

DOI: 10.5846/stxb201708021385

杨予静, 刘世荣, 陈琳, 王晖, 卢立华. 模拟降雨减少对马尾松人工林凋落物量及其化学性质的短期影响. 生态学报, 2018, 38(13): - .

Yang Y J, Liu S R, Chen L, Wang H, Lu L H. Short-term effects of manipulated throughfall reduction on the quantity and quality of litterfall in a *Pinus massoniana* plantation. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(13): - .

模拟降雨减少对马尾松人工林凋落物量及其化学性质的短期影响

杨予静¹, 刘世荣^{1,*}, 陈琳^{2,3}, 王晖¹, 卢立华^{2,3}

1 中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所, 国家林业局森林生态环境重点实验室, 北京 100091

2 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

3 广西友谊关森林生态系统定位观测研究站, 凭祥 532600

摘要:为研究气候变化背景下降水格局变化对森林生长和碳固持的影响, 2012 年在我国南亚热带地区选择广泛分布的马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林为研究对象, 分别设置 3 块 20 m×20 m 的模拟降雨减少 50% 和对照样地, 每个样地随机设置 5 个距地面 40 cm 的 1 m×1 m 的凋落物收集框, 2016 年 1—12 月每隔 1 月收集各样地林冠层凋落物, 比较研究减水处理对凋落物组分产量和基本化学性质的短期影响。结果表明: 马尾松人工林针叶凋落物量及其所占比例显著高于其它凋落物组分 ($P < 0.05$), 减雨处理对马尾松人工林凋落叶和总量无显著影响 ($P > 0.05$)。与对照相比, 减雨处理分别增加凋落针叶含碳量和凋落果含氮量 27.4 g/kg 和 5.1 g/kg, 以及凋落针叶的木质素含量、阔叶纤维素含量和皮半纤维素含量 3.9%、5.2% 和 4.0% ($P < 0.05$), 但显著降低凋落皮碳、纤维素含量和凋落果的碳氮比 ($P < 0.05$)。凋落物 N、P 含量具有协同性, 含碳量与木质素含量显著正相关 ($P < 0.05$)。模拟降雨减少处理初期并未显著改变南亚热带马尾松人工林总凋落物量, 但增加了凋落针叶的木质素含量和含碳量。本研究预示短期穿透雨减少可能降低南亚热带马尾松人工林凋落物的分解能力, 由此降低马尾松人工林土壤中凋落物源性碳的输入量。

关键词:模拟降雨减少; 人工林; 凋落物; 马尾松

Short-term effects of manipulated throughfall reduction on the quantity and quality of litterfall in a *Pinus massoniana* plantation

YANG Yujing¹, LIU Shirong^{1,*}, CHEN Lin^{2,3}, WANG Hui¹, LU Lihua^{2,3}

1 Key Laboratory of Forest Ecology and Environment, China's State Forestry Administration, Institute of Forest Ecology, Environment and Protection, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

2 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

3 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China

Abstract: To explore the impacts of precipitation pattern change on forest growth and carbon sequestration under climate change, a manipulation experiment of throughfall reduction was conducted in a *Pinus massoniana* plantation in southern subtropical China since 2012, which included three 20 m × 20 m plots with a 50% throughfall exclusion and their respective control plots. Litterfall samples were collected from January to December every two months in 2016, from five 1 m × 1 m aboveground (40 cm) litterfall traps in each plot, and were separated into different components to measure the mass percentage, biomass, and basic chemical properties. The results showed that litterfall quantity and the proportion of needles

基金项目: 国家国际科技合作专项项目 (2015DFA31440); 国家林业公益性行业科研专项 (201404201)

收稿日期: 2017-08-02; **网络出版日期:** 2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liusr@caf.ac.cn

were both significantly higher than other litterfall components in the plantation ($P < 0.05$). The short-term manipulated drought did not significantly affect the needle quantity or total litterfall ($P > 0.05$). Compared to the control, the throughfall treatment enhanced the C content of needle litterfall and N content of fruit litterfall by 27.4 g/kg and 5.1 g/kg, respectively ($P < 0.05$). The treatment also increased the lignin content of needle litterfall, cellulose content of broadleaf litterfall, hemicellulose content of skin litterfall by 3.9%, 5.2%, and 4.0%, respectively, while it decreased the C and cellulose content of skin litterfall as well as the C:N ratio of fruit litterfall ($P < 0.05$). The positive correlations between the N and P content of the litterfall, and between the C and lignin content of the litterfall, were both significant ($P < 0.05$). These results indicated that the short-term experimental throughfall reduction did not significantly alter total litterfall, while it increased the lignin and C content of needle litterfall, in a southern subtropical *P. massoniana* plantation. Our study further suggests a possible decrease in the decomposition ability of litterfall, which could reduce the input of litter-derived soil carbon in a southern subtropical *P. massoniana* plantation, under short-term manipulated drought conditions.

