨时把遮雨槽打开,不遮雨时则合上。隔除的雨水导入位于样方下坡的汇流槽再通过排水管导出整个样地外。加水装置是一套喷灌系统,每个样方有25个喷头挂在支撑架上,每个喷头喷洒直径约为2.5 m,喷水量为50 L h<sup>-1</sup>,喷灌所用水从约800 m外的一个池塘用高压水泵抽取。2012年10月至2013年3月鹤山站气象观测场(距样地直线距离约50 m)记录大气降雨量为382 mm,2013年4–5月的大气降雨量为700 mm。据TC和AC样方内安装的8个雨量筒记录的穿透水量计算,降水穿透率约为86%。因此,DD处理每个样方2012年10月至2013年3月共遮除穿透水约220 mm,2013年6–9月每月加水1次,每次约55 mm;ED处理每个样方2013年4–5月共遮除穿透水约403 mm,2013年6–9月每月加水2次,每次约50 mm。

DD处理的设置主要是依据Zhou等<sup>[10]</sup>的研究结果。他们对研究区域内1950–2010年的降水数据进行分析,认为近30年来干季(10月至次年3月)降水量有明显下降,湿季降水量增加,年降水量的变化趋势不明显,湿季大强度事件增加极为明显。近几年来我国西南地区连续发生了明显的春旱<sup>[19]</sup>,对农业生产等造成了严重影响,类似降水格局变化也可能在东南地区发生,对森林生态系统的可能影

响是我们设置ED处理的初衷。67%的遮除率主要是参照亚马逊热带雨林降水隔雨试验的处理强度<sup>[20–21]</sup>。

## 2.2 凋落物的收集和分析

遮水试验处理自2012年10月开始,凋落物收集从2012年11月持续至2013年10月。每个样方内随机设置3个凋落物收集框(1 m×1 m×1 m, PVC管和尼龙纱网),每月月底收集框内的凋落物,并按叶、枝条和花果分类<sup>[22]</sup>,分别称量、记录鲜重,然后将每个样方内的3个重复样充分混匀,取1/4的混合样品在65℃下烘至恒重,测量含水率,据此推算出各重复样的干重,每个降水处理共有12个重复样。

凋落物质量的分析主要针对荷木和火力楠两种的凋落叶。从每月收集的凋落物中挑取这两种的凋落叶各约10 g,65℃下烘干,并研磨过60目筛,测量凋落叶的C(重铬酸钾-硫酸氧化法<sup>[23]</sup>)、N(靛酚蓝比色法<sup>[24]</sup>)、P(钼锑抗比色法<sup>[24]</sup>)和木质素含量(硫酸消化法<sup>[25]</sup>),并计算C:N、木质素:N。分别于2012年11月(DD处理期)、2013年5月(ED处理期)和2013年9月(加水处理期)对凋落叶质量进行分析。

## 2.3 统计分析

采用SPSS16.0中的Repeated-Measures ANOVA进行树种、采样时间及处理之间的差异分析,并用One-Way ANOVA进行相同树种及采样时间下不同处理间的差异分析,用Tukey HSD进行多重比较。由于2012年11月荷木与火力楠的C含量,2013年5月火力楠的N含量,2013年9月荷木与火力楠的木质素及火力楠的木质素/N的数据不满足方差齐次性,故采用Dunnett's T3进行处理间效应的比较。

# 3 结果和分析

## 3.1 凋落物量

林内凋落物量表现出明显的季节动态(图1)。叶凋落高峰主要在3–4月份,平均月凋落量为0.92 t hm<sup>-2</sup>,其他时期为0.36 t hm<sup>-2</sup>。枝凋落主要在湿季的月份,湿季枝平均月凋落量为0.17 t hm<sup>-2</sup>。

