

DOI: 10.5846/stxb202101150159

郭鸿蓉, 吴福忠, 倪祥银, 熊德成, 魏文涛, 吴若冰, 朱玲, 胥超. 中亚热带次生林和人工林凋落枝水溶性碳氮磷动态特征. 生态学报, 2021, 41(13): 5175-5183.

Guo H R, Wu F Z, Ni X Y, Xiong D C, Wei W T, Wu R B, Zhu L, Xu C. Water soluble carbon, nitrogen and phosphorus dynamics of twig litter in subtropical secondary and forest plantations. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(13): 5175-5183.

中亚热带次生林和人工林凋落枝水溶性碳氮磷动态特征

郭鸿蓉¹, 吴福忠^{1,2}, 倪祥银^{1,2}, 熊德成^{1,2}, 魏文涛¹, 吴若冰¹, 朱玲¹, 胥超^{1,2,*}

¹ 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

² 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福州 350007

摘要:凋落枝是森林地上部分凋落物的重要组成部分,揭示其水溶性碳氮磷的动态规律对于认识森林物质循环过程具有重要意义,但目前研究集中于凋落叶,而对凋落枝缺乏必要关注。因此,以中亚热带典型马尾松(*Pinus massoniana*)人工林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林和米槠(*Castanopsis carlesii*)次生林为研究对象,在一个自然年内调查了凋落枝水溶性碳、氮、磷含量及其芳香化指数以及化学计量比的动态变化过程。结果显示:(1)米槠次生林凋落枝水溶性碳、氮、磷含量及芳香化指数明显大于马尾松和杉木人工林;(2)水溶性碳和磷、水溶性碳比磷、水溶性氮比磷和芳香化指数有明显的季节变化;(3)水溶性碳、水溶性磷、水溶性氮比磷和芳香化指数在不同林分和季节间有交互作用。(4)马尾松和杉木人工林、米槠次生林凋落枝水溶性物质含量的季节变化多数与气温和降水呈显著负相关。这些结果表明亚热带次生林可能相对于人工林具有更为高效的以凋落枝为载体的物质循环过程,在未来气候变暖背景下亚热带森林由凋落枝归还给土壤的养分浓度可能降低。

关键词:森林凋落物;水溶性物质;养分动态;物质循环

Water soluble carbon, nitrogen and phosphorus dynamics of twig litter in subtropical secondary and forest plantations

GUO Hongrong¹, WU Fuzhong^{1,2}, NI Xiangyin^{1,2}, XIONG Decheng^{1,2}, WEI Wentao¹, WU Ruobing¹, ZHU Ling¹, XU Chao^{1,2,*}

¹ School of Geographical Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

² Cultivation Base of State Key Laboratory of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China

Abstract: Twig litter is an important component of forest litter. It is of great significance to reveal the dynamics of water soluble carbon, nitrogen and phosphorus for understanding the forest material cycle. However, the previous researches paid more attention to leaf litter than twig litter. In this regard, we investigated water soluble carbon, nitrogen, phosphorus, and aromatization index as well as stoichiometric ratio dynamics of twig litter in a year round in *Pinus massoniana* plantation, *Cunninghamia lanceolata* plantation and *Castanopsis carlesii* secondary forest. Our results showed that: (1) water soluble carbon, nitrogen and phosphorus as well as aromatization index of twig litter in *Castanopsis carlesii* secondary forest were significantly higher than those of *Pinus massoniana* and *Cunninghamia lanceolata* plantations; (2) water soluble carbon and phosphorus, water soluble carbon- phosphorus ratio and nitrogen-phosphorus ratio, as well as aromatization index of twig litter varied significantly in different seasons; (3) there were significant interactions between forest types and sampling

基金项目:国家自然科学基金优秀青年基金项目(32022056,31922052);福建省公益类科研院所专项(2020R1002004)

收稿日期:2021-01-15; **修订日期:**2021-05-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chaoxu@fjnu.edu.cn

seasons in affecting water soluble carbon and nitrogen, water soluble nitrogen-phosphorus ratio, and aromatization index. (4) the seasonal variation of water soluble substance of twig litter in *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolata* plantation and *Castanopsis carlesii* secondary forest were negatively correlated with air temperature and precipitation. These results suggest that subtropical secondary forests may have a more efficient nutrients cycling process based on twig litter than plantations, and the concentrations of nutrients cycling back to soil via twig litter will decrease in subtropical forests under future warming scenarios.

