

DOI: 10.5846/stxb201911162480

舒韦维, 陈琳, 刘世荣, 曾冀, 李华, 郑路, 陈文军. 减雨对南亚热带马尾松人工林凋落物分解的影响. 生态学报, 2020, 40(13): 4538-4545.

Shu W W, Chen L, Liu S R, Zeng J, Li H, Zheng L, Chen W J. Effects of throughfall reduction on litter decomposition of *Pinus massoniana* plantation in subtropical China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(13): 4538-4545.

减雨对南亚热带马尾松人工林凋落物分解的影响

舒韦维^{1,2}, 陈琳^{1,2,*}, 刘世荣³, 曾冀¹, 李华^{1,2}, 郑路^{1,2}, 陈文军⁴

1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 凭祥 532600

3 中国林业科学研究院, 北京 100091

4 广西壮族自治区国有七坡林场, 南宁 530225

摘要:为探究气候变化背景下降雨格局改变对马尾松人工林凋落物分解及养分释放过程的影响,以南亚热带马尾松(*Pinus massoniana*)人工林为研究对象,设置穿透雨减少 50%和不减雨(对照)处理,开展连续观测野外降水控制实验。采用凋落物分解袋法,研究了减雨处理对南亚热带马尾松人工林凋落叶分解速率及养分释放的影响,以及凋落叶分解速率的影响因素。结果表明:凋落叶分解 2 年后,减雨处理和对照林凋落叶残留率分别为 38.09%和 38.06%;凋落叶分解过程中碳元素表现为淋溶-富集-释放,而氮元素表现为富集,减雨 50%在一定程度上促进了氮的富集,但未达到显著水平。相关分析表明,凋落叶的残留率与氮浓度和月积温呈显著负相关,与碳/氮呈显著正相关。本研究发现,减雨 50%并未改变马尾松凋落叶分解速率和养分释放模式,凋落叶的残留率与氮浓度、碳/氮及月积温密切相关。

关键词:减雨;马尾松人工林;凋落叶分解速率;养分释放

Effects of throughfall reduction on litter decomposition of *Pinus massoniana* plantation in subtropical China

SHU Weiwei^{1,2}, CHEN Lin^{1,2,*}, LIU Shirong³, ZENG Ji¹, LI Hua^{1,2}, ZHENG Lu^{1,2}, CHEN Wenjun⁴

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

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

3 Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China

4 Qipo State-owned Forest Farm of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530225, China

Abstract: To explore the impact of precipitation pattern change on the litter decomposition and nutrient release under global climate change scenario, an experiment including 50% reduction of throughfall and natural rainfall (control) was conducted in *Pinus massoniana* plantation. Using litter decomposition bag method, we determined the effect of throughfall reduction on the dynamic changes of decomposition rates and nutrient release of leaf litter, as well as the factors influencing the leaf litter decomposition. The results showed that the remaining mass ratio in the throughfall reduction and control were 38.09% and 38.06%, respectively, after two years of leaf litter decomposition. The carbon content of leaf litter showed a “leaching-enrichment-release” pattern during the decomposition, while nitrogen content of leaf litter was enriched to some extent without a significant difference between the throughfall reduction and control. The correlation analysis showed that remaining mass ratio of leaf litter was significantly negatively correlated with leaf litter N content and monthly accumulated temperature, while was significantly positively correlated with leaf litter C:N ratio. This study suggested that throughfall

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31971655);中国林业科学研究院中央级公益性科研院所基金科研业务费专项资金项目(CAFYBB2017QA026)

收稿日期:2019-11-16; 修订日期:2020-05-08

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

reduction did not change leaf litter decomposition rate and nutrient release pattern in *Pinus massoniana*. The degradation of leaf litter was closely related to N content, C:N and monthly accumulated temperature.

Key Words: throughfall reduction; *Pinus massoniana* plantation; leaf litter decomposition rate; nutrient release

凋落物作为陆地生态系统有机质的主要来源,在森林生态系统中占有重要地位^[1],具有维持土壤肥力、涵养水源、构建土壤质地、调控微生物代谢的作用^[2-3]。凋落物分解速率直接影响森林生态系统养分循环和土壤养分的供应能力^[4-5],凋落物分解过程中养分的释放和富集对森林生态系统植被生长、有机质的形成及养分收支平衡具有重要意义^[6]。