Key Words: manipulated precipitation reduction; plantation; litterfall; *Pinus massoniana*

以大气 CO₂浓度的持续上升和气候变暖为特征的全球气候变化正在改变全球降水格局和水循环^[1],长时间热浪和干旱时间在热带地区最为严重^[2]。降水格局的变化直接改变土壤有效水分,影响植物地下及地上器官的生理代谢和土壤微生物构成及其活性,进而调节陆地生态系统碳循环的相关过程^[3]。降水对森林生态系统碳氮等物质循环的影响备受关注,其中森林凋落物的生产和分解是森林生态系统对气候变化响应最重要的议题之一^[4]。

作为森林生态系统的重要组成部分,森林凋落物是土壤有机碳库和养分的重要来源之一^[5]。其化学性质影响着凋落物的分解速率和养分释放^[6],并由此影响植物生长和净生产力以及森林生态系统的固碳能力。目前,学者针对不同森林类型和经营方式的凋落物量、季节动态、C、N、P 化学计量特征、混合凋落物的分解、养分释放与归还等做了大量研究。研究表明,不同年龄、结构组成、演替阶段的森林生态系统具有不同的凋落物量^[7],凋落物组分反映了不同森林类型的凋落物特点^[8]。气候因素、森林经营活动通过影响植被组成、土壤环境和分解者群落影响凋落物的产生和分解^[9-11]。

但是,在气候变化背景下,特别是降水格局改变对森林生态系统凋落物量及其化学性质影响的研究相对缺乏。由于干旱持续时间、影响凋落物分解的气候因素、植被与分解者群落、凋落物质量不同,干旱可以增加总凋落物量^[5,12]或对其无影响^[13],但对凋落物分解多表现为抑制作用^[14-15]。因此,降雨减少对森林凋落物产生、分解及其相关过程的影响存在复杂性和地区变异性,使得植物生长和土壤碳储量对气候变化的响应具有较大的不确定性。研究降水格局改变对森林生态系统不同组分凋落物量及其化学性质的影响有助于揭示植物生长和森林生态系统物质循环对气候变化的响应与适应机理。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国南方特有的一种乡土树种,分布广,适应性强,生长迅速,是群落演替的先锋树种和主要的造林树种^[16],研究马尾松人工林生态系统对气候变化的响应意义重大。然而,尚未见气候变化引起的干旱胁迫对马尾松林凋落物产生和化学性质影响的研究报道。因此,本研究以南亚热带马尾松人工林为研究对象,通过建立穿透雨减少固定样地模拟降雨减少,研究不同凋落物组分产生和化学性质对模拟降雨减少的响应,以期探索气候变化背景下干旱和降水格局变化对森林生长和土壤碳输入的影响。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域

研究区域位于中国广西壮族自治区西南边陲的凭祥市境内中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波实验林场(22°10'N, 106°50'E)。该地区属于南亚热带季风气候区域内的西南部,属湿润半湿润气候,干湿季分明。境内光照充足,降水充沛,年均降雨量 1241—1695mm,主要发生在每年 5—9 月;年蒸发量 1261—

1388mm,相对湿度 80%—84%。年平均气温 21—22℃,平均月最低温度 12.1℃,平均月最高温度 26.3℃;≥10℃活动积温 6000—7600℃。主要地貌类型以低山丘陵为主,土壤为地带性红壤,地力相对均匀。本研究选取当地具有代表性的马尾松人工林作为研究对象,2016 年 9 月土壤基本理化性质如表 1。

试验区马尾松于 1983 年种植于杉木采伐迹地,海拔约 550m,坡长约 150m,坡位中上,坡面较为平坦。初植密度为 2500 株/hm²。经过多年的间伐经营,现马尾松林林分密度为 275 株/hm²,平均树高 19.5m,平均胸径为 32.0cm。林下灌草盖度约为 35.4%,主要物种为淡竹叶 (*Lophatherum gracile*)、毛叶算盘子 (*Glochidion hirsutum*)、露籽草 (*Ottocloa nodosa*)、野牡丹 (*Melastoma candidum*)、越南悬钩子 (*Rubus cochinchinensis*)、玉叶金花 (*Mussaenda pubescens*)、东方乌毛蕨 (*Blechnum orientale*)、荇草 (*Arthraxon hispidus*)、白花酸藤子 (*Embelia ribes*)、五节芒 (*Miscanthus floridulus*) 等。

表 1 土壤基本理化性质(平均值±标准误)

Table 1 Soil properties in the study site (mean ± standard error)

组别 Group	土壤容重/(g/cm ³) Bulk density	pH 值 pH value	TOC 含量/% TOC content	TN 含量/(g/kg) TN content	TP 含量/(g/kg) TP content	AN 含量/(mg/kg) AN content	AP 含量/(mg/kg) AP content
对照 Control	1.11±0.02	3.91±0.09	3.93±0.40	2.62±0.38	0.28±0.01	189.96±17.65	2.45±0.23
处理 Treatment	1.09±0.04	3.77±0.06	5.70±0.81	2.73±0.30	0.31±0.01	219.55±17.73	2.86±0.37
P 值 P value	0.597 ns	0.274 ns	0.122 ns	0.832 ns	0.218 ns	0.302 ns	0.395 ns

P 值为对照与处理样地间土壤性质的 t 检验结果;TOC、TN、TP、TK、AN、AP 分别表示土壤总有机碳、全氮、全磷、全钾、碱解氮、有效磷含量;ns: P>0.05

