

模拟酸雨淋溶对缙云山针阔混交林与常绿阔叶林凋落物分解的影响

安晓楠¹, 王云琦¹, 李一凡²

(1. 北京林业大学 水土保持学院 重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站, 北京 100083; 2. 广东省林业科学研究院 广东省森林培育与保护利用重点实验室, 广东 广州 510520)

摘要: 【目的】探讨缙云山针阔混交林与常绿阔叶林凋落物分解在酸雨过程中的特点和规律, 为优化缙云山森林管理, 指导林分配置提供科学依据。【方法】以重庆缙云山 2 种典型林分为研究对象, 进行 4 个不同酸碱度: pH 4.50(对照)、pH 4.00、pH 3.25 和 pH 2.50 的酸雨模拟实验, 结合 Olson 负指数衰减模型, 分析针阔混交林与常绿阔叶林的凋落物分解速率并计算分解系数, 定量分析模拟酸雨下 2 种典型林分的凋落物分解变化规律。【结果】①经过 0.5 a 的分解, 对照、pH 4.00、pH 3.25 和 pH 2.50 处理下针阔混交林质量残留率均高于常绿阔叶林, 分别高 4.60%、3.78%、4.22% 和 5.39%。其中, 对照针阔混交林凋落物损失率达到半衰期与全衰期的时间为 1.62、6.98 a, 常绿阔叶林为 1.29 和 5.56 a; 不同酸碱度酸雨淋溶下针阔混交林凋落物损失率达 50% 和 95% 的时间分别为 1.47~2.00 和 6.35~8.43 a, 常绿阔叶林分别为 1.23~1.50 和 5.33~6.48 a。②对照、pH 4.00、pH 3.25 和 pH 2.50 各处理下针阔混交林的分解常数 k 值分别为 0.43、0.47、0.40 和 0.35, 常绿阔叶林则分别为 0.54、0.56、0.51 和 0.46, k 值随着处理 pH 的降低呈下降趋势。③研究区 pH 4.00 的模拟酸雨一定程度上对林内凋落物的分解有促进作用; pH 2.50 和 pH 3.25 的模拟酸雨一定程度上抑制不同林下调落物的分解。【结论】重庆缙云山模拟不同酸碱度酸雨对 2 种典型林分的凋落物分解速率影响显著, 常绿阔叶林分解速率总体高于针阔混交林, 温度制约凋落物分解速率。图 2 表 2 参 32

关键词: 酸雨; 缙云山; 凋落物; 分解; 针阔混交林; 常绿阔叶林

中图分类号: S718.5 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2022)03-0516-08

Effects of simulated acid rain leaching on the litter decomposition of coniferous broad-leaved mixed forest and evergreen broad-leaved forest in Mount Jinyun

AN Xiaonan¹, WANG Yunqi¹, LI Yifan²

(1. Three-gorges Reservoir Area (Chongqing) Forest Ecosystem Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Silviculture, Protection and Utilization, Guangdong Academy of Forestry, Guangzhou 510520, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] This study, with an investigation of the characteristics and laws of litter decomposition in mixed coniferous and broad-leaved forest and evergreen broad-leaved forest during acid rain in Jinyun Mountain, is aimed to provide scientific basis for the optimization of forest management and the guidance in forest stand allocation. [Method] With two typical forests of Jinyun Mountain in Chongqing selected, four acid rain simulation experiments with different concentrations were conducted. Then, with the employment of the Olson negative exponential decay model, the decomposition rate of litter of two forest stands was

收稿日期: 2021-05-07; 修回日期: 2021-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2017YFC0505303); 林业科学技术研究项目 (2017-02)

作者简介: 安晓楠 (ORCID: 0000-0002-3494-454X), 从事土壤微生物、土壤侵蚀研究。E-mail: 1273535558@qq.com。通信作者: 王云琦 (ORCID: 0000-0001-7105-3669), 教授, 博士, 从事森林水文、土壤侵蚀研究。E-mail: wangyunqi@bjfu.edu.cn