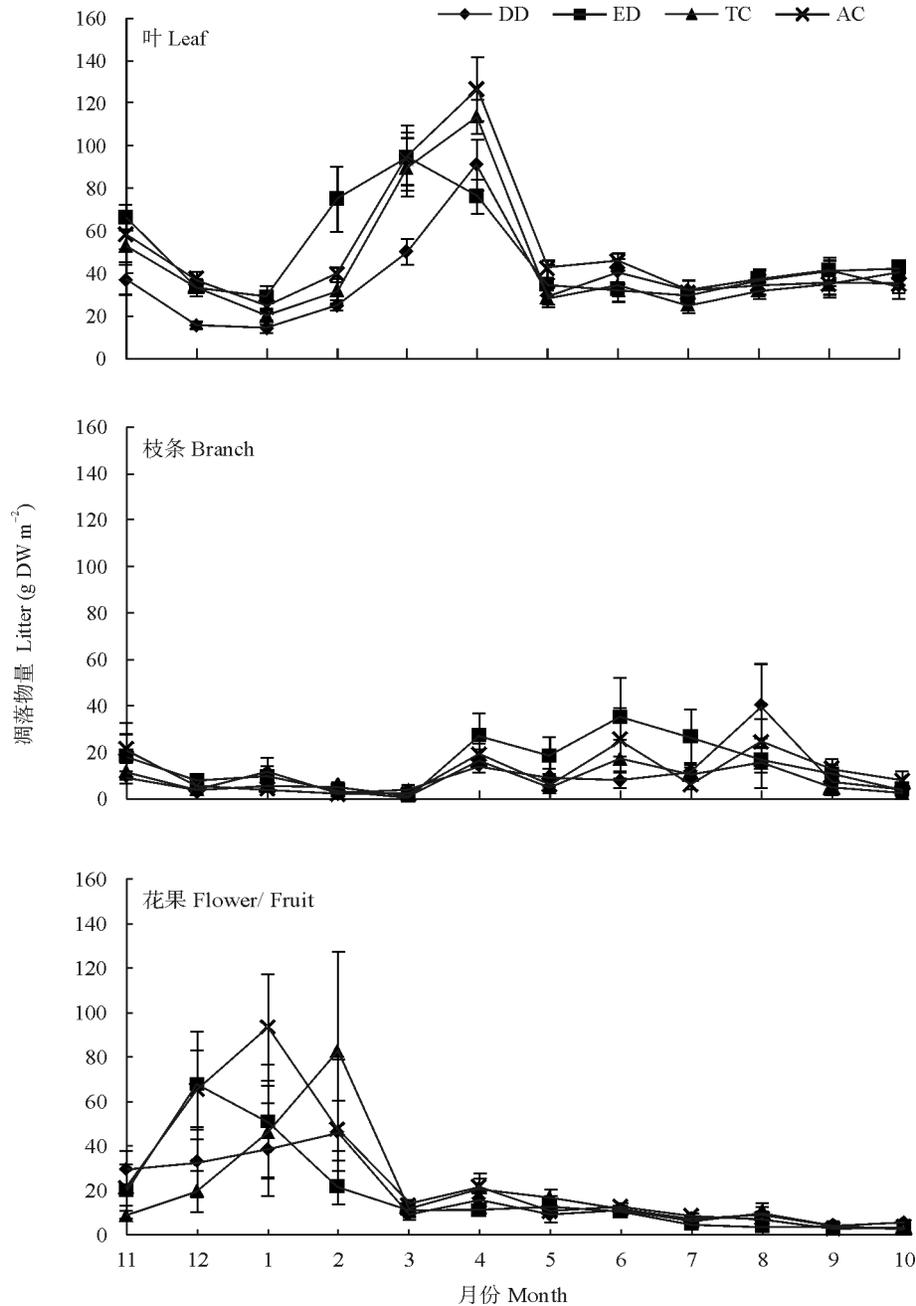


图1 凋落物量的月动态。DD: 干季更干、湿季更湿; ED: 延长干季、湿季更湿; TC: 隔离沟对照; AC: 对照。以下图表同。n=12

Fig. 1 Monthly changes in litter-fall. DD: Drier dry season and wetter wet season; ED: Extended dry season and wetter wet season; TC: Trenched control; AC: Control. The same is following Figures and Tables. n=12.