Key Words: forest litter; water soluble substances; nutrients dynamics; material recycling

森林凋落物指生态系统中由地上植物部分形成并归还地表,作为分解者物质和能量来源,维持生态系统功能的有机质的总称^[1],包括叶、枝、树皮、繁殖器官和代谢产物等^[2]。水溶性物质(包括碳氮磷等)是凋落物的重要组成部分^[3],也是土壤微生物和植物的重要养分来源^[4]。水溶性物质的数量可表征激活土壤微生物的能源物质多寡^[5],水溶性物质的组成决定了其可降解性和受微生物的偏爱程度^[6]。而且水溶性物质的季节变化特征也影响着土壤微生物的呼吸大小^[7-8]。植物归还给土壤的凋落物是土壤微生物利用的水溶性物质最重要的来源^[9-10]。因此,揭示新近产生凋落物水溶性物质的数量、组成及季节动态变化规律是理解凋落物输入对整个森林生态系统生物地球化学循环过程影响的关键^[11-12]。以往的研究仅对凋落物叶水溶性物质有所关注^[13-15],而凋落物枝占整个凋落物总量高达 37%^[16],却很少被关注。凋落物枝的养分与木质素含量和凋落物叶截然不同^[17],导致凋落物枝的水溶性物质的数量与组成也区别于叶。因此,对凋落物枝水溶性物质的数量、组成及季节动态变化进行监测有助于深入认识森林生态系统生物地球化学循环过程。

我国的亚热带森林被称为“北回归线荒漠带上的绿洲”,雨热同季、森林生产力高,地带性植被为常绿阔叶次生林。然而,长期以来强烈的人为干扰导致大面积常绿阔叶次生林被转换成人工林^[18]。转换后的人工林其养分循环将作何响应是关乎森林质量精准提升的重要科学问题。通过长期动态监测凋落物中速效养分(如水溶性物质)的输入是揭示森林生态系统养分循环规律的一个重要过程^[19]。目前,森林转换后不同林分凋落叶的养分输入差异已有一些探讨^[20-22],但凋落枝的水溶性养分变化尚无研究。此外,森林转换后不同林分凋落枝的水溶性物质的季节变化规律也有待揭示。其季节变化是否受到气温和降水两个气候要素的调控?这是目前亟待解决的另一关键科学问题。因为凋落枝水溶性物质的季节变化与气温和降水的耦合关系影响着下游水质安全。若凋落枝养分含量的高峰时期正值暴雨季节,将导致大量氮、磷养分输出,污染下游水质。基于此,本研究以亚热带典型的马尾松(*Pinus massoniana*)人工林、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林和米槠(*Castanopsis carlesii*)次生林为研究对象,探讨不同林分凋落枝水溶性碳、氮、磷含量和芳香化指数以及化学计量比,验证:(1)不同林分和采样季节是否对水溶性碳、氮、磷及其芳香化指数和化学计量比有显著影响?(2)若有,其季节特征是否受到气温和降水的调控?自《天然林保护修复制度方案》出台以来,我国大面积次生林的修复是未来林业工作和攻关的重点内容。本项目开展所揭示的典型次生林和人工林凋落枝水溶性养分输入的长期动态规律及其与气温和降水之间的耦合关系:一方面可为次生林的保护和修复以及人工林经营过程中森林质量的精准提升提供理论基础;另一方面亦可为预测森林生态系统养分循环对未来气候变化(温度升高和降水改变)的响应规律提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地设在福建省三明森林生态系统与全球变化国家野外科学研究所陈大观测点(26°19' N, 117°36' E),区域内分布着大面积的常绿阔叶林,物种多样性丰富,属于中亚热带季风气候,具有冬冷夏热、水热同季、湿润多雨的特点,年均温 20.1 °C,年降水量 1670 mm,降雨季节主要集中在 3—8 月份。地形多低山丘陵,土壤以红壤或红黄壤为主。研究区日均气温及日降雨量如图 1。

选择该样地的马尾松、杉木人工林和米楮次生林作为研究对象, 在每个林分内选择坡向一致、坡度相似的区域建立 3 个 20 m × 20 m 的标准样方。对每个样方内胸径大于 4 cm 的活立木进行每木检尺, 对样方内所有植被(乔灌木藤)进行物种鉴定。各林分植被概况为: 米楮次生林由天然林在 20 世纪 70 年代经过强度择伐后封山育林演替形成, 主要树种及林下植被有米楮、闽粤栲(*Castanopsis fissa*)、罗浮栲(*Castanopsis fabri*)、油草(*Leptochloa chinensis*)、狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)等。杉木和马尾松人工林均为同时期次生林经过皆伐后营造的人工纯林。杉木人工林为单层林冠, 其林下植被主要以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、毛冬青(*Ilex pubescens*)、狗骨柴(*Tricalysia dubia*)为主。马尾松人工林也为单层林冠, 林下植被主要以芒萁、芒(*Miscanthus sinensis*)和蕨(*Pteridium aquilinum*)等草本为主。样地主要林分特征见表 1。

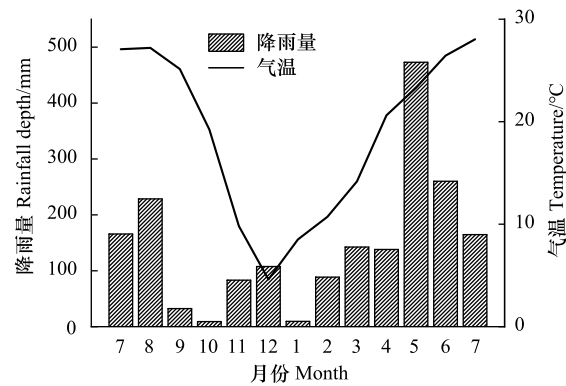


图 1 研究样地降雨量和空气温度动态
Fig.1 Dynamics of rainfall depth and temperature in the sampling site