1.2 实验设计

在马尾松人工林中设置 6 块 20 m × 20 m 样地(样地间彼此距离 30 m 以上),实施 2 种不同的实验处理(对照和减少 50%穿透雨),每个处理 3 个重复。2012 年 9 月,沿坡地走势在每个减雨处理样地三边周围(上、左、右)埋入 PVC 膜(入土深度 1 m)并修建水泥挡水墙(宽 0.1 m,高出地面 0.3 m,入土深度 0.3 m),其外侧修建高出地面 0.3 m 的排水沟以防止样地内外土壤水分交换。减雨样地通过平行于坡面方向布设的 120 块 PEP 膜(0.5 m × 3.5 m,透光率>95%)截留林内穿透雨,PEP 膜以 30 cm 的间距架设在 0.5—1.5m 高的固定支架上,铺设总面积为样地面积的 50%。截留的穿透雨通过导水管导出样地。为降低安装减雨装置对样地的影响,在对照样地架设相同的固定支架并以相同方式铺设孔径为 3mm 的白色尼龙网。经测试,各样地装置下照度无显著差异。定期对 PEP 膜和尼龙网上的凋落物进行收集并归还到样地。用 Hobo 小型自动气象站记录各样地的土壤温湿度,记录间隔时间为 1h,每个样地 3 个重复。

1.3 调查取样与样品分析

每个样地中随机设置 5 个 1 m × 1 m 收集框(离地面约 40 cm)用以收集林冠层凋落物,分别于 2016 年 1—12 月每隔 1 月收集每个框中的凋落物(共 6 次取样)。将每个样地中 5 个收集框内凋落物充分混合,区分针叶、阔叶、<2 cm 枝、皮、果和其他(主要为花、种子等)后,在 65℃烘至恒重称量,计算单位面积的凋落物产生速率和凋落物各组分所占比例。各凋落物组分的含碳量用水外氧化加热法测定,含氮量用全自动凯氏定氮仪(UK152 Distillation & Titration Unit,意大利 Velp 公司)测定,含磷量用硝酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定,半纤维素、纤维素和木质素含量用纤维素测定仪(FIWE6,意大利 Velp 公司)测定。

1.4 数据分析

根据当地降水资料,将 5—9 月和 10 月—次年 4 月分别认为湿季和干季。采用重复测量方差分析(repeated measures ANOVA)检验处理和干湿季及其交互作用对不同凋落物组分的产生量和质量分数的影响。采用独立样本 T 检验分析减雨处理对表层土壤温湿度和凋落物化学性质的影响。凋落物化学性质之间的相关性采用 Pearson 相关分析。多重比较采用 Duncan 检验(P<0.05)。数据分析和作图分别使用 SPSS 20.0 和 Origin 9.1。

2 结果与分析

2.1 土壤温湿度变化

减雨处理样地的 0—5 cm 土壤体积含水量变化趋势与对照样地一致(图 1a),但全年、干季、湿季分别比对照样地显著降低 17.9%、14.7%和 21.6% ($P < 0.001$, 图 1b)。表层土壤温度在对照与处理样地间无显著差异 ($P > 0.05$, 图 1c 和 1d)。