而花果凋落主要在12–2月间,该时期花果平均月凋落量为 $0.51 \text{ t hm}^{-2}$ 。该试验林年凋落物量约为 $9.24 \text{ t hm}^{-2}$ ,其中叶凋落物在不同时期均占优势,约为50.72%~69.34%,枝约占7.26%~14.8%,花果约占13.73%~23.30%。

为了分析不同降水处理对凋落物量的影响,将每月的凋落物量按不同处理期进行累加,分别得到DD处理期(2012年10月–2013年3月)、ED处理

期(2013年4月–2013年5月),加水处理期(2013年6月–2013年9月)和全年累加量。在DD处理期(图2:A),凋落物总量、枝和花果凋落物量在4种降水处理间均差异不显著,只有叶凋落量显著小于ED和AC处理( $P=0.005<0.01$ ),虽然DD平均叶凋落量( $1.41 \text{ t hm}^{-2}$ )比TC处理的( $2.28 \text{ t hm}^{-2}$ )少38.2%,但差异不显著。在ED处理期(图2:B),凋落物总量、叶、枝和花果凋落物量在不同处理间未见显著

差异,但 DD 和 ED 处理的总凋落物、叶和花果凋落物量均小于 TC,总凋落物量 DD、ED 分别为  $1.69 \text{ t hm}^{-2}$  和  $1.81 \text{ t hm}^{-2}$ , TC 为  $2.01 \text{ t hm}^{-2}$ ;叶凋落量 DD、ED 分别为  $1.2 \text{ t hm}^{-2}$  和  $1.1 \text{ t hm}^{-2}$ , TC 为  $1.42 \text{ t hm}^{-2}$ ;花果凋落量 DD、ED 分别为  $0.26 \text{ t hm}^{-2}$  和  $0.24 \text{ t hm}^{-2}$ , TC 为  $0.37 \text{ t hm}^{-2}$ 。加水处理期(图 2: C),不同处理间的总凋落物和各类凋落物量的差异同样不显著,但 DD 处理的总凋落物量( $2.48 \text{ t hm}^{-2}$ )和叶凋落物量( $1.5 \text{ t hm}^{-2}$ )都高于 TC 处理的(分别

为  $2.07 \text{ t hm}^{-2}$  和  $1.25 \text{ t hm}^{-2}$ ),同时 ED 总凋落物量( $2.51 \text{ t hm}^{-2}$ )和叶凋落物量( $1.4 \text{ t hm}^{-2}$ )也都高于 TC。从全年凋落物累加量来看(图 2:D),不同处理间的凋落物量也没有显著差异,但 DD 处理的总凋落物量( $7.89 \text{ t hm}^{-2}$ )和叶凋落物量( $4.44 \text{ t hm}^{-2}$ )都小于 TC 处理的(分别为  $8.79 \text{ t hm}^{-2}$  和  $5.36 \text{ t hm}^{-2}$ ),而 ED 处理的总凋落物量( $9.9 \text{ t hm}^{-2}$ )和叶凋落物量( $5.9 \text{ t hm}^{-2}$ )都大于 TC。此外, DD 处理期及全年的花果凋落物量都表现出 DD、ED 和 TC 小于 AC 的现象。