assessed, and the laws of litter decomposition in two typical forest stands under simulated acid rain were analyzed. [Result] (1) After a six-month decomposition, in comparison, the mass residue rate of the mixed coniferous and broad-leaved forest treated with acid rain of pH 4.50(ck), pH 4.00, pH 3.25, and pH 2.50 was higher than those of the evergreen broad-leaved forest under the same conditions by 4.60%, 3.78%, 4.22% and 5.39%. (2) The time for the control group to reach half-life and full-life of litter decomposition in the coniferous and broad-leaved mixed forest was 1.62 a and 6.98 a whereas that for evergreen broad-leaved forest was 1.29 and 5.56 a; the time for the material loss rate to reach 50% and 95% for the coniferous and broad-leaved mixed forest litter under different concentrations of acid rain is 1.47–2.00 a and 6.35–8.43 a whereas that for the evergreen broad-leaved forest is 1.23–1.50 a and 5.33–6.48 a. (3) The k values of the mixed coniferous and broad-leaved forests treated with ck, pH 4.0, pH 3.25, and pH 2.5 were 0.43, 0.47, 0.40, and 0.35, respectively while those of the evergreen broad-leaved forest were 0.54, 0.56, 0.51, and 0.46, respectively, and the overall k value shows a downward trend as the pH value of the treatment decreases. (4) The simulated acid rain with pH 4.00 in the study area promoted the decomposition of litter in the forest to a certain extent whereas the simulated acid rain with pH 2.50 and pH 3.25 inhibited the decomposition of falling objects in different forests to a certain extent. [Conclusion] In Jinyun Mountain of Chongqing, simulated acid rain of different concentrations had a significant effect on the decomposition rates of litters in the two typical stands and the decomposition rate of evergreen broad-leaved forest was higher than that of coniferous and broad-leaved mixed forest. [Ch, 2 fig. 2 tab. 32 ref.]

Key words: acid rain; Mount Jinyun; litter; decomposition; coniferous and broad-leaved mixed forest; evergreen broad-leaved forest

凋落物分解是调节森林生态系统养分循环的基本生态过程^[1],也是控制森林生态系统碳循环的关键决定因素^[2]。凋落物分解过程受环境气候、凋落物质量、微生物等多种因素的影响^[3-4]。近年来,人类活动引起的全球变化对凋落物分解的影响已成为研究的热点,尤其是酸雨对凋落物分解影响的变化受到国内外学者的普遍关注^[4-5]。有研究发现:酸雨对凋落物分解的影响与养分还原、生态系统碳循环和碳平衡、退化生态系统的恢复、生态系统对酸雨的临界负荷等方面具有密切的联系^[6],它通过酸解凋落物有机成分而改变凋落物的物理化学结构,从而影响凋落物分解速率,最终改变整个地球碳循环进程^[7]。森林凋落物分解速率对环境变化特别是氮沉降和温度增加等^[8-9]的研究逐渐丰富,以凋落物分解速率为指标评估酸雨对凋落物分解的影响研究也逐渐开展。目前测定凋落物分解速率的主流方法是分解袋法,即观测分解袋内给定样品量的凋落物的质量损失率,然后根据指数模型来推算分解速率。凋落物分解常数 k 值是表征凋落物分解速率的常用指标, k 值越大,凋落物分解速率越快,反之则越慢^[10]。酸雨对凋落物分解会因树种的不同而有明显的差异,酸雨处理下,阔叶树种叶凋落物分解速率比针叶树种的叶凋落物分解速率快^[11],马尾松 *Pinus massoniana* 凋落物分解比其他树种对酸雨酸碱度更敏感^[12]。中国南方是继欧洲和北美以外的世界第三大酸雨区^[13]。近几年关于酸雨与凋落物的研究主要集中在单个树种凋落叶上,而对不同林分整体林下凋落物的关注较少^[14],同时多侧重于叶凋落物质量所引起的凋落物分解速率的变化,鲜有研究酸雨导致的综合影响。酸雨胁迫对西南地区林分凋落物分解的变化规律尚不明确。因此,本研究选取中国西南酸雨区重庆缙云山的针阔混交林和常绿阔叶林作为研究对象,研究不同酸碱度酸雨处理下调落物的干质量残留率和分解速率随时间变化的动态过程,分析缙云山针阔混交林与常绿阔叶林凋落物分解在缓解酸雨过程中的特点和规律,以期掌握森林土壤碳库循环,为优化森林管理,指导林分配置提供科学依据。

1 研究区与方法

1.1 研究区概况

研究区位于三峡库区(重庆段)重庆市缙云山国家级自然保护区,嘉陵江小三峡之温塘峡西岸。缙云

山位于重庆市西北部的北碚、沙坪坝、璧山3个区县境内(29°41'~29°52'N, 106°17'~106°24'E), 海拔为175.0~951.5 m, 总面积为76 km²。缙云山具有典型的亚热带季风湿润性气候特征, 雨量丰富, 年均降水量为1 611.8 mm, 年均相对湿度为85%以上, 年均酸雨pH 4.53, 年均日照时数1 293 h。缙云山地形平缓, 土层较薄, 主要土壤为黄壤和水稻土两大类, 土壤pH 3.5~4.5。保护区内植物资源丰富, 森林覆盖率高, 林分凋落物保护较好, 经营性活动如采伐、施肥、抚育等基本停止。主要植被类型为常绿阔叶林、针阔混交林、常绿阔叶灌丛、暖性针叶林、针阔混交林、竹林, 以及亚热带灌草丛等。主要树种为马尾松、四川大头茶 *Gordonia acuminata*、杉木 *Cunninghamia lanceolata*、四川山矾 *Syraplocos setchuanensis*、白毛新木姜子 *Neolitea aurata* 等。