近年来随着全球气候变暖,人为活动增强,导致降水格局发生了改变^[7]。水分作为凋落物量和凋落物分解速率的关键驱动因子^[8],降水变化直接影响植被、微生物群落结构和功能^[9-10],使得土壤微环境及养分有效性改变^[11],进而影响凋落物分解动态。目前,降水对森林生态系统的影响备受关注,而野外降水控制实验是了解森林生态系统结构与功能对降水变化响应的有效途径^[12]。Hoover^[13]等对球干旱模拟实验的综合研究发现,研究对象以草地生态系统为主,森林生态系统仅占 17.5%,且大部分研究时间为 1—4 年,截雨比例多为 50%。与此同时,国内外学者也利用该方法开展了一些降水变化对凋落物分解影响的研究工作,但因研究区域、群落类型、作用时间、降水梯度等因素差异,凋落物分解对所模拟降水变化的响应仍有很大不确定性^[14]。主要认为,增雨加速微生物代谢,促进凋落物分解及养分释放^[14-15];减雨则抑制养分淋洗效果,限制凋落物分解速率^[6, 16-18]。也有研究发现,不管是增雨还是减雨对凋落物分解速率均无影响^[3]。自然条件下,凋落物分解受生物和非生物因素的影响,二者共同决定了凋落物分解速率的快慢^[19]。研究降水格局改变对凋落物分解及养分释放的影响有助于揭示森林生态系统物质循环对气候变化的响应与适应机理。因此,本研究以我国南亚热带地区马尾松人工林为对象,设置穿透雨减少 50%和不减雨对照,调查凋落叶分解速率、碳、氮含量和土壤温湿度,揭示马尾松人工林凋落叶分解动态过程对减雨处理的响应及凋落叶分解速率的内部和外部因素。

1 研究区域概况和方法

1.1 研究区域概况

本研究区域位于中国林业科学研究院热带林业实验中心伏波实验场(22.10°N, 106.50°E),地处中越边境,广西西南部凭祥市,海拔为 550 m。属于南亚热带半湿润-湿润气候,境内光照充足,雨量充沛,干湿季节明显,年平均气温为 21.7℃,≥10℃活动积温 6000—7600℃,年降水量为 1241—1695 mm,主要集中在 5—9 月,占全年降水量的 78%以上。研究区土壤以地带性红壤为主,土层厚度大于 80 cm,地力相对均匀。

研究区林地于 1983 年种植于杉木采伐迹地上的马尾松纯林,初植密度为 2500 株/hm²,经过多年近自然化经营改造,现保留马尾松林分密度为 275 株/hm²,林内植物种类丰富,主要树种为大叶栎(*Quercus griffithii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)和火力楠(*Michelia macclurei*),林下灌木主要为玉叶金花(*Mussaenda pubescens*)、匙萼柏拉木(*Blastus cavaleriei*)、越南悬钩子(*Rubus cochinchinensis*)和菝葜(*Smilax china*)等,草本植物有乌毛蕨(*Blechnum orientale*)、弓果黍(*Cyrtococcum patens*)和小花露籽草(*Ottochloa nodosa*)等。林分基本概况见表 1 所示。

1.2 样地设置

在地形、地貌等生境条件相对一致的马尾松人工林冠层下设置穿透雨减少 50%和不减雨(对照)两个处理,每个处理重复 3 次,共 6 块实验样地,样地大小 20 m × 20 m,间距≥20 m。2012 年 9 月,在每个减雨样地离地面 1—1.5 m(上坡)或 3—3.5 m(下坡)处搭建不锈钢减雨架,用透明薄膜(长×宽:(3 m×0.3 m))铺设相应面积 50%的挡雨面,均匀的布设在减雨架上,形成截获 50%穿透雨的处理,并在减雨样地坡上、左、右方向埋入 1 m 深 PVC 膜,同时修建挡水墙(宽 0.1 m,高出地面 0.3 m,入土深度 0.3—1.0 m),用于阻止地表径流

的流入以及土壤水分的交流。为消除减雨装置对样地的影响,在对照样地内布设相同规格的减雨架,覆盖孔径为 2—3 mm 的尼龙网,每月定时清理薄膜、纱网和水槽上的凋落物,原位归还于样地内。

表 1 马尾松人工林的林分密度、树高、胸径和灌木盖度

Table 1 Stem density, tree height, diameter at breast height, and shrub and herb coverage of *Pinus massoniana* plantation

组别 Group	林分密度 Stem density/ (株/hm ²)	平均树高 Mean height/m	平均胸径 Mean DBH/cm	胸高断面积 Basal area/ (m ² /hm ²)	灌木盖度 Shrub cover/%	草本盖度 Herb cover/%
对照 Control	242.0±38.0a	20.0±0.4a	31.8±0.9a	20.5±1.2a	21.0±10.0a	16.1±7.9a
减雨 Treatment	292.0±29.0a	17.7±0.3b	30.8±1.1a	23.3±1.2a	17.8±1.2a	15.9±3.4a