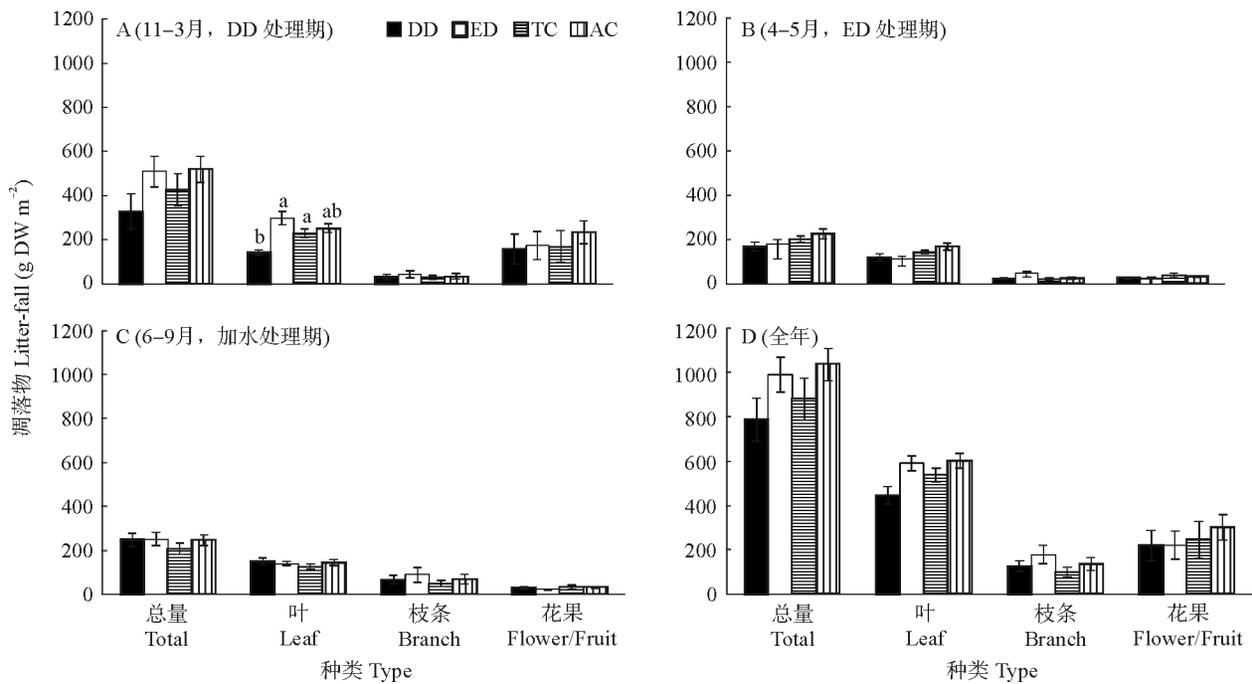


图 2 不同处理期凋落物的累加量。A: DD 处理期(11-3 月); B: ED 处理期(4-5 月); C: 加水处理期(6-9 月); D: 全年。n=12

Fig. 2 Cumulative litter amount at different treatment periods. A: DD treatment period, November–March; B: ED treatment period, April–May; C: Adding water treatment period, June–September; D: Whole year. n=12.

### 3.2 凋落物的质量

重复测量方差分析结果表明,荷木与火力楠凋落叶的化学性质在不同季节间有显著差异 ( $P<0.05$ ),荷木的 C、N、P、C : N、木质素 : N 和火力楠的 C、木质素、C : N、木质素 : N 都表现出湿季高于干季,而荷木的木质素和火力楠的 N、P 则是干季要高于湿季。此外,荷木的 N、P 含量都显著大于火力楠的( $P<0.05$ ),而木质素、C : N 和木质素 : N 都显著小于火力楠的( $P<0.05$ )。在不同处理时期,荷木和火力楠的 C 含量分别为  $49.9\% \sim 52.67\%$  和  $49.51\% \sim 52.26\%$ ;N 含量分别为  $1.23\% \sim 1.76\%$  和  $0.97\% \sim 1.15\%$ ;P 含量分别为

$0.0279\% \sim 0.0418\%$  和  $0.023\% \sim 0.0286\%$ ;木质素含量分别为  $46.29\% \sim 51.79\%$  和  $50.27\% \sim 55.28\%$ 。

分别对两树种不同降水处理间的凋落叶化学成分进行差异分析,结果表明,除火力楠凋落叶的 P 和木质素含量在不同处理间有显著差异外( $P<0.05$ ),荷木和火力楠凋落叶的其他化学成分在不同处理间的差异不显著。在 DD 处理期,DD、ED 和 TC 处理的火力楠凋落叶的 P 含量都小于 AC 处理,其中 ED 和 TC 显著小于 AC ( $P=0.016$ ),而 ED、TC 和 AC 处理的木质素含量都大于 DD 处理,其中 ED 和 AC 显著大于 DD ( $P=0.016$ )。此外,在不同处理时期,DD、ED 和 TC 处理的荷木凋落叶

表 1 不同降水处理下荷木和火力楠凋落叶的化学性质

Table 1 Leaf litter quality of *Schima superba* and *Michelia macclurei* under different precipitation treatments