表 1 试验地林分特征						
Table 1 Forest characters of experimental plot						
林分类型 Forest type	海拔 Altitude/m	坡度 Gradient/(°)	密度 Density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	林龄 Forest age/a
马尾松人工林 <i>Pinus massoniana</i> plantation	313	38	1433	18.78	23.46	36
杉木人工林 <i>Cunninghamia lanceolata</i> plantation	301	30	1494	19.65	18.95	36
米楮次生林 <i>Castanopsis carlesii</i> secondary forest	330	35	3788	12.2	10.8	36

1.2 样品收集

在马尾松人工林、杉木人工林和米楮次生林每个样方内随机放置 5 个 0.7 m × 0.7 m 的尼龙网质凋落物收集框(孔径为 1 mm, 距离地面 0.5 m)。收集树木在自然状态下产生的凋落物, 从中挑取凋落枝, 称鲜重后, 于 60 ℃烘箱中烘干至恒重, 研磨, 过筛, 供测定。

1.3 凋落物水溶性有机碳、水溶性氮和磷含量的测定

测定前, 将凋落物样品在 60 ℃烘箱中烘干, 研磨, 过筛后, 精准称取 0.200 g 干样, 加入 50 mL 离心管中, 再加入 50 mL 蒸馏水, 常温下震荡 30 min, 离心, 过 0.45 μm 滤膜, 为待测液。水溶性有机碳含量采用岛津 TOC-VcPh 分析仪^[23]测定; 水溶性氮含量采用连续流动分析仪(Skalar San⁺⁺, Netherlands)测定; 水溶性磷含量采用钼锑抗比色法测定^[15]。

1.4 光谱分析

紫外可见吸光值用 UV-2450(岛津) 紫外可见光谱仪测定, 通过检验待测液 254 nm 处吸收值(Special Ultraviolet-Visible Absorption, SUVA) 来分析其芳香化程度^[24]。SUAV 也叫芳香性指标(Aromaticity Index, AI)^[25], 计算公式^[26]为: (UV254/DOC) × 100。

1.5 数据处理与分析

数据统计和分析在 SPSS 20.0 软件中完成, 相关图表采用 Origin 2021 软件绘制。采用重复测量方差(repeated measures ANOVA) 分析林分、月份以及两者之间的交互作用对凋落枝水溶性碳、氮、磷含量, 化学计量比以及芳香化指数的影响。采用回归分析气温、降水对三种林分凋落枝水溶性碳、氮、磷及芳香化指数的影响。

2 结果与分析

2.1 三种林分凋落枝水溶性碳、氮和磷含量季节动态

三种林分水溶性碳、氮和磷含量季节动态基本一致,米楮次生林凋落枝水溶性氮和磷(图2)含量表现为双峰型,第一个峰值出现在9—10月份,第二个峰值出现在5—6月份。水溶性碳(图2)含量月份波动较大,但在10月和5月份也均出现了峰值。且三种林分的凋落枝水溶性碳、氮和磷含量表现为:米楮次生林最高,杉木人工林次之,马尾松人工林最低。重复测量方差分析结果显示,林分($P<0.001$)、时间($P<0.001$)以及两者的交互作用($P<0.001$)对凋落枝水溶性碳和磷均有极显著影响。对于凋落枝水溶性氮只有林分($P<0.001$)起着显著影响作用。