不同小写字母表示在 0.05 水平上具有显著差异

1.3 样品采集与测定

每个样地内随机设置 5 个 1 m × 1 m 收集网,距地面约 1 m,用以收集林冠层的凋落物。将收集的凋落物按样地进行混合,然后区分叶、其他树种叶、枝、皮、果、碎屑等,于 65℃ 烘箱烘干 48 h 至恒重,称干质量并测定凋落叶全氮和有机碳含量。

采用凋落物分解袋法测定凋落物的分解速率。2016 年 12 月,收集新鲜凋落叶进行自然风干,称取 5 g,分别装入 15 cm × 15 cm 尼龙网袋(孔径 1 mm)中,事先清除地表植物和凋落物,将凋落叶分解袋置于样地表面,在上、中和下坡各放 8 袋,每个样地 24 袋,共 144 袋(2 处理 × 3 重复 × 24 袋/样地 = 144 袋)。每 3 个月收集一次凋落叶网袋,即 2017 年 3 月、6 月、9 月、12 月和 2018 年 3 月、6 月、9 月、12 月,每次每个样地上、中和下坡各取 1 袋共 3 袋。每次取回网袋带回实验室以后,去除样品表面的泥土和新长入根系,用蒸馏水小心清洗表面杂质,于 65℃ 烘干 48 h 至恒重并称量记录。烘干后的样品经过粉碎、过 2 mm 筛,测定凋落叶、有机碳和全氮含量。有机碳:重铬酸钾氧化-外加热法;全氮:碱解扩散法。

1.4 数据统计与分析

采用 Olson^[20] 指数模型计算分解速率,公式如下:

$$M_R \% = X_t / X_0 \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{Olson 指数模型计算凋落物分解系数: } X_t / X_0 = \exp^{-kt} \quad (2)$$

$$\text{分解 50\% 所需的时间 } T_{0.5} \text{ 的计算方法为: } T_{0.5} = \ln 0.5 / (-k) \quad (3)$$

$$\text{分解 95\% 所需的时间 } T_{0.95} \text{ 的计算方法为: } T_{0.95} = \ln 0.05 / (-k) \quad (4)$$

式中, X_0 为凋落叶初始干质量, X_t 为 t 时刻的凋落叶干质量, k 为分解系数 ($\text{kg kg}^{-1} \text{a}^{-1}$), t 为分解时间(a)。

采用 R 3.6.1 进行单因素方差分析(one-way ANOVA, $\alpha = 0.05$) 检验不同处理下土壤温湿度、凋落叶残留率、氮含量及碳/氮的差异显著性,并对凋落叶残留率与氮含量、碳/氮及环境因子进行 Pearson 相关性分析。利用 Excel 2010 软件制作图表。

2 结果与分析

2.1 减雨处理对土壤温度和湿度的影响

由图 1 可知,减雨处理的 0—5 cm 土壤温、湿度变化趋势与对照处理基本一致,且月平均土壤温、湿度在减雨处理与对照林间无显著差异($P > 0.05$)。土壤温度对减雨处理的作用不明显,在数值上差异不大;减雨处理使得表层土壤湿度低于对照处理的林地,其中 2017 年平均湿度较对照处理降低了 11.65% ($P < 0.05$),而 2018 年平均湿度较对照处理降低了 18.90% ($P < 0.05$)。

2.2 减雨处理对马尾松凋落叶残留率和养分释放的影响

随着分解时间的变化,凋落叶残留率呈线性下降,凋落叶分解第 1 年,减雨处理和对照样地分别分解了 36.97%、41.02%,第 2 年分解了 24.94%、20.92%(图 2)。碳浓度随分解时间增加呈先下降后上升再下降趋于平缓的趋势,表现为淋溶-富集-释放;而凋落叶氮浓度不断增加,只在 2018 年 3 月有一个短暂的降低,表现