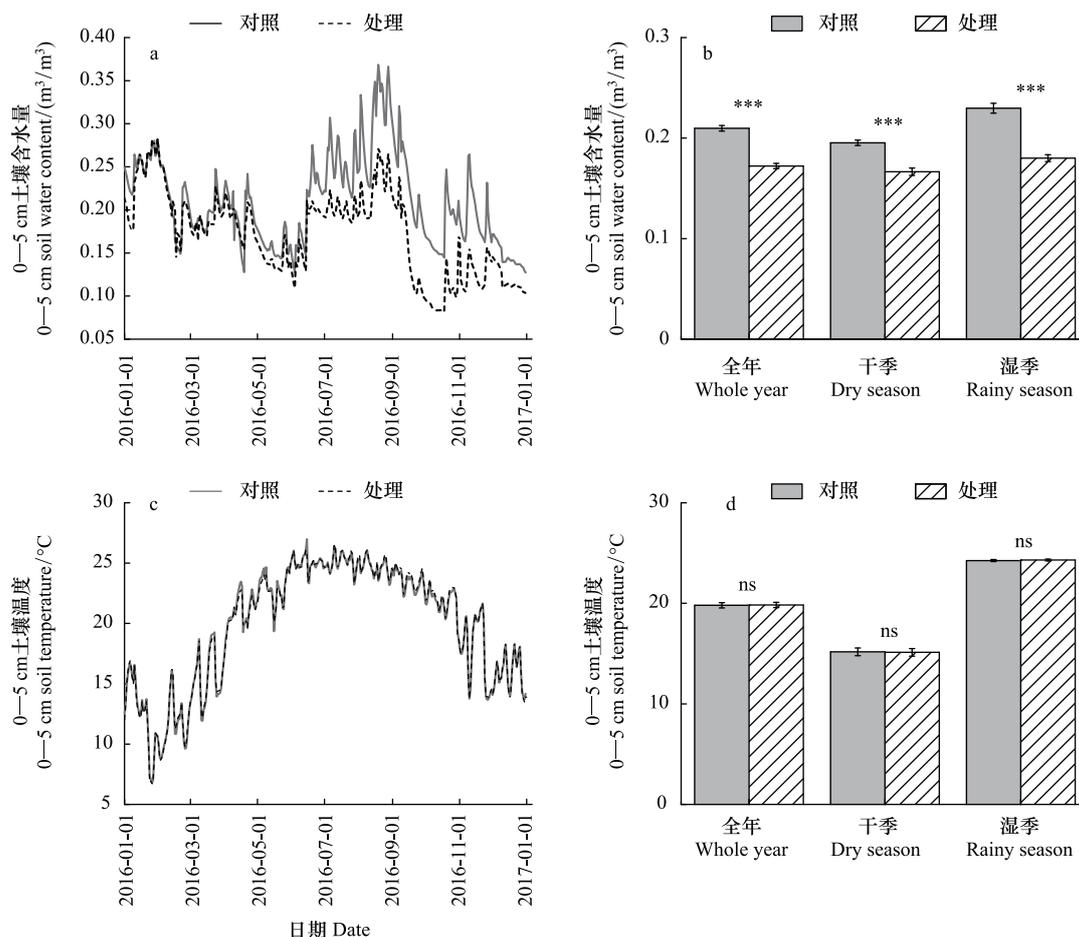


图 1 0—5 cm 土壤体积含水量和温度

Fig.1 The soil volume water content and temperature at the 0—5 cm layer

ns $P > 0.05$, * * * $P < 0.001$

2.2 凋落物量变化

穿透雨减少对各组分凋落物量和质量分数的影响基本一致,且凋落针叶量和所占比例(50%以上)显著高于其余组分。与对照相比,短期减雨处理使全年除主要凋落物组分外的其他凋落量和质量分数分别显著增加 44.5%和 3.4% ($P < 0.05$, 图 2),但对马尾松人工林凋落物总量无显著影响 ($P > 0.05$, 表 2)。处理与季节的交互作用对马尾松人工林各组分凋落物量和质量分数无显著影响 ($P > 0.05$, 表 2)。

2.3 凋落物各组分化学性质变化

与对照样地相比,穿透雨减少处理显著增加凋落针叶的含碳量 27.4 g/kg、果的含氮量 5.1 g/kg,显著降低凋落皮的含碳量、果的碳氮比 ($P < 0.05$),但对凋落物其他各分组的 C、N、P 含量和 C:N、C:P、N:P 均无显著影响 ($P > 0.05$, 表 3)。

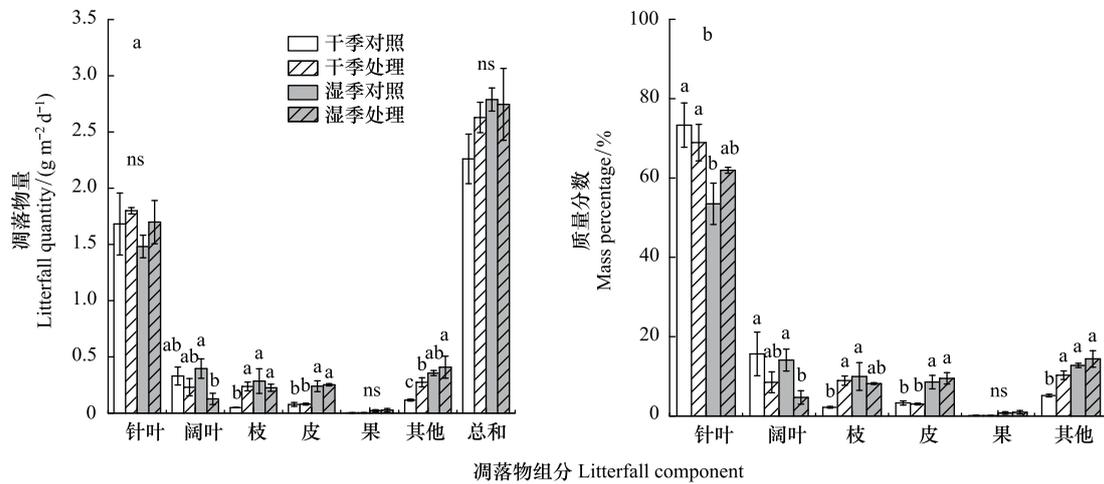


图 2 凋落物各组分产生量和质量分数(平均值±标准误)

Fig.2 The quantity and mass percentage of different litterfall components (mean ± standard error)

不同字母表示凋落物组分产生量和质量分数在干湿季对照与处理间存在显著差异($P < 0.05$)

表 2 凋落物各组分产生量和质量分数的重复测量分析结果(P 值)

Table 2 Repeated measures ANOVA results for the quantity and mass percentage of different litterfall components (P value)

变量和因子 Variable and factor	针叶 Needle	阔叶 Broadleaf	枝 Twig	皮 Skin	果 Fruit	其他 Others	总和 Total
产生量 Quantity							
处理 Treatment	0.378ns	0.098ns	0.337ns	0.820ns	0.310ns	0.039 *	0.452 ns
季节 Season	0.456ns	0.766ns	0.143ns	0.001 **	0.052ns	0.052ns	0.228 ns
处理 * 季节 Treatment * Season	0.800ns	0.236ns	0.116ns	0.822ns	0.435ns	0.483ns	0.416 ns
质量分数 Mass percentage							
处理 Treatment	0.615ns	0.107ns	0.233ns	0.809ns	0.265ns	0.008 **	—
季节 Season	0.059ns	0.391ns	0.146ns	0.004 **	0.034 *	0.021 *	—
处理 * 季节 Treatment * Season	0.278ns	0.707ns	0.093ns	0.568ns	0.326ns	0.332ns	—

ns $P > 0.05$, * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

表 3 凋落物各组分碳、氮、磷含量(平均值±标准误)

Table 3 Contents of carbon, nitrogen, phosphorus in different litterfall components (mean ± standard error)