处理 Treatment		有机碳 Organic C (mg g <sup>-1</sup> )	N (mg g <sup>-1</sup> )	C : N	P (mg g <sup>-1</sup> )	木质素 Lignin (mg g <sup>-1</sup> )	木质素 : 氮 Lignin : N
荷木 <i>Schima superba</i>							
2012-11	DD	492.51±66.72	14.00±1.20	35.66±7.78	0.33±0.08	489.61±53.90	35.17±4.83
	ED	514.00±32.57	15.35±1.21	33.69±3.92	0.31±0.03	541.49±33.48	35.33±1.34
	TC	517.67±37.45	13.65±1.48	38.41±6.41	0.31±0.02	500.09±30.12	39.84±3.03
	AC	527.43±15.07	14.91±1.38	35.63±3.70	0.33±0.02	540.60±23.71	33.82±4.40
	$F_{(3,12)}$	0.486	1.404	0.462	0.236	2.469	2.504
	$P$	0.698	0.289	0.714	0.87	0.112	0.16
2013-05	DD	525.96±10.98	17.22±2.61	31.04±4.88	0.43±0.07	446.53±30.69	26.43±5.30
	ED	521.76±10.76	18.10±1.69	29.06±3.36	0.43±0.13	473.21±12.49	26.29±2.22
	TC	527.56±15.11	17.05±0.81	31.01±2.14	0.44±0.06	434.36±41.99	28.65±3.88
	AC	533.12±6.92	18.20±2.09	29.58±3.90	0.37±0.06	486.37±42.59	23.95±1.92
	$F_{(3,12)}$	0.552	0.385	0.294	0.399	1.167	1.032
	$P$	0.659	0.766	0.829	0.756	0.247	0.42
2013-09	DD	492.65±18.36	11.86±2.16	42.59±7.76	0.25±0.02	490.66±15.40	42.14±5.68
	ED	500.41±17.66	11.69±2.26	44.01±8.54	0.29±0.05	485.23±6.45	42.65±7.88
	TC	500.49±15.45	12.38±0.39	40.47±2.30	0.29±0.03	487.75±29.83	39.53±1.64
	AC	502.63±11.87	13.49±1.77	37.74±5.02	0.29±0.02	489.06±12.55	36.51±4.18
	$F_{(3,12)}$	0.297	0.827	0.729	1.127	0.058	1.107
	$P$	0.827	0.504	0.554	0.377	0.981	0.384
火力楠 <i>Michelia macclurei</i>							
2012-11	DD	526.49±6.08	11.30±0.33	46.63±1.23	0.32±0.07ab	485.11±13.25a	42.94±0.31
	ED	507.43±28.31	11.37±1.79	45.40±7.18	0.24±0.03a	548.75±10.58b	49.05±6.81
	TC	495.18±54.14	11.01±0.76	45.14±5.54	0.26±0.01a	520.07±29.72ab	49.58±4.46
	AC	510.67±12.09	12.49±1.82	41.53±5.99	0.33±0.03b	543.79±26.42b	42.26±5.89
	$F_{(3,12)}$	0.579	0.884	0.551	5.336	5.394	2.082
	$P$	0.641	0.479	0.658	0.016	0.016	0.161
2013-05	DD	509.14±21.33	10.87±0.45	46.83±0.51	0.24±0.03	491.04±25.64	45.19±2.30
	ED	530.03±11.51	11.90±1.52	45.07±5.72	0.28±0.03	513.52±30.50	43.87±8.10
	TC	520.75±16.78	10.58±1.77	50.38±9.47	0.25 ± 0.03	496.19±16.89	48.04±6.92
	AC	526.61±5.00	11.55±1.14	45.94±4.88	0.26±0.02	498.92±17.82	43.19±3.56
	$F_{(3,12)}$	1.512	0.821	0.593	0.1426	0.424	0.56
	$P$	0.262	0.507	0.631	0.284	0.739	0.652
2013-09	DD	501.42±6.46	9.11±0.55	55.19±3.92	0.19±0.02	550.15±5.01	60.51±3.10
	ED	486.02±41.60	10.13±1.14	48.64±8.25	0.23±0.03	552.60±19.57	55.20±7.59
	TC	504.97±16.02	9.73±0.76	52.13±4.37	0.24±0.02	552.21±30.92	57.24±2.81
	AC	489.68±14.90	9.91±0.76	49.54±2.57	0.24±0.04	555.65±22.59	55.92±4.76
	$F_{(3,12)}$	0.522	0.928	1.039	1.727	0.074	0.708
	$P$	0.676	0.46	0.413	0.219	0.973	0.567

$n=4$ 。数据后不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

$n=4$ . Data followed different letters indicate significant difference at 0.05 level.