为逐渐富集增长的趋势,且减雨 50%在一定程度上较对照有助于氮元素的富集。分解第 1 年,凋落叶碳/氮随着分解时间的变化不断减少,后期趋于平缓,变幅较小。

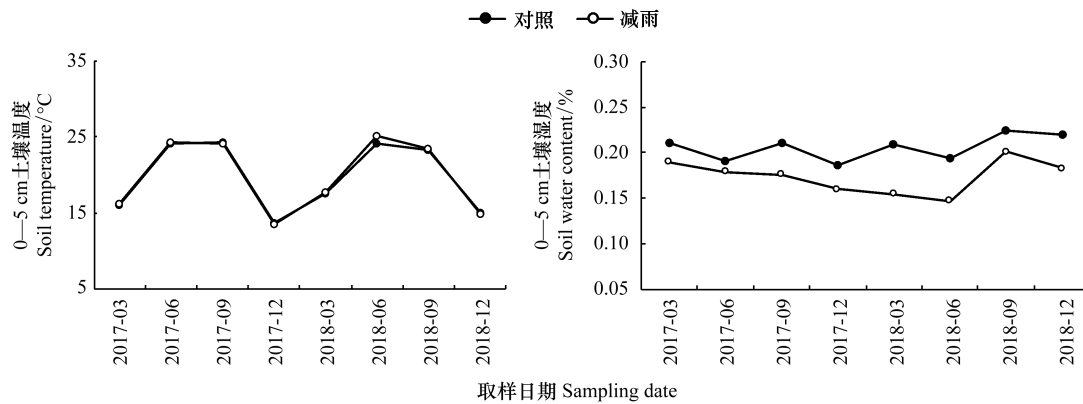


图 1 马尾松人工林 0—5 cm 土壤温度和湿度时间动态变化

Fig.1 Dynamics of soil temperature and soil moisture at 0—5 cm soil depth over time in *P. massoniana* plantation

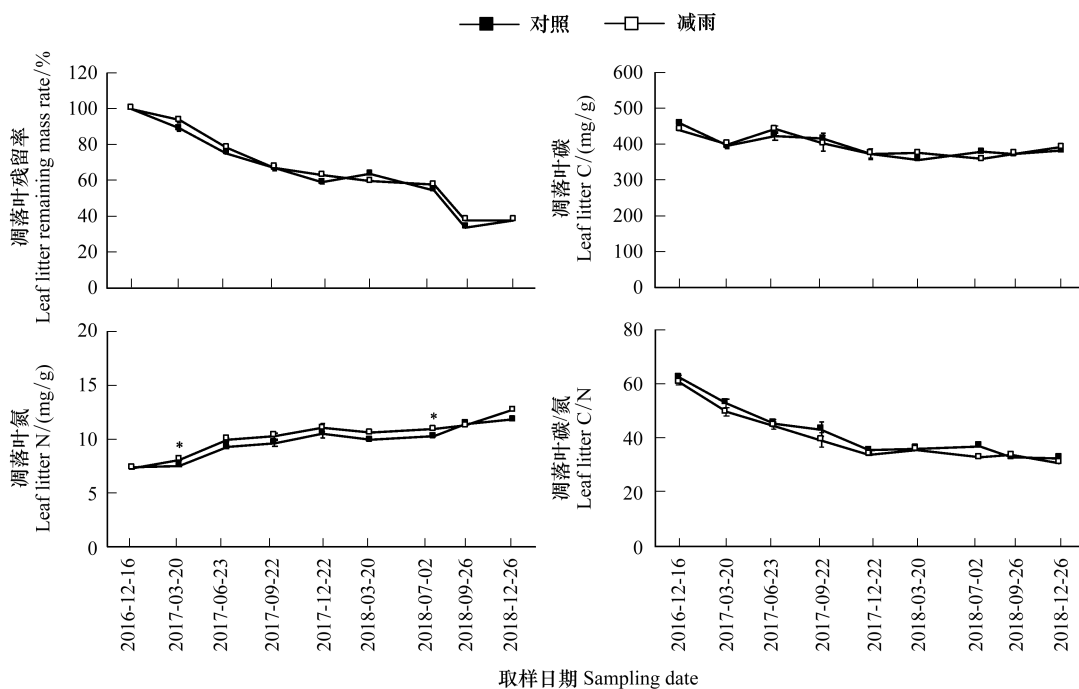


图 2 马尾松人工林凋落叶分解速率对穿透雨减少的响应

Fig.2 Response of leaf litter decomposition rate to throughfall reduction treatment in *P. massoniana* plantation

经过 2 年的自然分解,减雨处理和对照林的凋落叶残留率分别为 38.09%、38.06%,凋落叶碳浓度比初始浓度分别减少了 11.11%、16.65%;凋落叶氮浓度为比初始浓度分别增加了 74.90%、60.93%;凋落叶碳/氮相对于初始值分别减少了 49.19%、48.01%。方差分析结果显示,穿透雨减少仅导致马尾松凋落叶氮浓度在个别取样日期(2017 年 3 月 20 日和 2018 年 7 月 2 日)显著高于对照林地($P < 0.05$),而凋落叶的残留率、碳浓度、碳/氮与对照均无显著差异($P > 0.05$, 图 2)。

2.3 减雨处理对马尾松凋落叶分解速率的影响

根据 Olson 指数模型拟合结果显示,马尾松减雨处理与对照林地的凋落叶分解系数分别为 0.501 和

0.504; 减雨处理的凋落叶质量损失 50% 和 95% 所需时间分别为 1.38 a 和 5.98 a; 马尾松对照林地凋落叶质量损失 50% 和 95% 所需时间分别为 1.38 a 和 5.94 a。由于减雨处理和对照之间凋落叶分解系数、凋落叶质量损失 50% 和 95% 所需时间均无显著差异(表 2), 因此减雨处理对马尾松凋落叶分解速率无影响。