变量 Variable	组别 Group	针叶 Needle	阔叶 Broadleaf	枝 Twig	皮 Skin	果 Fruit	其他 Others
含碳量 / (g/kg) Content of C	对照	444.54±6.36 b	442.24±8.36	464.81±13.76	459.18±7.01 a	456.75±13.9	467.89±18.80
	处理	471.99±5.95 a	432.09±5.16	444.07±4.46	427.25±4.25 b	422.77±16.66	454.73±1.57
含氮量 / (g/kg) Content of N	对照	8.65±0.16	13.32±0.45	7.43±0.89	3.88±0.22	5.70±0.53 b	12.45±0.62
	处理	8.82±0.25	12.84±0.60	7.06±0.65	3.99±0.13	10.77±1.22 a	11.14±0.81
含磷量 / (g/kg) Content of P	对照	0.43±0.04	0.50±0.11	0.47±0.04	0.24±0.02	0.40±0.06	0.83±0.05
	处理	0.46±0.02	0.51±0.09	0.45±0.04	0.22±0.03	0.54±0.16	0.82±0.03
碳氮比 C:N ratio	对照	51.41±0.26	33.32±1.75	64.41±7.81	119.17±6.96	81.04±5.03 a	37.81±2.69
	处理	53.58±1.19	33.80±1.58	63.96±5.84	107.25±2.86	40.80±6.78 b	41.32±3.36
碳磷比 C:P ratio	对照	1060.03±90.71	963.81±192.73	994.16±95.54	1919.78±175.98	1195.06±184.45	572.80±62.25
	处理	1025.80±43.55	902.72±171.03	994.34±79.81	1982.82±249.07	1049.53±453.77	556.57±20.76
氮磷比 N:P ratio	对照	20.62±1.77	28.51±4.54	15.56±0.65	16.40±2.50	15.03±3.06	15.13±1.06
	处理	19.14±0.65	26.36±3.74	15.58±0.23	18.43±2.06	23.65±6.25	13.63±1.12

不同字母表示处理与对照间存在显著差异($P < 0.05$)

与对照组相比,处理组凋落皮半纤维素、阔叶纤维素、针叶木质素含量分别显著增加 4.0%、5.2%、3.9% ($P<0.05$),但凋落皮纤维素含量显著降低 2.9% ($P<0.05$),其他凋落物各组分的半纤维素、纤维素和木质素含量无显著差异 ($P>0.05$,图 3)。总体上,所占比例较小的凋落皮的木质素含量最高,凋落物量较大针叶和阔叶的木质素含量最低,且凋落阔叶木质素含量显著低于凋落针叶 ($P<0.05$,图 3c)。

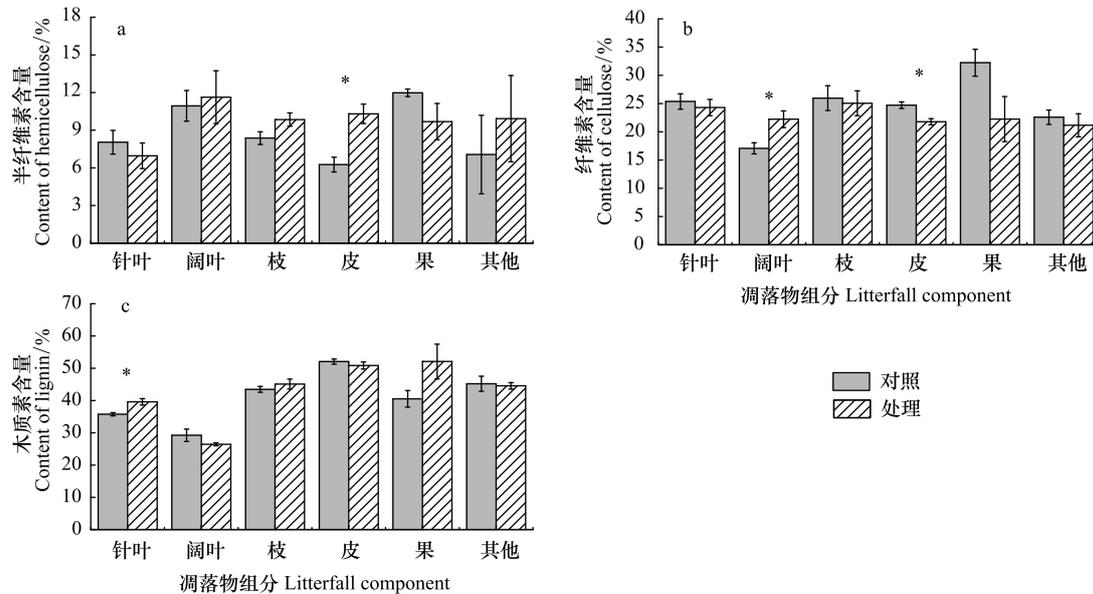


图 3 凋落物各组分半纤维素(a)、纤维素(b)、木质素(c)含量(平均值±标准误)

Fig.3 Contents of hemicellulose, cellulose and lignin in different litterfall components (mean ± standard error)

* 表示处理与对照间存在显著差异 ($P < 0.05$)

2.4 凋落物化学性质的相关分析

Pearson 相关分析表明(表 4),凋落物含碳量与含氮量、含磷量、半纤维素含量呈显著负相关 ($P < 0.01$),与 C:N、木质素含量呈显著正相关 ($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。含氮量与含磷量、半纤维素含量显著正相关 ($P < 0.05$),与纤维素和木质素含量显著负相关 ($P < 0.01$)。含磷量与半纤维素含量显著正相关 ($P < 0.01$)。此外,半纤维素含量与木质素含量显著负相关 ($P < 0.01$)。