1.2 材料与方

1.2.1 样地选取与凋落物样品采集 选取针阔混交林、常绿阔叶林2种典型林分作为研究对象, 样品采集、保存和测定方法严格参照《土壤理化分析》^[15], 标准样地概况见表1。分别选取10 m×10 m的采样框并用孔径1 mm尼龙网围栏, 于2016年5月在2种样地内随机选取5 m×5 m样方各3个, 用凋落物收集器直接收集凋落物, 收集主要树种与伴生树种的落叶、枯枝、落果、碎屑等, 收集到的凋落物在60℃恒温下烘至恒量后称量备用。再将采集的凋落物称量20 g装入由尼龙制成的20 cm×20 cm的分解网袋(网孔1 mm)内, 由于实验地点内无径流, 无大风天气, 故编号挂牌后直接将所有尼龙网袋平放在采集针阔混交林与常绿阔叶林凋落物的样方凋落物层中, 使其下方接触矿质土壤, 上面用凋落物覆盖, 每个5 m×5 m的小样方中设置6个摆放点, 对应6次取样时间, 模拟凋落物分解的自然状况^[16]。

表1 样地基本情况

Table 1 Basic situation of the sample plot

林分	表层土壤/cm	海拔/m	坡向	坡度/(°)	龄级	郁闭度	主要树种	伴生树种
针阔混交林	4.00	760	西北	16~25	Ⅵ	0.9	马尾松、四川大头茶、桉木、四川杨桐、光叶四川山矾	山矾、白毛新木姜子
常绿阔叶林	3.65	825	西北	26	Ⅵ	0.9	四川大头茶、四川杨桐、小叶栲、贵州鼠李、四川白毛新木姜子	川山矾、桉木

说明: 研究区域均为人工林, 以10 a为1个龄级, 用Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ……表示。四川杨桐 *Adinandra bockiana*、桉木 *Eurya japonica*、光叶山矾 *Symplocos lancifolia*、小叶栲 *Castanopsis carlesii*、贵州鼠李 *Rhamnus esquirolii*

1.2.2 模拟酸雨淋溶 根据重庆缙云山降水化学组成^[17], 使用去离子水配制模拟酸雨, 其中SO₄²⁻和NO₃⁻摩尔比为5:1。针阔混交林、常绿阔叶林2种典型林分内均设置4个处理: 对照(按照自然状态降雨年均pH 4.50设置, ck)、pH 4.00、pH 3.25和pH 2.50。其中, 按照降雨pH最低值设置pH 3.25, 考虑极端状况下降雨pH可能降低, 设置pH 2.50处理。每个处理3次重复, 共设24个分解袋。根据重庆缙云山多年平均降水量计算淋溶总量与淋溶频率^[9], 喷淋酸雨, 每月施酸2次, 每次每个样品施酸2 L, 均匀喷洒覆盖样品周围1 m²范围。分别在样品放置后的第30天(6月2日)、第60天(7月2日)、第94天(8月3日)、第122天(9月2日)、第150天(10月1日)和第185天(11月3日), 取回1次凋落物分解袋, 每次每个酸雨酸碱度取样3袋, 合计24袋。用清水快速洗净残留凋落物表面附着的泥沙, 清理外界长入分解袋内的根系杂物, 于80℃烘箱中烘干称量, 测定残留凋落物的质量。

1.2.3 凋落物残留率与分解周期计算 凋落物累积分解残留率采用Olson负指数衰减模型^[18]计算:

$$y = \frac{M_t}{M_0} = ae^{-mt}$$

其中: y 为凋落物残留率(%), t 为凋落物分解时间(a), M_t 为时间 t 后凋落物残留质量(g), M_0 为凋落物样品未分解时质量(g), a 为拟合系数, m 为分解系数。用凋落物分解常数 k 值估算凋落物分解的半衰期与全衰期, 计算公式如下^[19]:

$$t_{0.5} = \frac{\ln 0.5}{-k};$$

$$t_{0.95} = \frac{\ln 0.95}{-k}。$$

其中： $t_{0.5}$ 为凋落物分解至 50%(半衰期)需要的时间 (a)， $t_{0.95}$ 为凋落物分解至 95%(全衰期)需要的时间 (a)。

1.2.4 数据处理 采用 Excel 2019 软件整理数据，采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析，采用 LSD 最小差异显著法多重比较。