相关分析结果表明, 无论减雨处理还是对照林地, 凋落叶的残留率与凋落叶氮浓度呈极显著负相关($P < 0.001$), 与凋落叶碳/氮呈极显著正相关($P < 0.001$), 与月积温呈显著负相关($P < 0.01$), 但与月平均气温、月平均降雨量和 0—5 cm 土壤温、湿度相关性均不显著($P > 0.05$, 表 3)。

表 2 马尾松人工林凋落叶分解残留率随时间的指数回归方程

Table 2 Regression equations of leaf litter remaining mass in *P. massoniana* plantation

处理 Treatment	回归方程 Equation	复相关系数 Multiple R^2	分解系数 (k) Decomposition coefficient	分解 50% 时间 Time of 50% decomposition/a	分解 95% 时间 Time of 95% decomposition/a
马尾松对照 PMC	$y = 1.02e^{-0.504t}$	0.74	0.504	1.38	5.94
马尾松减雨 PMT	$y = 1.05e^{-0.501t}$	0.80	0.501	1.38	5.98

PMC: 马尾松对照 *Pinus massoniana* control; PMT: 马尾松减雨 *Pinus massoniana* treatment

表 3 马尾松人工林凋落叶残留率与氮浓度、碳/氮及环境因子的相关性

Table 3 Correlations between leaf litter remaining mass and N content, C:N ratio and environmental factors in *P. massoniana* plantation

处理 Treatment	凋落叶 氮浓度 Leaf litter N concentration/ (mg/g)	凋落叶碳/氮 Leaf litter C/N ratio	0—5 cm 土壤温度 Soil temperature at 0—5 cm depth/°C	0—5 cm 土壤湿度 Soil moisture at 0—5 cm depth/%	月平均气温 Monthly average temperature/°C	月积温 Monthly accumulated temperature/°C	月平均降雨量 Monthly average rainfall/mm
马尾松对照 PMC	-0.74 ***	0.84 ***	-0.39	-0.04	-0.24	-0.61 **	-0.30
马尾松减雨 PMT	-0.88 ***	0.86 ***	-0.01	-0.08	-0.19	-0.57 **	-0.24

** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$

3 讨论

3.1 减雨处理对凋落叶分解速率的影响

研究表明, 增雨有助于凋落物的分解, 减雨抑制凋落物分解, 雨量的增加总体上改善了微生物生存的水热条件, 增强了微生物代谢能力, 进而促进了凋落物分解^[21-23]。也有研究认为, 在生态系统中湿度若为凋落物分解的最佳状态, 则无论是增雨或减雨都会抑制凋落物分解; 若生态系统水分状况充足或不足, 则在此基础上减雨或增雨, 皆利于凋落物分解, 但分解速率并不随强度的增加而增加^[19]。本研究结果发现, 减雨 50% 虽然使凋落叶残留率、分解系数、质量损失 95% 所需时间均大于对照林, 但数值无显著差异, 表明减雨 50% 并未改变马尾松凋落叶的分解速率, 这与 Moser 等^[24] 研究结果一致。减雨 50% 对马尾松凋落叶的分解无影响, 一方面本研究区域属半湿润-湿润气候, 降雨充沛, 空气湿度大, 减雨 50% 仅使马尾松 5 cm 土壤湿度下降 5.92%—25.64%, 但均未达到显著性水平(图 1); 此外, 减雨处理对林下植被盖度的影响并不明显(表 1, $P > 0.05$), 因此减雨 50% 并没有改变试验地小气候; 另一方面马尾松针叶表面积小且不易于破碎, 不利于微生物的定居、繁殖, 再加上针叶树种凋落叶持水能力较弱^[25], 这也使得马尾松对雨量变化的响应不是那么敏感^[26]。可见, 降水变化对马尾松凋落叶分解的影响程度主要取决于降雨变化的幅度、土壤表层湿度及凋落物自身特性^[19]。然而, 本研究与以往一些研究结果不一致, 如 Zhou 等^[23] 对我国西部常绿阔叶林进行减雨实验发现, 穿透雨减少 20% 和 50% 显著降低了凋落叶的分解率, 其原因可能是显著降低的土壤含水率、土壤呼吸、微生物生物量及微生物碳、氮。Salamanca 等^[17] 的研究表明, 与对照相比, 遮盖 50%、100% 处理使得凋落物分解率降低 19%—26%, 归因于干燥条件下淋洗减少。Santonja 等^[27] 认为, 降水减少会导致质量损失率降低, 是因为凋落物混合效应的抑制作用增强; 另外, 减雨 30% 会使凋落物上大型无脊椎动物的觅食行为减少, 并抑制微生物