表 4 凋落物化学性质相关性分析

Table 4 Correlation analysis of litterfall chemical properties

变量 Variable	含碳量 Content of C	含氮量 Content of N	含磷量 Content of P	碳氮比 C:N ratio	半纤维素含量 Content of hemicellulose	纤维素含量 Content of cellulose
含氮量 Content of N	-0.494 **					
含磷量 Content of P	-0.671 **	0.788 **				
碳氮比 C:N ratio	0.499 **	-0.953 **	-0.775 **			
半纤维素含量 Content of hemicellulose	-0.620 **	0.322 *	0.461 **	-0.359 *		
纤维素含量 Content of cellulose	0.167	-0.455 **	-0.277	0.330 *	-0.201	
木质素含量 Content of lignin	0.311 *	-0.552 **	-0.263	0.571 **	-0.423 **	0.048

** 表示在 $\alpha = 0.01$ 水平下相关性达到极显著(双尾); * 表示在 $\alpha = 0.05$ 水平下相关性达到显著(双尾)

3 讨论

3.1 模拟降雨减少对马尾松人工林凋落物量的影响

水分是影响森林生态系统生产力和功能的主要环境因子之一,亚热带森林凋落物量主要由降水而非温度决定^[17]。植物生长季节中的水分亏损往往抑制其生长,甚至出现落叶及顶梢枯死等现象而导致衰亡,增加凋落物量。穿透雨减少显著降低了土壤湿度,影响土壤有机质的分解、营养释放和植物的养分吸收,因而可能抑制植物生长。因此本研究中减雨处理下的叶凋落物量比对照林分的略有增加,但未达显著水平(表 2)。这一方面是因为本研究减雨处理时间相对较短(仅 4 年),而穿透雨减少对森林凋落物量的影响具有时滞性。在亚马逊森林开展的穿透雨减少实验表明,减雨处理下的凋落物量在处理开始后的第 3 年才开始低于对照;但总体而言,减雨处理增加了总凋落物量,且随着时间的延长,处理与对照凋落物量之间的差异有所降低^[12,18],该变化主要归因于林中植被的生长^[12]。另一方面可能是由马尾松抗旱性强所致。马尾松在我国分布广泛,是典型的外生菌根树种,其菌根菌丝促进干旱环境下的养分吸收^[19-20];干旱胁迫下,马尾松具有较高的调节能力,转化单萜类与倍半萜类含量的比例,分配针叶内不同的次生代谢产物^[21],因此相对于正常生长的马尾松,模拟干旱尚未引起其叶片等的明显凋落。在印度尼西亚的潮湿热带雨林的研 究也证实降雨减少与对照间的凋落叶量在全年水平上无显著差异^[13]。然而,马尾松耐旱性有限,随着干旱胁迫程度的加重和胁迫时间的延长,马尾松幼苗的净光合速率、叶绿素含量等光合指标下降;质膜透性和丙二醛含量等质膜结构指标,以及游离脯氨酸和可溶性糖含量等渗透调节物质不断上升^[22-23]。因此,通过仅开展 4 年的穿透雨减少实验而获得的短期研究数据不足以说明马尾松的耐旱性和凋落物量的响应机理,本文所获得的短期初步实验结果有待后续长期研究和验证。

3.2 模拟降雨减少对马尾松人工林凋落物化学性质的影响

植物改变自身光合生理、渗透调节物质、质膜透性、酶促防御系统、内源激素等进而改变能量代谢和营养分配以适应干旱胁迫^[24-26]。水分胁迫增加马尾松针叶的可溶性糖、丙二醛和游离脯氨酸含量^[23],这可能是减雨处理下调落针叶含碳量高于对照的原因之一。因为凋落物含碳量变化不大,所以影响 C:N 和 C:P 的主要是 N、P 含量。与对照样地相比,减雨处理显著增加了马尾松凋落果的含氮量,故降低了其 C:N,但对凋落物各组分的含磷量和 C:P 无显著影响(表 3)。虽然植物叶片凋落前因养分再利用降低了 N、P 含量,但不足以改变叶片内 N、P 含量的相互关系,使凋落物 N、P 含量表现出与植物活体叶片相似的相关性^[27]。凋落物 N、P 含量间极显著的正相关关系(表 4)表明植物对 N、P 的吸收利用之间存在协同性,器官的 N、P 含量存在较好的相关性^[28]。另一方面,由水分条件改变引起的凋落物分解速率改变将影响土壤中有效养分的供应和植物对养分的吸收利用,植物通过养分的转移和再吸收等适应性策略以抵抗胁迫环境^[29]。本研究中减雨处理尚未显著影响土壤有效 N、P 含量(表 1),故减雨处理很可能是改变了植物的生长和养分再分配而影响凋落物组分的 C、N、P 含量及其化学计量比。此外,植物会通过增加木质素含量来保护叶片不受干旱胁迫^[30],因此减雨处理下马尾松林叶凋落物木质素显著高于对照(图 3c),但这仅是短期干旱处理的结果,且干旱如何影响木质素的生物合成过程不得而知,需进一步深入研究以揭示其变化机理。