2 结果与分析

2.1 酸雨胁迫对 2 种凋落物干质量残留率的影响

由图 1 和图 2 可见：针阔混交林干质量残留率(经历相同分解时间)在 pH 4.00、pH 3.25 的酸雨处理下小于 ck，在 pH 2.50 的酸雨处理下大于 ck，且差异显著 ($P < 0.05$)。受控试验表明：凋落物在经过 0.5 a 的分解后，针阔混交林 ck、pH 4.00、pH 3.25 和 pH 2.50 酸雨处理的干质量残留率分别为 81.21%、79.14%、81.65% 和 84.52%，干质量损失率分别为 18.79%、20.86%、18.35% 和 15.48%；常绿阔叶林 ck、pH 4.00、pH 3.25 和 pH 2.50 酸雨处理的残留率分别为 76.61%、75.36%、77.43% 和 79.13%，干质量损失率分别为 23.39%、24.64%、22.57% 和 20.87%。在经过 0.5 a 的分解后，ck、pH 4.00、pH 3.25 和 pH 2.50 酸雨处理后的针阔混交林干质量残留率均高于常绿阔叶林，分别高 4.60%、3.78%、4.22% 和 5.39%。

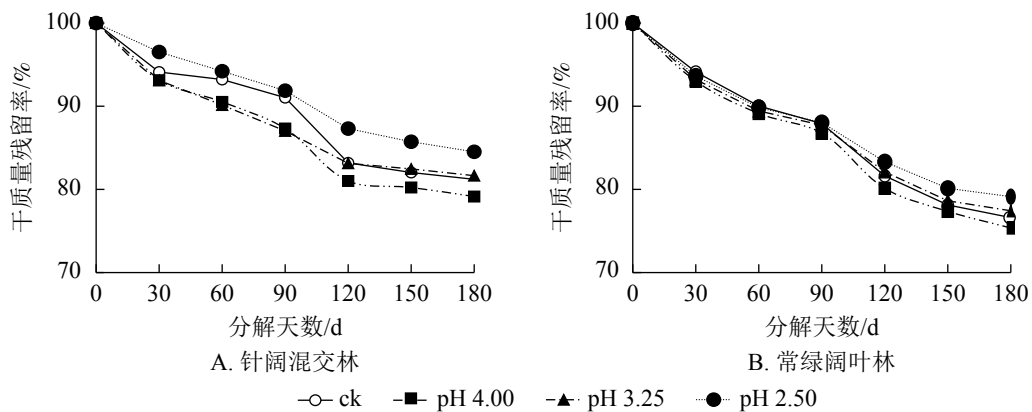


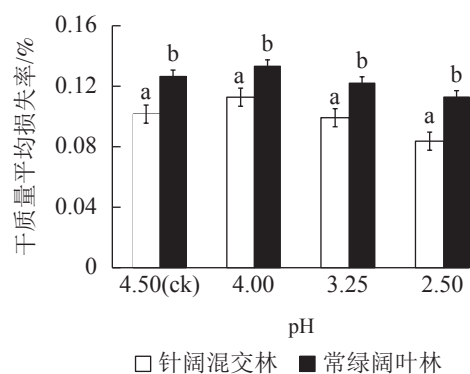
图 1 2 种典型林分凋落物干质量残留率动态

Figure 1 Changes in dry weight remaining of leaf litter decomposition of three typical tree species

在相同 pH 值酸雨处理下，针阔混交林、常绿阔叶林凋落物在 6—7 月 (即 30~60 d) 干质量残留率曲线平缓，8—9 月 (即 94~122 d) 曲线下落幅度较大，表明在相同 pH 值处理下，针阔混交林、常绿阔叶林在 6—7 月分解缓慢，5 月、8—9 月凋落物分解较为迅速。随着时间的推移，针阔混交林在 9 月 (122 d) 后凋落物分解速率降低，呈平缓趋势，常绿阔叶林在 9 月后凋落物分解速率仍达到较高水平，下降明显。在相同月份下，凋落物干质量残留率在 pH 2.50 处理下最高，pH 4.00 处理最低。