分解^[28]。减雨对森林生态系统凋落分解的影响机制非常复杂,但本研究未涉及减雨 50%后土壤微生物和土壤动物对凋落物的分解过程是否产生影响,因此凋落物分解过程对减雨的响应机制还有待深入研究。

研究发现,凋落叶残留率随时间的增加而减少,且分解速率前期较后期要快,这与 Garcia-Pausas 等^[29] 研究结果具有一致性,凋落叶损失量与时间呈指数关系,且分为两个阶段,初期干物质损失达 30%—70%,而后期损失 20%—30%。主要原因为分解初期由于淋溶和降解作用,使得凋落叶水溶性和易分解化合物快速失重;而分解后期,木质素和纤维素等难分解物质含量增加,凋落叶分解受到限制,分解速率逐渐减缓^[6, 21]。

3.2 减雨处理对凋落叶养分释放的影响

凋落物分解是生态系统土壤有机质形成和物质循环的基础,对促进植物生长发育、维持林分地力具有重要作用^[30]。陆地生态系统中植物生长所需的大量营养元素,90%以上来源于凋落物的养分归还^[31]。研究发现,较低基质质量(氮浓度、碳氮比、木质素、纤维素)的凋落物在分解初期,土壤微生物为满足自身需求会从环境中固定养分,高基质质量的凋落物在分解初期就会直接释放养分,从而表现出不同的养分释放、富集模式^[32]。一般来说,凋落叶淋溶矿化过程的养分释放主要分 3 种:淋溶-释放、淋溶-富集-释放、富集-释放^[3]。水分作为凋落物分解至关重要的因子,不仅影响凋落物物质浸出的过程,同时影响着养分元素肥效的释放和富集^[6]。本研究发现,减雨 50%并未改变马尾松人工林凋落叶碳、氮元素的释放模式。在凋落叶分解过程中,随着时间的增加,凋落叶碳元素表现为淋溶-富集-释放。与之不同,凋落叶氮元素呈现出逐渐富集增长的模式,与李雪峰等^[6]对蒙古栎凋落叶分解研究结果一致。碳/氮作为调控凋落物分解过程中氮元素净释放的重要阈值^[33],Manzoni 等^[34]研究发现,碳/氮大于 5—15 时会发生富集,小于 5—15 时才会释放,也有研究认为碳/氮的临界值为 40^[33]或 55^[35];本研究中,碳/氮在 31 以上,未表现出净氮释放,说明马尾松凋落叶氮素的释放是一个长期、复杂的过程,还需进行长期的观测研究。然而,无论减雨还是对照林在 2017 年 12 月—2018 年 3 月这个时段凋落叶氮元素较分解前期有一个短暂的释放(图 2),这可能由于该时段气温低,微生物活性较弱,分泌的胞外酶较少^[35];根据当地降水分布情况,12 月到次年 3 月为干季^[36],凋落叶物理破碎造成的机械损失较低^[32];当温度回升,水热条件逐渐改善,微生物大量繁殖,需要更多的外源氮的输入,凋落叶氮浓度开始大量富集^[37]。另外,本研究中减雨处理导致马尾松人工林的凋落叶氮浓度在 2017 年 3 月 20 日和 2018 年 7 月 2 日显著高于对照,而减雨处理对凋落叶残留率、碳浓度、以及碳氮比值的影响均不显著,表明凋落叶氮浓度对减雨的响应更加敏感。

3.3 马尾松凋落叶分解速率的影响因素

凋落物分解主要受环境条件、分解者群落组成、凋落物质量的调控。在全球或区域尺度上,凋落物分解主要受环境因子的影响;在局部范围内,其基质质量是影响其分解的主导因子。研究发现,土壤含水量与凋落物的分解速率呈正相关关系^[38],而 Salamanca 等^[17]认为短期的降雨减少对土壤湿度无显著影响,而是通过养分淋洗、土壤动物、微生物生物量和呼吸速率发生改变影响凋落物分解速率。本研究相关分析结果表明,凋落叶残留率与月平均气温、月平均降雨量、0—5 cm 土壤温、湿度相关性均不显著,这可能与该地区气候类型、降水分布及林下植被有关。以往研究发现,凋落叶性状(包括木质素、氮浓度、碳氮比等)与凋落叶分解速率关系最为紧密^[39]。本研究中,凋落叶残留率与氮浓度呈极显著负相关($P < 0.001$),与凋落叶碳/氮呈极显著正相关($P < 0.001$),Pérez-Harguindeguy 等^[40]亦认为凋落物碳/氮是影响凋落物分解的重要因素。凋落叶残留率与月积温呈显著负相关($P < 0.01$),即长期的高温环境下分解速率随温度的升高而增加;另外本研究结果还发现,减雨后凋落叶残留率与月积温的关系弱于对照林,这可能是由于自然降雨与温度的交互作用(高温高湿)下更利于凋落叶的分解。因此,未来如何更加精确预测降雨变化对凋落物分解速率的影响,要综合考虑凋落物自身特性与环境因子的交互作用。由于全球气候变化导致降水格局改变的长期性,降水对森林生态系统的影响必然是一个长期的过程;此外,在南亚热带高温高湿的环境下,虽然减雨 50%,但湿度可能仍然显著高于分解需要,在今后的工作中,我们将进一步增加减雨的比例,探究南亚热带地区凋落物分解的湿度阈值范围,并且从土壤微生物、土壤动物和酶活性等方面揭示降雨对凋落物分解影响的机理。