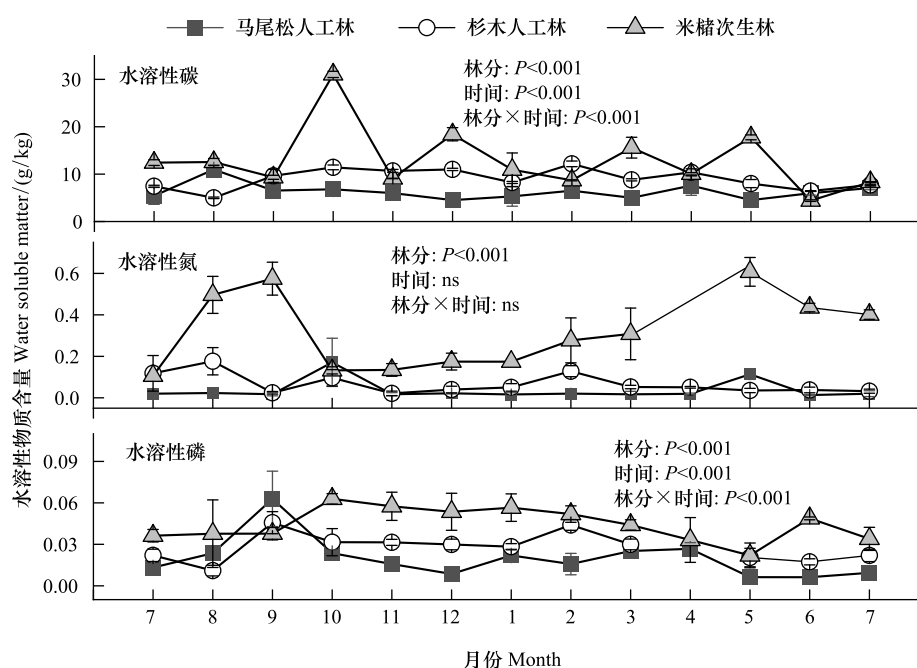


图2 米楮次生林、杉木人工林和马尾松人工林凋落枝水溶性碳、氮和磷含量季节动态(平均值±标准差)

Fig.2 Seasonal dynamics of water soluble carbon, nitrogen and phosphorus contents of twig litter in *Castanopsis carlesii* secondary forest and *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantation (mean±SD)

2.2 三种林分凋落枝水溶性碳、氮、磷比值季节动态

三种林分凋落枝的水溶性碳氮比(图3)和碳磷比(图3)的季节波动不同步。而三种林分水溶性氮磷比的季节波动较为同步(图3),三者变化趋势基本相同,出现了二次峰值。重复测量方差分析结果显示,林分、时间以及两者的交互作用对凋落枝水溶性氮磷比均有极显著($P<0.001$)影响。另外两比值只受到林分或月份单独的影响,两者间的交互作用影响均不显著($P>0.05$)。

2.3 三种林分凋落枝水溶性物质的芳香化指数动态变化

米楮次生林和杉木人工林凋落枝水溶性组分的芳香化指数最大值出现在8月,马尾松人工林最大值出现在3月。且三种林分凋落枝水溶性组分的芳香化指数大小表现为:米楮次生林高于马尾松和杉木人工林。重复测量方差分析结果显示,林分、时间以及两者的交互作用对凋落枝水溶性物质的芳香化程度均有极显著($P<0.001$)影响。

2.4 气温、降水对三种林分凋落枝水溶性碳、氮、磷及芳香化指数的影响

回归分析的结果表明气温对凋落枝水溶性碳、水溶性磷和芳香化指数均有显著影响,但是影响大小在不同林分之间有差异(图4)。气温与杉木人工林凋落枝水溶性碳浓度存在着显著负相关,而对米楮次生林和

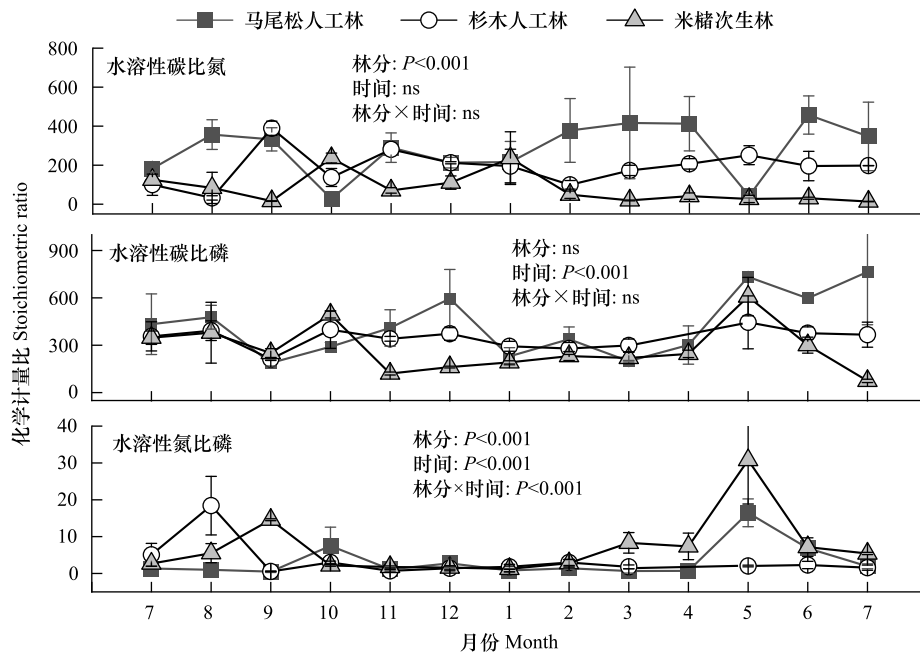


图3 米槠次生林、杉木人工林和马尾松人工林凋落枝水溶性碳、氮和磷比值季节动态

Fig.3 Seasonal dynamics of the water soluble carbon-nitrogen ratio, carbon-phosphorus ratio and nitrogen-phosphorus ratio of twig litter in *Castanopsis carlesii* secondary forest and *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantation

马尾松人工林影响不显著(图5)。气温对米槠次生林凋落物枝水溶性磷浓度有显著的负影响,但对杉木人工林和马尾松人工林影响不显著(图5)。气温与杉木人工林凋落物枝芳香化指数有显著的正相关,凋落枝水溶性氮与米槠次生林和马尾松人工林之间的关系不显著(图6)。此外,米槠次生林、杉木和马尾松人工林凋落枝的水溶性磷均与降水量呈显著的负相关,米槠次生林凋落枝水溶性氮与降水量呈显著正相关(图6)。其他指标与降水之间的关系不显著。

3 讨论与结论

本研究中不同林分凋落枝水溶性物质含量变化总体呈现为:次生林凋落枝的水溶性碳、氮和磷含量最高,而马尾松人工林的最低,杉木人工林介于二者之间。这种规律的出现可能与影响凋落枝水溶性物质含量的三方面因素密切相关。首先,不同树种凋落枝之间的全量养分有明显差异。本例中的杉木和马尾松均为人工纯林,次生林主要树种为米槠、闽粤栲和木荷等阔叶树^[27]。之前的结果也的确证实米槠次生林凋落枝全量氮、磷含量成倍于杉木和马尾松人工林^[28]。虽然少有研究直接比较过阔叶树和针叶树水溶性物质的含量差异,但是植物组织某种水溶性养分含量与其在植物体内全量养分高度线性相关^[29],由此亦可推测杉木和马尾松凋落枝的水溶性物质含量应该低于阔叶树,以上可能是杉木和马尾松人工林凋落枝水溶性物质含量低的重要原因。其次,不同树种的生物学规律的差异也会导致凋落枝水溶性物质含量差异。相比其他树种,马尾松具

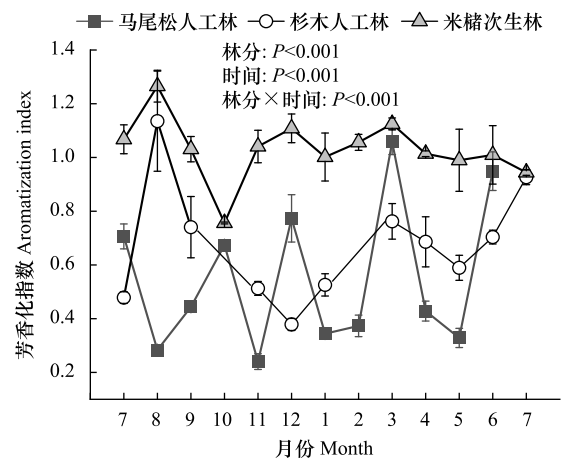


图4 米槠次生林、杉木人工林和马尾松人工林凋落枝水溶性物质的芳香化指数动态

Fig.4 The aromaticity index dynamics of twig litter in *Castanopsis carlesii* secondary forest and *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantation

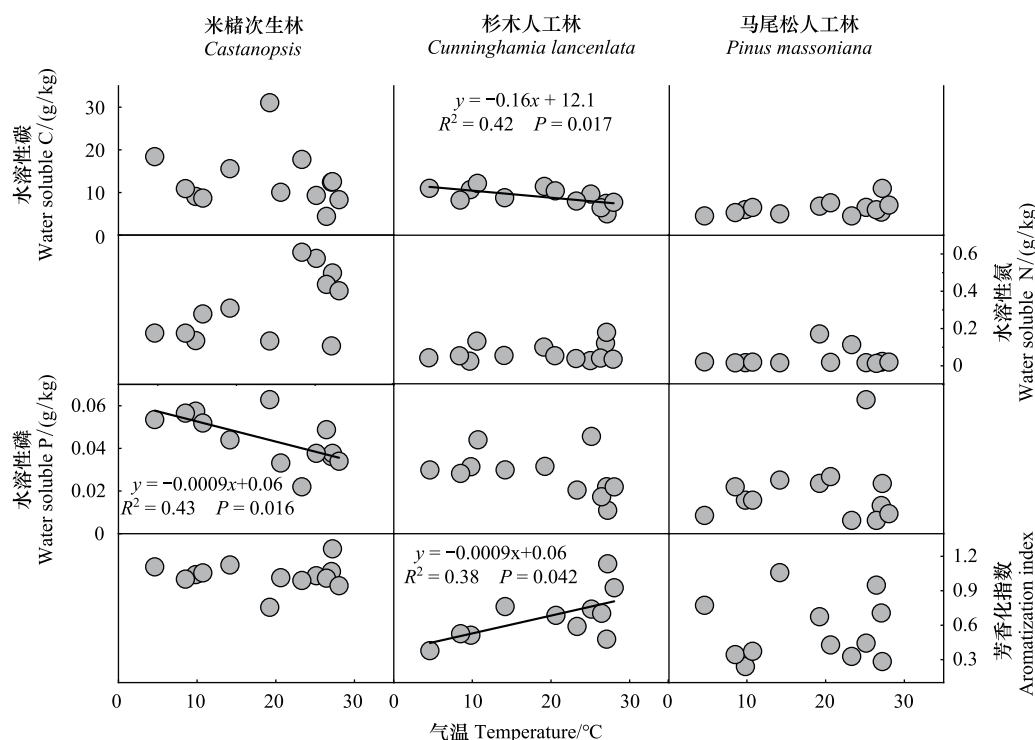


图5 气温对米槠次生林、杉木人工林和马尾松人工林凋落枝水溶性碳、氮、磷含量及芳香化指数的影响

Fig.5 Effects of temperature on water soluble carbon, nitrogen, phosphorus contents and aromatization index of twig litter in *Castanopsis carlesii* secondary forest and *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantation

有更耐瘠薄的特性^[30], 马尾松枝和叶在凋落之前会完成养分的内转移和重吸收以减少植物体养分的损失^[31-32]。杉木也具有较好的养分重吸收功能, 20—25年生杉木利用枝叶枯死前迁移的养分生产的生物量占总生产生物量的比例可高达17%^[33]。虽然阔叶树也具有养分重吸收的特点^[34], 但是针叶树的养分重吸收率要远远大于阔叶树^[35]。被植物体重吸收的养分往往是流动性强的水溶性组分。上述机制可能是导致杉木和马尾松人工林凋落枝的水溶性氮和磷含量一直较低的又一原因。第三, 杉木凋落枝和叶具有宿存的特点^[36]。杉木枝在枯死后不会立刻凋落, 可挂在树干上长达4年之久^[37]。凋落枝宿存在树干上经过长期的养分重吸收和降雨淋洗, 凋落之后体内的水溶性物质含量可能已经很低。这可能是导致本研究中杉木凋落枝中水溶性物质含量低于阔叶树的另一个重要原因。

本例中米槠次生林凋落枝水溶性物质芳香化指数要显著高于杉木和马尾松人工林, 吕茂奎^[38]的研究发现米槠次生林穿透雨的芳香化指数高于杉木人工林, 佐证了本文的研究结果。凋落枝水溶性物质芳香化指数在不同林分之间的变化规律与水溶性碳相似, 因为凋落物溶液中的芳香族物质主要是酚类物质, 而酚类物质含量与水溶性碳含量显著正相关^[39]。

本研究结果表明米槠次生林、杉木和马尾松人工林凋落枝的水溶性物质的数量和组成存在明显的季节变化特征, 其季节变化受到气候要素的调控。杉木人工林凋落枝水溶性碳、米槠次生林水溶性磷与气温都呈显著负相关。本研究区气温最高出现在7、8月份, 而此时三种林分凋落物枝的生产量也最低^[28]。表明极端高温时植物活动停滞, 且极端高温也会抑制土壤微生物对养分的矿化, 从而抑制植物对养分的吸收, 降低枝和叶的养分含量^[40-41], 这可能导致了凋落枝的水溶性养分的降低。而在较高温时期, 林木生长迅速, 植物体内的水溶性养分被快速用于各种生物合成和代谢^[42], 植物体的快速生长导致组织内的养分被大幅“稀释”^[43-44], 因而在夏季较高温时期凋落枝水溶性养分可能较低。此外, 全球大区域研究的结果显示植物氮磷养分含量与年均温呈负相关关系^[45], 亦有多项增温实验表明温度增加会降低植物碳、氮、磷含量^[46]。以上结果和证据都能