2.2 酸雨胁迫对 2 种凋落物分解常数 k 值的影响

由表 2 可见：利用 Olson 负指数衰减函数模型对针阔混交林和常绿阔叶林的凋落物干质量残留率和分解时间进行拟合， R^2 均在 0.9 以上，达极显著水平，拟合效果良好。ck、pH 4.00、pH 3.25 和 pH 2.50 各处理下针阔混交林的 k 值分别为 0.43、0.47、0.40 和 0.35，而常绿阔叶林则分别为 0.54、0.56、0.51 和 0.46， k 值随 pH 值的降低呈下降趋势。另外由 k 值可算得，ck 中针阔混交林凋落物质量损失率达 50% 和 95% 的时间分别为 1.62 和 6.98 a，常绿阔叶林则分别为 1.29 和 5.56 a；pH 4.00 酸雨处理下针阔混交林凋落物干质量损失率分别达 50% 和 95% 的时间分别为 1.47 和 6.35 a，常绿阔叶林则分别为



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)

图 2 2 种典型林分凋落物干质量平均损失率

Figure 2 Average dry weight loss rate of litter of two typical forests

1.23 和 5.33 a; pH 3.25 酸雨处理下针阔混交林凋落物干质量损失率达 50% 和 95% 的时间分别为 1.75 和 7.56 a, 常绿阔叶林则分别为 1.37 和 5.92 a; pH 2.50 酸雨处理下针阔混交林凋落物干质量损失率达 50% 和 95% 的时间分别为 2.00 和 8.63 a, 常绿阔叶林则分别为 1.50 和 6.48 a, 且针阔混交林与常绿阔叶林在各酸雨酸碱度下差异显著 ($P < 0.05$)。针阔混交林与常绿阔叶林在 pH 2.50 与 pH 3.25 酸雨处理下的分解速率均小于 ck, 半衰期与周转期所需的时间均比 ck 长; pH 4.00 酸雨处理的分解速率较 ck 大, 半衰期与周转期所需的时间比 ck 短。

表 2 凋落物分解的 Olson 负指数衰减模型

Table 2 Olson negative exponential decay model of litter decomposition

林分	pH	指数模型	相关系数 R^2	分解系数 k	半衰期/a	全衰期/a
针阔混交林	4.50 (ck)	$y = 99.13e^{-0.43x}$	0.93	0.43 a	1.62 b	6.98 b
	4.00	$y = 97.98e^{-0.47x}$	0.95	0.47 b	1.47 ab	6.35 ab
	3.25	$y = 97.20e^{-0.40x}$	0.93	0.40 a	1.75 b	7.56 b
	2.50	$y = 99.60e^{-0.35x}$	0.98	0.35 a	2.00 b	8.63 b
常绿阔叶林	4.50 (ck)	$y = 99.08e^{-0.54x}$	0.98	0.54 b	1.29 a	5.56 a
	4.00	$y = 98.53e^{-0.56x}$	0.98	0.56 ab	1.23 a	5.33 a
	3.25	$y = 98.33e^{-0.51x}$	0.97	0.51 b	1.37 a	5.92 a
	2.50	$y = 98.20e^{-0.46x}$	0.97	0.46 b	1.50 ab	6.48 ab

说明: 不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。y 为凋落物干质量残留率, x 为凋落物分解时间

3 讨论

3.1 酸雨胁迫对 2 种林分凋落物分解的影响

在同一观测阶段, 缙云山针阔混交林、常绿阔叶林凋落物随着酸雨 pH 值的减小, 凋落物干质量残留率均表现出先增大后减小的趋势, 在 pH 4.00 时达到最小值, 此时分解速率最大。这与程煜等^[13] 研究得出的不同酸碱度酸雨对凋落物分解速率的影响结果一致。可能是 pH 4.00 的模拟酸雨酸碱度与 ck 差距不大, 且土壤本身存在酸缓冲能力, 同时模拟酸雨中的 NO_3^- 作为氮源添加刺激了土壤微生物, 从而提高了分解效率^[20]。而 pH 2.50 和 pH 3.25 的模拟酸雨酸碱度过低导致微生物活性和功能降低, 且在一定范围内随着酸雨淋溶酸碱度的降低^[21-22], 分解速率愈加减慢, 表现为凋落物分解被抑制。