的木质素：N 都大于 AC 处理。

## 4 讨论和结论

### 4.1 凋落物量

试验林的叶和花果有比较集中的凋落高峰期，而枝没有，这是因为叶和花果的凋落主要由植物气候控制，而枝的凋落主要是受湿季台风等极端天气的影响。此外，叶和花果凋落物占凋落物总量的绝大部分，故而研究长期降水季节变化对凋落物量的影响，可以着重关注叶和花果凋落物量。

本研究结果表明，DD 和 ED 两种干旱处理都比较明显地降低了植物叶和花果的凋落物量。这是因为水分输入的减少抑制了植物光合作用，从而抑制植物生长，减少了叶和花果的生产量<sup>[26]</sup>。此外，对不同处理表层土壤含水量的测定结果表明，干季隔除 67% 穿透水导致表层 0~10 cm 土壤含水量降低了 24%。因此，隔除穿透水导致土壤湿度下降，从而影响凋落物与土壤有机质的分解、营养释放<sup>[13,27]</sup>和植物养分的吸收，也影响了植物的光合生产与生长<sup>[18,28]</sup>。植物的叶片和花果多是当年生长的，对于当年的干旱处理产生了明显的响应，而枝条是多年生的，故枝的凋落物产量未发生明显的变化，长期的 DD 和 ED 处理可能会对枝的凋落物产量产生一定的影响。本试验中 DD 处理的凋落物量比 ED 处理的下降得更多，这是因为 DD 处理的干旱强度更大、持续时间更长。因此，未来干季更干和干季延长的降水格局变化可能会抑制植物生长与繁殖，降低森林生态系统的生产力，减少凋落物 C 向土壤的输入，从而对森林土壤 C 储量和动态产生重要影响。

DD 处理降低植物凋落物量的效应，在处理结束后的 2 个月依然存在，这表明 DD 处理有一定的滞后效应。随着湿季降雨的增加，干旱胁迫逐渐被缓解，凋落物量得到补偿，DD 和 ED 降低植物凋落物量的效应最终被缓解。此外，试验为隔离侧向地表径流和壤中流所设置的隔离沟对植物的叶和花果凋落物量也产生了抑制作用，其中花果凋落物量的减少更为明显。这是因为对于坡地而言，侧向水分输入也是一个重要的土壤水分来源，水分输入的减少抑制了植物的生长，而蒸腾作用强的功能叶会夺取其他组织的水分<sup>[29]</sup>，从而使得花果表现出了

更强的水分敏感性。

### 4.2 凋落物质量

本研究结果表明，植物凋落叶的质量在一年的不同时期会有显著的变化，并且不同树种的变化趋势并不一致，这是由于一年内不同季节的环境条件（例如温度、湿度）有很大差异，这些环境条件的变化会影响植物的养分吸收、运输及转化等过程，从而导致不同时期凋落叶的质量发生较大的变化。不同树种的生长对温湿度及营养元素的要求并不相同，其内在调节机制也有较大的差别<sup>[30]</sup>，故而不同树种会有不同的响应。此外，荷木与火力楠凋落叶在各个时期的化学性质比较结果表明，荷木凋落叶的质量优于火力楠，可能分解速率更快。

DD 处理显著降低了火力楠凋落叶的木质素含量，这与通常人们认为的植物会通过增加木质素含量来保护叶片不受干旱胁迫<sup>[31]</sup>的观点相反，木质素含量降低可能是因为干旱导致了植物体内活性氧产生和降解失衡<sup>[32]</sup>，影响了木质素的生物合成过程<sup>[33]</sup>。此外，干旱也抑制了植物光合作用，降低了各种植物形态建成<sup>[34]</sup>。这是短期干旱处理的结果，长期处理可能导致不同的结果。

研究结果显示样方四周的隔离沟导致火力楠凋落叶 P 含量显著减低，荷木凋落叶的木质素：N 增加。其原因也可能是隔离沟阻断了侧向水流，减少了水分输入，降低了植物对 N、P 吸收和转运的能力<sup>[35]</sup>；但由于水分胁迫对 N 吸收的降低比限制木质素合成效应更大，因此导致荷木木质素：N 的总体增加。