在一个特定的气候区内,凋落物基质质量(substrate quality)影响凋落物分解的整个阶段^[6,31]。凋落物基质质量中的森林凋落初始碳含量、C:N 和木质素含量是控制凋落物分解速率的主要因素^[32-33],对土壤碳分解、稳定和养分归还具有重要意义。通常 C:N、木质素:N 较低的凋落物耐分解化合物含量少、分解快,尤其是在分解的初期^[34-35]。木质素是凋落物中最难分解的组分^[36];纤维素由长链葡萄糖分子构成,结构相对木质素简单,降解相对较快。与对照相比,本研究的短期降雨减少未显著影响占据马尾松林凋落物主导地位的针叶凋落物量(表 2),但显著增加其木质素含量(图 3c)和含碳量(表 3),说明减雨处理使针叶凋落物的易分解程度下降。同时,由于减少降水对木质素和纤维素的分解有抑制作用^[37],所以降雨减少可能会降低马尾松人工林土壤中凋落物源性碳和养分的输入量。此外,土壤有机质和凋落物的 C、N、P 化学计量比是决定凋落物分

解的重要因子,也可以表征 N、P 养分限制状况^[38]。潘复静等^[39]的研究结果表明,N:P 大于 25 和 P 含量低于 0.22 g/kg 时凋落物分解受 P 的限制性强。因此,本研究区凋落物分解可能受 N 的限制。

森林土壤有机碳主要来源于凋落物和细根的分解,研究凋落物量和化学性质有助于揭示土壤碳储量的变化。但是,除凋落物本身的性质外,其分解速率还受土壤环境^[4]、微生物^[40]等影响,干旱胁迫对森林生态系统凋落物量、化学性质和分解的影响机制非常复杂。凋落物化学性质的改变也与植物生长、土壤养分及其在植物器官内的分配密切相关^[27],研究植被的其他生理生化指标以便科学解释本研究的结果十分必要。同时,干旱和降水减少会通过改变植物群落的物种组成而导致凋落物性质的长期变化,如通过各物种的不同响应间接影响凋落物量、化学性质和分解,不同种类的凋落物混合可以抵消干旱对凋落物分解的负效应^[15]。因此,介于本研究只是穿透雨减少后第 4 年的结果,减雨处理后的许多生态变化尚未完全显现,继续深入监测和研究仍然必要。

4 结论

本研究结果表明,由于处理时间短、马尾松耐旱性强,穿透雨减少初期未显著改变南亚热带马尾松人工林总凋落物量,但增加了凋落针叶碳和木质素含量、阔叶纤维素含量、皮半纤维素含量和果含氮量,降低了凋落皮碳、纤维素含量,以及凋落果的碳氮比。凋落物 N、P 含量存在协同性,木质素含量与含碳量显著正相关。降雨减少可能会因马尾松人工林凋落针叶木质素含量的增加而降低其土壤中凋落物源性碳和养分的输入量。由于本研究历时较短,且只有 1 年的实验数据,还需进一步开展长期连续试验验证。

致谢:感谢中国林业科学研究院热带林业实验中心李朝英对实验测定工作的帮助!

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland; IPCC, 2014.
- [2] Diffenbaugh N S, Singh D, Mankin J S, Horton D E, Swain D L, Touma D, Charland A, Liu Y J, Haugen M, Tsiang M, Rajaratnam B. Quantifying the influence of global warming on unprecedented extreme climate events. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, 114(19): 4881-4886.
- [3] Zhang M J, He J Y, Wang B L, Wang S J, Li S S, Liu W L, Ma X N. Extreme drought changes in southwest China from 1960 to 2009. *Journal of Geographical Sciences*, 2013, 23(1): 3-16.
- [4] Gregorich E G, Janzen H, Ellert B H, Helgason B L, Qian B D, Zebarth B J, Angers D A, Beyaert R P, Drury C F, Duguid S D, May W E, McConkey B G, Dyck M F. Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon. *Global Change Biology*, 2017, 23(4): 1725-1734.
- [5] Macinnis-Ng C, Schwendenmann L. Litterfall, carbon and nitrogen cycling in a southern hemisphere conifer forest dominated by kauri (*Agathis australis*) during drought. *Plant Ecology*, 2015, 216(2): 247-262.
- [6] Aerts R. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: a triangular relationship. *Oikos*, 1997, 79(3): 439-449.
- [7] Jia B R, Zhou G S, Xu Z Z. Forest litterfall and its composition: a new data set of observational data from China. *Ecology*, 2016, 97(5): 1365.
- [8] 徐旺明, 闫文德, 李洁冰, 赵晶, 王光军. 亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征. *生态学报*, 2013, 33(23): 7570-7575.
- [9] Zhang H C, Yuan W P, Dong W J, Liu S G. Seasonal patterns of litterfall in forest ecosystem worldwide. *Ecological Complexity*, 2014, 20: 240-247.
- [10] 王意锟, 方升佐, 唐罗忠. 营林措施及环境与森林凋落物分解的相互关系研究进展. *世界林业研究*, 2011, 24(2): 47-52.
- [11] 吕国红, 李荣平, 温日红, 谢艳兵, 王笑影. 森林凋落物组分的气象影响分析. *中国农学通报*, 2014, 30(19): 1-6.
- [12] Brando P M, Nepstad D C, Davidson E A, Trumbore S E, Ray D, Camargo P. Drought effects on litterfall, wood production and belowground carbon cycling in an Amazon forest: results of a throughfall reduction experiment. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2008, 363(1498): 1839-1848.
- [13] Moser G, Schuldt B, Hertel D, Horna V, Coners H, Barus H, Leuschner C. Replicated throughfall exclusion experiment in an Indonesian