3.2 季节变化对 2 种林分凋落物分解的影响

本研究发现: 相同 pH 值的酸雨处理下, 针阔混交林、常绿阔叶林凋落物在 6—7 月、10—11 月凋落物分解缓慢, 5 月、8—9 月分解较为迅速。可能因为: 5 月属于分解初期, 凋落物可溶性成分大量淋失, 导致分解速率较高; 6—7 月, 难分解的物质相对增加, 温度相对变化不大, 分解速率主要受微生物控制; 8—9 月, 由于夏季温度升高, 水分充足, 针阔混交林、常绿阔叶林地表植被活性大, 微生物活性提高, 分解速率增大; 而 10—11 月, 气温降低, 地表植被逐渐进入冬寒期, 微生物活性受到影响, 分解速率减缓。在同一区域内, 温度和湿度是众多气候因素中制约凋落物分解的主要外在因素, 水分和温度增加, 凋落物的分解速率会以指数增加模式呈现^[23-24]。HORNSBY 等^[25] 在研究树木凋落物的分解速率时发现: 凋落物的分解速度随着分解时温度的升高而加快, 分解温度与分解速度呈正相关关系; 王其兵等^[26] 通过测定草地凋落物分解速率的研究中也得出了相同结论。本研究分析随季节温度变化研究地的水热、pH 等条件改变, 从而影响了部分微生物的活性, 甚至是土壤中 H^+ 的积累, 进而对凋落物的分解速率产生了较大的影响。本研究中由于人工控制降水量, 前期不同季节月份中水分条件差异小, 湿度因素对分解速率产生的影响差异小, 这使得气候变化导致的温度变化影响了 2 种林分凋落物的分解速率。

3.3 不同树种对凋落物分解的影响

不同酸碱度酸雨淋溶下 2 种典型林分凋落物干质量损失率达 50% 和 95% 的时间总体表现为常绿阔叶林早于针阔混交林。针阔混交林和常绿阔叶林凋落物 k 对同一酸碱度酸雨胁迫响应不同, 说明不同树种的林下调落物分解速率有差异。在经过 0.5 a 的分解后, 常绿阔叶林凋落物分解速率大于针阔混交

林, 符合阔叶凋落物比针叶凋落物易于分解的一般规律。阔叶林微生物群落对外部酸的抵抗力高于针叶林^[27], 其凋落物比针叶凋落物易于分解。植物种类也会影响凋落物的初始化学特性^[28-29]。混合凋落物比单一凋落物含有丰富多样的碳源和其他养分物质^[30], 针叶类凋落物添加阔叶类后碳源种类和数量发生改变^[31], 导致土壤微生物量和微生物碳代谢强度减少, 因此相对降低了凋落物的分解速率, 但是这种作用的影响程度是否能够改变酸雨淋溶产生的影响还需要进一步研究。

本研究模拟酸雨喷洒时间较短, 尚不能确定西南地区亚热带森林对长期酸雨胁迫如何响应及酸雨的促进或者抑制作用是否已经达到一定阈值。此外, 凋落物能缓冲酸雨反应, 林下植物对凋落物分解也产生一定联系作用^[32]。因此, 未来应同步开展多林分凋落物质量、叶片性能和林下植物对酸雨输入响应的长期野外研究, 以更好地揭示长期酸雨沉降对亚热带森林的综合影响。

4 结论

综上, 重庆缙云山针阔混交林和常绿阔叶林凋落物质量残留率、半衰期和全衰期的变化特征受不同酸碱度酸雨影响显著, 模拟酸雨 pH 4.00 处理时凋落物分解速率最大, 常绿阔叶林分解速率总体高于针阔混交林。在同一区域范围内, 除酸雨酸碱度、凋落物种类之外, 凋落物分解速率还受到温度条件的制约。