综上所述，即使保持年降水总量不变，干季更干依然能够比较明显地减少南亚热带常绿阔叶林当年干季的凋落物量，并且该作用在干季结束后能够持续一段时间。虽然后期降水增加能在一定程度上增加凋落物量，但干季更干还是导致了全年凋落物量的减少。延长干季仅导致了其处理期（雨季的 4-5 月份）凋落物量的下降，而全年凋落物量略有增加。干季更干对植物凋落叶的质量产生了一定的影响，凋落叶质量的变化将会导致其分解和向土壤养分输入等过程的变化，从而对该森林生态系统的各种关键生态过程产生影响。不同树种的凋落叶质量对降雨季节分配变化的响应并不保持一致<sup>[5]</sup>，火力楠相对荷木表现出了更明显的降雨季节

变化敏感性。本研究是降雨季节分配变化在1年内处理的结果,长期试验处理是否与短期结果相同,还有待于进一步的观测和分析。

### 参考文献

- [1] Hoepfner S S, Dukes J S. Interactive responses of old-field plant growth and composition to warming and precipitation [J]. *Glob Change Biol*, 2012, 18(5): 1754–1768.
- [2] Beier C, Beierkuhnlein C, Wohlgemuth T, et al. Precipitation manipulation experiments: Challenges and recommendations for the future [J]. *Ecol Lett*, 2012, 15(8): 899–911.
- [3] Battipaglia G, De Micco V, Brand W A, et al. Drought impact on water use efficiency and intra-annual density fluctuations in *Erica arborea* on Elba (Italy) [J]. *Plant Cell Environ*, 2014, 37(2): 382–391.
- [4] Flanagan L B, Farquhar G D. Variation in the carbon and oxygen isotope composition of plant biomass and its relationship to water-use efficiency at the leaf- and ecosystem-scales in a northern Great Plains grassland [J]. *Plant Cell Environ*, 2014, 37(2): 425–438.
- [5] Morgan J, Pataki D, Körner C, et al. Water relations in grassland and desert ecosystems exposed to elevated atmospheric CO<sub>2</sub> [J]. *Oecologia*, 2004, 140(1): 11–25.
- [6] Seneviratne S I, Corti T, Davin E L, et al. Investigating soil moisture-climate interactions in a changing climate: A review [J]. *Earth-Sci Rev*, 2010, 99(3): 125–161.
- [7] Christensen J H, Christensen O B. A summary of the prudence model projections of changes in European climate by the end of this century [J]. *Clim Change*, 2007, 81(1): 7–30.
- [8] Fang J Y, Piao S L, He J S, et al. Increasing terrestrial vegetation activity in China, 1982–1999 [J]. *Sci China Series C Life Sci*, 2004, 47(3): 229–240.
- [9] Peñuelas J, Filella I. Phenology: Responses to a warming World [J]. *Science*, 2001, 294(5543): 793–795.
- [10] Zhou G Y, Wei X H, Wu Y P, et al. Quantifying the hydrological responses to climate change in an intact forested small watershed in southern China [J]. *Glob Change Biol*, 2011, 17(12): 3736–3746.
- [11] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China [J]. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009–1013.
- [12] Heim A, Frey B. Early stage litter decomposition rates for Swiss forests [J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(3): 299–313.
- [13] Walse C, Berg B, Sverdrup H. Review and synthesis of experimental data on organic matter decomposition with respect to the effect of temperature, moisture, and acidity [J]. *Environ Rev*, 1998, 6(1): 25–40.
- [14] Couteaux M M, Bottner P, Berg B. Litter decomposition, climate and litter quality [J]. *Trends Ecol Evol*, 1995, 10(2): 63–66.
- [15] Swift M J, Heal O W, Anderson J M. *Decomposition in Terrestrial Ecosystems* [M]. California: University of California Press, 1979: 118–163.
- [16] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: A triangular relationship [J]. *Oikos*, 1997, 79(3): 439–449.
- [17] Pressland A J. Litter production and decomposition from an overstorey of *Eucalyptus* spp. on 2 catchments in the New-England region of New-South-Wales [J]. *Aust J Ecol*, 1982, 7(2): 171–180.
- [18] Travers S K, Eldridge D J. Increased rainfall frequency triggers an increase in litter fall rates of reproductive structures in an arid eucalypt woodland [J]. *Aust J Ecol*, 2013, 38(7): 820–830.
- [19] Zhang L, Xiao J F, Li J, et al. The 2010 spring drought reduced primary productivity in southwestern China [J/OL]. *Environ Res Lett*, 2012, 7(4): 045706, doi: 10.1088/1748-9326/7/4/045706.
- [20] Nepstad D C, Moutinho P, Dias M B, et al. The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest [J]. *J Geophys Res-Atmos*, 2002, 107(D20): LBA 53-1–LBA 53-18.
- [21] Lola da Costa A C, Galbraith D, Almeida S, et al. Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest [J]. *New Phytol*, 2010, 187(3): 579–591.
- [22] Zhang D Q, Ye W H, Yu Q F, et al. The litter-fall of representative forests of successional series in Dinghushan [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, 20(6): 938–944.  
张德强, 叶万辉, 余清发, 等. 鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究 [J]. *生态学报*, 2000, 20(6): 938–944.
- [23] Dong M. *Survey Observation and Analysis of Terrestrial Bio-communities* [M]. Beijing: Standards Press of China, 1997: 152–153.  
董明. 陆地生物群落调查观测与分析 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 152–153.
- [24] Liu G S. *Soil Physical and Chemical Analysis & Description of Soil Profiles* [M]. Beijing: Standards Press of China, 1996: 34–40.  
刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述 [M]. 北京: 中国标准出版社, 1996: 34–40.
- [25] Ryan M G, Melillo J M, Ricca A. A comparison of methods for determining proximate carbon fractions of forest litter [J]. *Can J For Res*, 1990, 20(2): 166–171.