- perhumid rainforest: wood production, litter fall and fine root growth under simulated drought. *Global Change Biology*, 2014, 20(5): 1481-1497.
- [14] 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. *应用生态学报*, 2007, 18(2): 261-266.
- [15] Santonja M, Fernandez C, Proffit M, Gers C, Gauquelin T, Reiter I M, Cramer W, Baldy V. Plant litter mixture partly mitigates the negative effects of extended drought on soil biota and litter decomposition in a Mediterranean oak forest. *Journal of Ecology*, 2017, 105(3): 801-815.
- [16] 高爱新, 秦国峰, 王培蒂, 何玉友, 王舟莲. 马尾松雄球花生生长发育特性及花粉采收特点. *林业科学研究*, 2007, 20(3): 437-441.
- [17] 纪金华, 章永江, 张一平, 刘玉洪, 鲁志云, 武传胜, 温韩东. 西南干旱对哀牢山常绿阔叶林凋落物及叶面积指数的影响. *生态学报*, 2013, 33(9): 2877-2885.
- [18] Nepstad D C, Tohver I M, Ray D, Moutinho P, Cardinot G. Mortality of large trees and lianas following experimental drought in an Amazon forest. *Ecology*, 2007, 88(9): 2259-2269.
- [19] 王艺, 丁贵杰. 水分胁迫下外生菌根对马尾松幼苗养分吸收的影响. *林业科学研究*, 2013, 26(2): 227-233.
- [20] Xu C, Wu X Q. Physiological and proteomic analysis of mycorrhizal *Pinus massoniana* inoculated with *Lactarius insulsus* under drought stress. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2016, 63(5): 709-717.
- [21] 全文选, 丁贵杰. 干旱胁迫下马尾松幼苗针叶挥发性物质与内源激素的变化. *林业科学*, 2017, 53(4): 49-55.
- [22] 谭健晖, 唐生森, 陈虎. 马尾松抗旱性研究进展. *广西林业科学*, 2017, 46(1): 1-7.
- [23] 韩文萍, 丁贵杰, 鲍斌. 不同种源马尾松对干旱胁迫的生理生态响应. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(5): 25-29.
- [24] Šimpraga M, Verbeeck H, Demarcke M, Joó É, Pokorska O, Amelynck C, Schoon N, Dewulf J, Van Langenhove H, Heinesch B, Aubinet M, Laffineur Q, Müller J F, Steppe K. Clear link between drought stress, photosynthesis and biogenic volatile organic compounds in *Fagus sylvatica* L. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(30): 5254-5259.
- [25] Park S Y, Peterson F C, Mosquna A, Yao J, Volkman B F, Cutler S R. Agrochemical control of plant water use using engineered abscisic acid receptors. *Nature*, 2015, 520(7548): 545-548.
- [26] Schlesinger W H, Dietze M C, Jackson R B, Phillips R P, Rhoades C C, Rustad L E, Vose J M. Forest biogeochemistry in response to drought. *Global Change Biology*, 2016, 22(7): 2318-2328.
- [27] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明, 王芳. 不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征. *生态学报*, 2016, 36(19): 6188-6197.
- [28] 赵琼, 刘兴宇, 胡亚林, 曾德慧. 氮添加对兴安落叶松养分分配和再吸收效率的影响. *林业科学*, 2010, 46(5): 14-19.
- [29] Freschet G T, Cornelissen J H C, van Logtestijn R S P, Aerts R. Substantial nutrient resorption from leaves, stems and roots in a subarctic flora: what is the link with other resource economics traits? *New Phytologist*, 2010, 186(4): 879-889.
- [30] Erhagen B, Öquist M, Sparman T, Haei M, Ilstedt U, Hedenström M, Schleucher J, Nilsson M B. Temperature response of litter and soil organic matter decomposition is determined by chemical composition of organic material. *Global Change Biology*, 2013, 19(12): 3858-3871.
- [31] 陈翔, 周梅, 魏江生, 赵鹏武, 李攀, 乌云毕力格, 秦可珍. 模拟氮沉降对兴安落叶松林凋落物分解的影响. *生态环境学报*, 2013, 22(9): 1496-1503.
- [32] 马志良, 高顺, 杨万勤, 吴福忠. 亚热带常绿阔叶林区凋落叶木质素和纤维素在不同雨热季节的降解特征. *生态学杂志*, 2015, 34(1): 122-129.
- [33] 杨林, 邓长春, 陈亚梅, 和润莲, 张健, 刘洋. 川西高山林线交错带凋落叶分解速率与初始质量的关系. *应用生态学报*, 2015, 26(12): 3602-3610.
- [34] 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 赵玉涛. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系. *应用生态学报*, 2008, 19(2): 245-251.
- [35] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. *林业科学*, 2006, 42(4): 93-100.
- [36] Osono T. Ecology of ligninolytic fungi associated with leaf litter decomposition. *Ecological Research*, 2007, 22(6): 955-974.
- [37] 李吉玫, 张毓涛, 李翔, 韩燕梁. 降水强度变化对天山云杉地表凋落物和细根分解的影响. *植物研究*, 2017, 37(3): 360-369.
- [38] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 王绍强, 王辉民. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制. *生态学报*, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [39] 潘复静, 张伟, 王克林, 何寻阳, 梁士楚, 韦国富. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征. *生态学报*, 2011, 31(2): 335-343.
- [40] Purahong W, Wubet T, Lentendu G, Schloter M, Pecyna M J, Kapturska D, Hofrichter M, Krüger D, Buscot F. Life in leaf litter: novel insights into community dynamics of bacteria and fungi during litter decomposition. *Molecular Ecology*, 2016, 25(16): 4059-4074.