5 参考文献

- [1] BRAVO-OVIEDO A, RUIZ-PEINADO R, ONRUBIA R, *et al.* Thinning alters the early-decomposition rate and nutrient immobilization-release pattern of foliar litter in Mediterranean oak-pine mixed stands [J]. *For Ecol Manage*, 2017, **391**: 309 – 320.
- [2] CREAMER C A, MENEZES A, KRULL E S, *et al.* Microbial community structure mediates response of soil C decomposition to litter addition and warming [J/OL]. *Soil Biol Biochem*, 2014, **80** [2021-04-03]. doi: [10.1016/j.soilbio.2014.10.008](https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.10.008).
- [3] BERG B, BERG M P, BOTTNER P. Litter mass loss rates in pine forests of Europe and eastern United States: some relationships with climate and litter quality [J]. *Biogeochemistry*, 1993, **20**: 127 – 159.
- [4] 阿旺, 吕汪汪, 周阳, 等. 温度和湿度对高寒草甸凋落物分解的影响 [J]. *生态学报*, 2021, **41**(17): 6846 – 6853.
Awang, LÜ Wangwang, ZHOU Yang, *et al.* Effects of temperature and moisture on litter decomposition in an Alpine meadow [J]. *Acta Ecol Sin*, 2021, **41**(17): 6846 – 6853.
- [5] PETRAGLIA A, CACCIATORI C, CHELLI S, *et al.* Litter decomposition: effects of temperature driven by soil moisture and vegetation type [J]. *Plant Soil*, 2019, **435**: 187 – 200.
- [6] CHAPIN F, MASTON P, MOONEY H. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* [M]. New York: Springer-Verlag, 2002: 151.
- [7] 季晓燕, 江洪, 洪江华, 等. 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 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(6): 1731 – 1739.
JI Xiaoyan, JIANG Hong, HONG Jianghua, *et al.* Effects of litter thickness on leaf litter decomposition and enzyme activity of three trees in the subtropical forests [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, **33**(6): 1731 – 1739.
- [8] 宋新章, 江洪, 张慧玲, 等. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响 [J]. *生态学报*, 2008, **28**(9): 359 – 368.
SONG Xinzhang, JIANG Hong, ZHANG Huiling, *et al.* A review on the effects of global environment change on litter decomposition [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(9): 359 – 368.
- [9] 姚钧能, 吕建华, 俞卫良, 等. 氮沉降和经营强度对毛竹林凋落叶生态化学计量特征的影响 [J]. *应用生态学报*, 2018, **29**(2): 467 – 473.
YAO Junneng, LÜ Jianhua, YU Weiliang, *et al.* Effects of nitrogen deposition and management intensity on stoichiometry of leaf litter in Moso bamboo forest [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2018, **29**(2): 467 – 473.
- [10] 陈玥希, 陈蓓, 孙辉, 等. 川西高海拔增温和加氮对红杉凋落物有机组分释放的影响 [J]. *应用生态学报*, 2017, **28**(6): 1753 – 1760.
CHEN Yuexi, CHEN Bei, SUN Hui, *et al.* Impacts of warming and nitrogen addition on organic fraction release in fresh litter of *Larix potaninii* in alpine zone of the western Sichuan Province, China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28**(6): 1753 –

1760.

- [11] BENDING G D, TURNER M K, JONES J E. Interactions between crop residue and soil organic matter quality and the functional diversity of soil microbial communities [J]. *Soil Biol Biochem*, 2002, **34**(8): 1073 – 1082.
- [12] 洪江华, 江洪, 马元丹, 等. 模拟酸雨对亚热带典型树种叶凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2009, **29**(10): 5246 – 5251.
HONG Jianghua, JIANG Hong, MA Yuandan, *et al.* The influence of acid rain on the leaf litter decomposition of three dominant trees in the subtropical forests [J]. *Acat Ecol Sin*, 2009, **29**(10): 5246 – 5251.
- [13] 程煜, 陈灿, 洪伟, 等. 模拟酸雨及降水量对木荷、马尾松叶凋落物分解的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2009, **38**(6): 595 – 599.
CHENG Yu, CHEN Can, HONG Wei, *et al.* Effect of acid rain and water addition on decomposition of *Schima superba* and *Pinus massoniana* leaf litter [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci Ed*, 2009, **38**(6): 595 – 599.
- [14] 梁国华, 张德强, 卢雨宏, 等. 鼎湖山针阔叶混交林凋落物 CO₂ 释放对模拟酸雨的响应[J]. 广西植物, 2019, **39**(3): 394 – 402.
LIANG Guohua, ZHANG Deqiang, LU Yuhong, *et al.* Responses of litter CO₂ emission to simulated acid rain in a mixed conifer and broad-leaved forest of Dinghushan Nature Reserve [J]. *Guihaia*, 2019, **39**(3): 394 – 402.
- [15] SCHUSTER M J, DUKES J S. Non-additive effects of invasive tree litter shift seasonal N release: a potential invasion feedback [J]. *Oikos*, 2014, **123**(9): 1101 – 1111.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. *Analysis of Soil Physico-chemical Properties* [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978.
- [17] GERDOL R, PETRAGLIA A, BRAGAZZA L, *et al.* Nitrogen deposition interacts with climate in affecting production and decomposition rates in *Sphagnum* mosses [J]. *Glob Change Biol*, 2007, **13**(8): 1810 – 1821.
- [18] 魏虹, 王建力, 李旭光. 重庆缙云山降水化学组成的季节变化特征分析[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2005, **30**(4): 725 – 729.
WEI Hong, WANG Jianli, LI Xuguang, *et al.* Analysis on seasonal variation of chemical composition of rainfall in Jinyun Mountain, Chongqing, China [J]. *J Southwest China Norm Univ Nat Sci*, 2005, **30**(4): 725 – 729.
- [19] 翁轰, 李志安, 屠梦照, 等. 鼎湖山森林凋落物量及营养元素含量研究[J]. 植物生态学与地植物学学报, 1993, **17**(4): 299 – 304.
WENG Hong, LI Zhian, TU Mengzhao, *et al.* The production and nutrient contents of litter in forests of Dinghushan Mountain [J]. *J Plant Ecol*, 1993, **17**(4): 299 – 304.
- [20] CHAMBERS J Q, SCHIMMEL J P, NOBRE A D. Respiration from coarse wood litter in central Amazon forests [J]. *Biogeochemistry*, 2001, **52**(2): 115 – 131.
- [21] 胡波, 张会兰, 王彬, 等. 重庆缙云山地区森林土壤酸化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, **24**(2): 300 – 309.
HU Bo, ZHANG Huilan, WANG Bin, *et al.* Analysis on the forest soil acidification and mechanisms in Chongqing Jinyun Mountain [J]. *Resour Environ Yangtze Basin*, 2015, **24**(2): 300 – 309.
- [22] 张素彦, 蒋红志, 王扬, 等. 凋落物去除和添加处理对典型草原生态系统碳通量的影响[J]. 植物生态学报, 2018, **42**(3): 349 – 360.
ZHANG Suyan, JIANG Hongzhi, WANG Yang, *et al.* Effects of litter removal and addition on ecosystem carbon fluxes in a typical steppe [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2018, **42**(3): 349 – 360.
- [23] 李信莉. 三峡库区 4 种树种根际土壤化学性质和酶活性对模拟酸雨的响应[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
LI Xinli. *Responses of Rhizosphere Soil Chemical Properties and Enzyme Activity of Four Tree Species in Three Gorges Reservoir Area to Simulated Acid Rain* [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [24] ZHOU Shixing, HUANG Congde, XIANG Yuanbin, *et al.* Effects of reduced precipitation on litter decomposition in an evergreen broad-leaved forest in western China [J]. *For Ecol Manage*, 2018, **430**: 219 – 227.
- [25] HORNSBY D C, LOCKABY B G, CHAPPELKA A H. Influence of microclimate on decomposition in loblolly pine stands: a field microcosm approach [J]. *Can J For Res*, 1995, **25**(10): 1570 – 1577.
- [26] 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.
WANG Qibing, LI Linghao, BAI Yongfei, *et al.* Effects of simulated climate change on the decomposition of mixed litter in