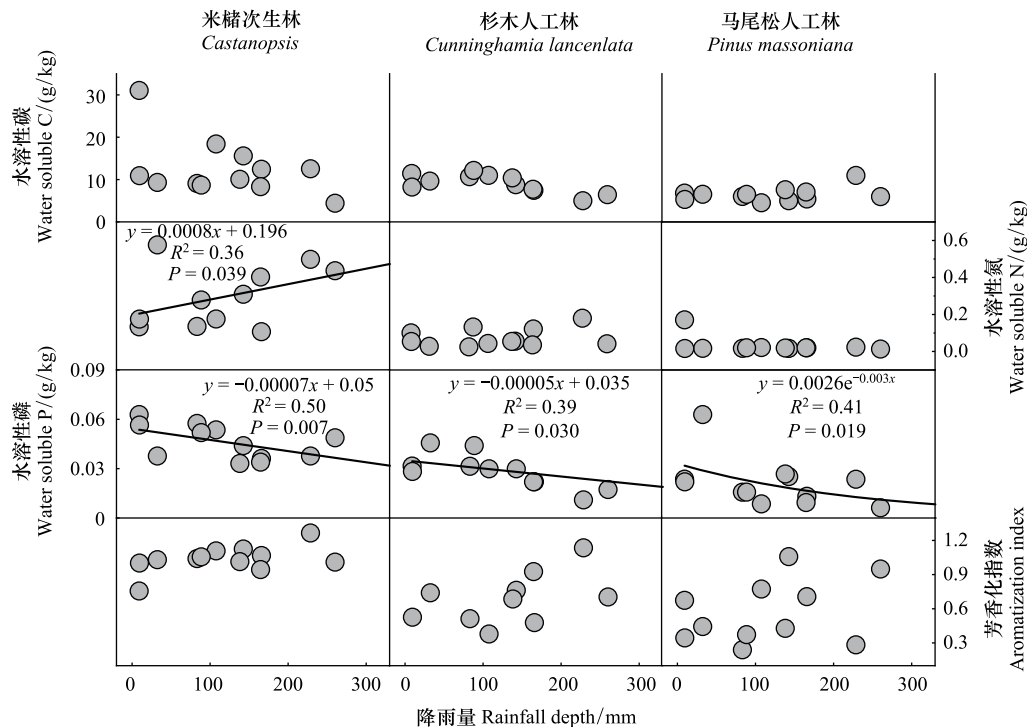


图 6 降雨量对中亚热带三种林分凋落枝水溶性碳、氮、磷含量及芳香化指数的影响

Fig. 6 Effects of rainfall depth on water soluble carbon, nitrogen, phosphorus contents and aromatization index of twig litter in *Castanopsis carlesii* secondary forest and *Cunninghamia lanceolata* and *Pinus massoniana* plantation

解释本例中气温和凋落枝水溶性物质之间的负相关关系。我国亚热带地区雨、热相对同步,不同林分型凋落枝的水溶性物质的含量与气温和水分的关系较为相似,米槠次生林、杉木和马尾松人工林凋落枝的水溶性磷均与降水量显著负相关。凋落枝中的磷大部分为水溶性,因而在多雨时期凋落枝的水溶性磷很容易被淋洗损失。雨季时期,枝条在枯死之后、凋落之前其水溶性磷含量因为被大量淋溶而变得很低。这也许能解释凋落枝水溶性磷与降雨量之间的负相关关系。

本研究结果表明米槠次生林凋落枝的水溶性碳、氮、磷含量在各个季节均高于杉木和马尾松人工林,因而养分归还量大、循环快,这构成了米槠次生林生产力高的重要基础。因此未来森林经营过程中应加大次生林的保护和修复力度,而进行人工林经营时宜多营造养分含量高、归还快的阔叶混交林。三种不同林分类型凋落枝水溶性养分都随气温和降雨的增加而降低,水溶性养分浓度高峰期出现在干冷的秋冬季节,这种生物学规律利于凋落枝的养分在非生长季保存,以备生长季来临时供微生物和植物利用。在未来气候变暖背景下,亚热带森林通过凋落枝归还给土壤的养分浓度将减少。

参考文献 (References):

- [1] Liao J H, Wang H H, Tsai C C, Hseu Z Y. Litter production, decomposition and nutrient return of uplifted coral reef tropical forest. *Forest Ecology and Management*, 2006, 235(1/3): 174-185.
- [2] 林波, 刘庆, 吴彦, 何海. 森林凋落物研究进展. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 60-64.
- [3] Bjorn B, Charles M. *Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration*. Heidelberg: Springer-Verlag, 2004.
- [4] Kalbitz K, Solinger S, Park J H, Michalzik B, Matzner E. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: A review. *Soil Science*, 2000, 165(4): 277-304.
- [5] Bárta J, Melichová T, Vaněk D, Pícek T, Šantrůčková H. Effect of pH and dissolved organic matter on the abundance of nirk and nirs denitrifiers in spruce forest soil. *Biogeochemistry*, 2010, 101(1/3): 123-132.
- [6] Roth V N, Lange M, Simon C, Hertkorn N, Bucher S, Goodall T, Griffiths R I, Mellado-Vázquez P G, Mommer L, Oram N J, Weigelt A,