- [26] Zhou X, Ge Z M, Kellomaki S, et al. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and temperature on leaf characteristics, photosynthesis and carbon storage in aboveground biomass of a boreal bioenergy crop (*Phalaris arundinacea* L.) under varying water regimes [J]. *GCB Bioenergy*, 2011, 3(3): 223–234.
- [27] Yasumura Y, Hikosaka K, Hirose T. Resource allocation to vegetative and reproductive growth in relation to mast seeding in *Fagus crenata* [J]. *For Ecol Manag*, 2006, 229(1/2/3): 228–233.
- [28] Rustad L E, Campbell J L, Marion G M, et al. A meta-analysis of the response of soil respiration, net nitrogen mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming [J]. *Oecologia*, 2001, 126(4): 543–562.
- [29] Lambers H, Chapin F S, Pons T L. *Plant Physiological Ecology* [M]. New York, NY: Springer, 2008: 113–144.
- [30] Feng Q H, Shi Z M, Dong L L. Response of plant functional traits to environment and its application [J]. *Sci Silv Sin*, 2008, 44(4): 125–131.  
冯秋红, 史作民, 董莉莉. 植物功能性状对环境的响应及其应用 [J]. *林业科学*, 2008, 44(4): 125–131.
- [31] Erhagen B, Oquist M, Sparman T, et al. Temperature response of litter and soil organic matter decomposition is determined by chemical composition of organic material [J]. *Glob Change Biol*, 2013, 19(12): 3858–3871.
- [32] Tambussi E A, Bartoli C G, Beltrano J, et al. Oxidative damage to thylakoid proteins in water-stressed leaves of wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *Physiol Plant*, 2000, 108(4): 398–404.
- [33] Alvarez S, Marsh E L, Schroeder S G, et al. Metabolomic and proteomic changes in the xylem sap of maize under drought [J]. *Plant Cell Environ*, 2008, 31(3): 325–340.
- [34] Onillon B, Durand J L, Gastal F, et al. Drought effects on growth and carbon partitioning in a tall fescue sward grown at different rates of nitrogen-fertilization [J]. *Eurp J Agron*, 1995, 4(1): 91–99.
- [35] Gonzalez-Dugo V, Durand J L, Gastal F, et al. Short-term response of the nitrogen nutrition status of tall fescue and Italian ryegrass swards under water deficit [J]. *Aust J Agri Res*, 2005, 56(11): 1269–1276.