4 结论

减雨 50% 未改变马尾松凋落叶的分解系数、质量损失 50% 和 95% 所需时间。随着分解时间的增加,凋落叶碳浓度为先下降后上升再下降趋于平缓的趋势,而凋落叶氮浓度则不断增加,减雨 50% 仅导致凋落叶氮浓度在个别取样日显著高于对照。凋落叶的残留率与凋落叶氮浓度和月积温呈显著负相关,与凋落叶碳/氮呈显著正相关。总之,减雨 50% 并未改变马尾松凋落叶的分解速率和养分释放模式,主要由于凋落叶质量未发生明显改变。

参考文献 (References):

- [1] Setiawan N N, Vanhellefont M, De Schrijver A, Schelfhout S, Baeten L, Verheyen K. Mixing effects on litter decomposition rates in a young tree diversity experiment. *Acta Oecologica*, 2016, 70: 79-86.
- [2] Hobbie S E, Reich P B, Oleksyn J, Ogdahl M, Zytowski R, Hale C, Karolewski P. Tree species effects on decomposition and forest floor dynamics in a common garden. *Ecology*, 2006, 87(9): 2288-2297.
- [3] 王新源, 赵学勇, 李玉霖, 连杰, 曲浩, 岳祥飞. 环境因素对于旱半干旱区凋落物分解的影响研究进展. *应用生态学报*, 2013, 24(11): 3300-3310.
- [4] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413-1420.
- [5] 沈芳芳, 刘文飞, 吴建平, 袁颖红, 樊后保, 赵楠. 杉木人工林凋落物分解对氮沉降的响应. *生态学报*, 2019, 39(21): 8078-8090.
- [6] 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.
- [7] Ladwig L M, Collins S L, Swann A L, Xia Y, Allen M F, Allen E B. Above- and belowground responses to nitrogen addition in a Chihuahuan Desert grassland. *Oecologia*, 2012, 169(1): 177-185.
- [8] Rowland L, da Costa A C L, Oliveira A A R, Almeida S S, Ferreira L V, Malhi Y, Metcalfe D B, Mencuccini M, Grace J, Meir P. Shock and stabilisation following long-term drought in tropical forest from 15 years of litterfall dynamics. *Journal of Ecology*, 2018, 106(4): 1673-1682.
- [9] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, Belnap J, Porporato A, Norton U, Ravetta D A, Schaeffer S M. Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221-235.
- [10] Gordon H, Haygarth P M, Bardgett R D. Drying and rewetting effects on soil microbial community composition and nutrient leaching. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 302-311.
- [11] Carrera A L, Bertiller M B. Combined effects of leaf litter and soil microsite on decomposition process in arid rangelands. *Journal of Environmental Management*, 2013, 114: 505-511.
- [12] 陈琳, 刘世荣, 温远光, 曾冀, 李华, 杨予静. 南亚热带红锥和马尾松人工林生长对穿透雨减少的响应. *应用生态学报*, 2018, 29(7): 2330-2338.
- [13] Hoover D L, Wilcox K R, Young K E. Experimental droughts with rainout shelters: a methodological review. *Ecosphere*, 2018, 9(1): e02088.
- [14] 闫鹏飞, 展鹏飞, 肖德荣, 王焱, 余瑞, 刘振亚, 王行. 模拟增温及分解界面对茭草凋落物分解速率及叶际微生物结构和功能的影响. *植物生态学报*, 2019, 43(2): 107-118.
- [15] Porporato A, D'Odorico P, Laio F, Rodriguez-Iturbe I. Hydrologic controls on soil carbon and nitrogen cycles. I. Modeling scheme. *Advances in Water Resources*, 2003, 26(1): 45-58.
- [16] 刘尉, 王丽华, 刘林, 符饶, 吴小辉, 黄从德. 增加降水对四川干旱河谷区云南松人工林凋落叶分解的影响. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2017, 45(2): 88-95.
- [17] Salamanca E F, Kaneko N, Katagiri S. Rainfall manipulation effects on litter decomposition and the microbial biomass of the forest floor. *Applied Soil Ecology*, 2003, 22(3): 271-281.
- [18] 黄强, 黄从德. 模拟干旱对华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解及其养分释放的影响. *四川林勘设计*, 2015, (4): 8-13.
- [19] 郑俊强, 郭瑞红, 李东升, 李东, 李金功, 朱保坤, 韩士杰. 氮沉降和干旱对阔叶红松林凋落物分解的影响. *北京林业大学学报*, 2016, 38(4): 21-28.
- [20] Olson J S. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems. *Ecology*, 1963, 44(2): 322-331.
- [21] 高海燕, 红梅, 霍利霞, 叶贺, 赵巴音那木拉, 德海山. 外源氮输入和水分变化对荒漠草原凋落物分解的影响. *应用生态学报*, 2018, 29(10): 3167-3174.
- [22] 霍利霞, 红梅, 赵巴音那木拉, 高海燕, 叶贺. 氮沉降和降雨变化对荒漠草原凋落物分解的影响. *生态学报*, 2019, 39(6): 2139-2146.
- [23] Zhou S X, Huang C D, Xiang Y B, Tie L H, Han B H, Scheu S. Effects of reduced precipitation on litter decomposition in an evergreen broad-