- three grass land plant communities [J]. *Acta Plant Ecol*, 2000, **24**(6): 674 – 679.
- [27] CHEN Yuanqi, ZHANG Yanju, CAO Jianbo, *et al.* Stand age and species traits alter the effects of understory removal on litter decomposition and nutrient dynamics in subtropical *Eucalyptus* plantations [J]. *Glob Ecol Conserv*, 2019, **20**: 1 – 10.
- [28] 王丹. 模拟酸雨与柳杉凋落物对土壤养分和微生物的影响[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2014.
WANG Dan. *Effects of Simulated Acid Rain and Litter of Cryptomeria fortunei on Soil Nutrients and Soil Microorganisms*[D]. Hangzhou: Zhejiang A&F University, 2014.
- [29] 张冰冰, 万晓华, 杨军钱, 等. 不同凋落物质量对杉木人工林土壤微生物群落结构的影响[J]. 土壤学报, 2019, **58**(4): 1040 – 1049.
ZHANG Bingbing, WAN Xiaohua, YANG Junqian, *et al.* Effects of litters different in quality on soil microbial community structure in *Cunninghamia lanceolata* plantation [J]. *Acta Pedol Sin*, 2019, **58**(4): 1040 – 1049.
- [30] MIKOLA J, SILFVER T, PAASO U, *et al.* Leaf N resorption efficiency and litter N mineralization rate have a genotypic tradeoff in a silver birch population [J]. *Ecology*, 2018, **99**(5): 1227 – 1235.
- [31] 汪凤林, 张月全, 陈爱玲, 等. 不同配比的杉木、火力楠凋落物中土壤酶活性的变化及其对凋落物分解的影响[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2017, **46**(5): 576 – 583.
WANG Fenglin, ZHANG Yuequan, CHEN Ailing, *et al.* Enzyme activity of litter and soil and its effect on litter decomposition under different combinations of *Cunninghamia lanceolata* and *Michelia macclurei* [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci Ed*, 2017, **46**(5): 576 – 583.
- [32] CHEN Yuanqi, ZHANG Yanju, CAO Jianbo, *et al.* Stand age and species traits alter the effects of understory removal on litter decomposition and nutrient dynamics in subtropical *Eucalyptus* plantations[J/OL]. *Glob Ecol Conserv*, 2019, **20**: e00693[2021-04-03]. doi: [10.1016/j.gecco.2019.e00693](https://doi.org/10.1016/j.gecco.2019.e00693).