- leaved forest in western China. *Forest Ecology and Management*, 2018, 430: 219-227.
- [24] Moser G, Schuldt B, Hertel D, Horna V, 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.
- [25] 张长伟, 许文盛, 李亚龙, 程冬兵, 张平仓. 湖南省紫鹊界梯田区人工林凋落物持水特性. *水土保持通报*, 2013, 33(4): 176-179.
- [26] 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.
- [27] Santonja M, Fernandez C, Gauquelin T, Baldy V. Climate change effects on litter decomposition: intensive drought leads to a strong decrease of litter mixture interactions. *Plant and Soil*, 2015, 393(1/2): 69-82.
- [28] Zhang Y, Vogel J G, Meek C, Will R, Wilson D, West J. Wood decomposition by microbes and macroinvertebrates, and soil CO₂ efflux vary in response to throughfall reduction and fertilization in a loblolly pine (*Pinus taeda* L.) plantation. *Forest Ecology and Management*, 2016, 382: 10-20.
- [29] Garcia-Pausas J, Casals P, Romanyà J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(6): 989-997.
- [30] Berg B, McLaugherty C. *Plant Litter: Decomposition, Humus Formation, Carbon Sequestration*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008.
- [31] 曾昭霞, 王克林, 曾馥平, 宋同清, 刘孝利, 宋希娟. 桂西北喀斯特区原生林与次生林凋落叶降解和养分释放. *生态学报*, 2012, 32(9): 2720-2728.
- [32] 马志良, 高顺, 杨万勤, 吴福忠. 亚热带常绿阔叶林凋落叶分解过程中氮和磷在不同雨热季节的释放动态. *应用与环境生物学报*, 2015, 21(2): 308-315.
- [33] Parton W, Silver W L, Burke I C, Grassens L, Harmon M E, Currie W S, King J Y, Adair E C, Brandt L A, Hart S C, Fasth B. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. *Science*, 2007, 315(5810): 361-364.
- [34] Manzoni S, Jackson R B, Trofymow J A, Porporato A. The global stoichiometry of litter nitrogen mineralization. *Science*, 2008, 321(5889): 684-686.
- [35] Moore T R, Trofymow J A, Prescott C E, Fyles J, Titus B D. Patterns of carbon, nitrogen and phosphorus dynamics in decomposing foliar litter in Canadian forests. *Ecosystems*, 2006, 9(1): 46-62.
- [36] 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): 4770-4778.
- [37] 安然, 龚吉蕊, 尤鑫, 葛之葳, 段庆伟, 晏欣. 不同龄级速生杨人工林土壤微生物数量与养分动态变化. *植物生态学报*, 2011, 35(4): 389-401.
- [38] Güsewell S, Gessner M O. N: P ratios influence litter decomposition and colonization by fungi and bacteria in microcosms. *Functional Ecology*, 2009, 23(1): 211-219.
- [39] Sun T, Hobbie S E, Berg B, Zhang H G, Wang Q K, Wang Z W, Hättenschwiler S. Contrasting dynamics and trait controls in first-order root compared with leaf litter decomposition. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(41): 10392-10397.
- [40] Pérez-Harguindeguy N, Díaz S, Cornelissen J H C, Vendramini F, Cabido M, Castellanos A. Chemistry and toughness predict leaf litter decomposition rates over a wide spectrum of functional types and taxa in central Argentina. *Plant and Soil*, 2000, 218(1/2): 21-30.