- Dittmar T, Gleixner G. Persistence of dissolved organic matter explained by molecular changes during its passage through soil. *Nature Geoscience*, 2019, 12(9): 755-761.
- [7] Iqbal J, Hu R G, Feng M L, Lin S, Malghani S, Ali I M. Microbial biomass, and dissolved organic carbon and nitrogen strongly affect soil respiration in different land uses: A case study at three gorges reservoir area, South China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 137(3/4): 294-307.
- [8] Deng Q, Zhang D Q, Han X, Chu G W, Zhang Q F, Hui D F. Changing rainfall frequency rather than drought rapidly alters annual soil respiration in a tropical forest. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 121: 8-15.
- [9] Lladó S, López-Mondéjar R, Baldrian P. Drivers of microbial community structure in forest soils. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2018, 102(10): 4331-4338.
- [10] Lladó S, López-Mondéjar R, Baldrian P. Forest soil bacteria: Diversity, involvement in ecosystem processes, and response to global change. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2017, 81(2): e00063-16.
- [11] You Y Y, Xiang W H, Ouyang S, Zhao Z H, Chen L, Zeng Y L, Lei P F, Deng X W, Wang J R, Wang K L. Hydrological fluxes of dissolved organic carbon and total dissolved nitrogen in subtropical forests at three restoration stages in southern china. *Journal of Hydrology*, 2020, 583: 124656.
- [12] Cleveland C C, Neff J C, Townsend A R, Hood E. Composition, dynamics, and fate of leached dissolved organic matter in terrestrial ecosystems: Results from a decomposition experiment. *Ecosystems*, 2004, 7(3): 175-285.
- [13] 袁吉, 黄美玉, 麦淑媛, 吴福忠, 杨万勤, 岳楷, 游成铭, 温娅檬, 蒋龙. 华西雨屏区麻栎人工混交林凋落物水溶性碳、氮、磷含量及化学计量比随物候节律的变化特征. *生态学杂志*, 2019, 38(2): 376-383.
- [14] 刘博文, 张丽, 吴福忠, 倪祥银, 徐振锋, 谭波, 岳楷. 高寒森林不同生境凋落叶分解过程中水溶性组分动态特征. *生态学杂志*, 2020, 39(4): 1130-1140.
- [15] Zhang Y, Yang J P, Yang W Q, Tan B, Fu C K, Wu F Z. Climate, plant organs and species control dissolved nitrogen and phosphorus in fresh litter in a subalpine forest on the eastern Tibetan Plateau. *Annals of Forest Science*, 2018, 75(2): 51.
- [16] Souto X C, Gonzales L, Reigosa M J. Comparative analysis of allelopathic effects produced by four forestry species during decomposition process in their soils in Galicia (NW Spain). *Journal of Chemical Ecology*, 1994, 20(11): 3005-3015.
- [17] 郑兴蕊, 宋娅丽, 王克勤, 张雨鉴, 潘禹. 滇中常绿阔叶林凋落物养分释放及生态化学计量特征对模拟 N 沉降的响应. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 23-30.
- [18] 刘翥, 杨玉盛, 朱锦懋, 谢锦升, 司友涛. 中亚热带森林转换对土壤可溶性有机质数量与光谱学特征的影响. *生态学报*, 2015, 35(19): 6288-6297.
- [19] Wood T E, Lawrence D, Clark D A. Variation in leaf litter nutrients of a costa Rican rain forest is related to precipitation. *Biogeochemistry*, 2005, 73(2): 417-437.
- [20] Zhu X A, Liu W J, Chen H, Deng Y, Chen C F, Zeng H H. Effects of forest transition on litterfall, standing litter and related nutrient returns: Implications for forest management in tropical china. *Geoderma*, 2019, 333: 123-134.
- [21] Wang Q K, Wang S L, Xu G B, Fan B. Conversion of secondary broadleaved forest into Chinese fir plantation alters litter production and potential nutrient returns. *Plant Ecology*, 2010, 209(2): 269-278.
- [22] Carnol M, Bazgir M. Nutrient return to the forest floor through litter and throughfall under 7 forest species after conversion from Norway spruce. *Forest Ecology and Management*, 2013, 309: 66-75.
- [23] Liang B C, MacKenzie A F, Schnitzer M, Monreal C M, Voroney P R, Beyaert R P. Management-induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils. *Biology and Fertility of Soils*, 1998, 26(2): 88-94.
- [24] Saadi I, Borisover M, Armon R, Laor Y. Monitoring of effluent DOM biodegradation using fluorescence, UV and DOC measurements. *Chemosphere*, 2006, 63(3): 530-539.
- [25] Akagi J, Zsolnay Á, Bastida F. Quantity and spectroscopic properties of soil dissolved organic matter (DOM) as a function of soil sample treatments: Air-drying and pre-incubation. *Chemosphere*, 2007, 69(7): 1040-1046.
- [26] Xie J K, Wang D S, Leeuwen J V, Zhao M Y, Xing L N, Chow C W K. pH modeling for maximum dissolved organic matter removal by enhanced coagulation. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(2): 276-283.
- [27] 胥超, 林成芳, 刘小飞, 熊德成, 林伟盛, 陈仕东, 谢锦升, 杨玉盛. 森林转换对地表径流可溶性有机碳输出浓度和通量的影响. *生态学报*, 2017, 37(1): 84-92.
- [28] 刘强. 中亚热带不同更新方式森林凋落物数量及养分动态[D]. 福州: 福建师范大学, 2012.
- [29] Takashima T, Hikosaka K, Hirose T. Photosynthesis or persistence: nitrogen allocation in leaves of evergreen and deciduous *Quercus* species. *Plant, Cell & Environment*, 2004, 27(8): 1047-1054.

- [30] 秦国峰, 荣文琛, 洪炜. 马尾松人工幼林施肥效应的研究. 林业科学, 1999, 35(S1): 113-118.
- [31] 张秋芳, 谢锦升, 陈奶寿, 陈坦, 吕茂奎, 张浩, 杨玉盛. 生态恢复对马尾松叶片化学计量及氮磷转移的影响. 生态学报, 2017, 37(1): 267-276.
- [32] 李荣华, 汪思龙, 王清奎. 不同林龄马尾松针叶凋落前后养分含量及回收特征. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1443-1447.
- [33] 吕中诚, 康文星, 黄志宏, 赵仲辉, 邓湘雯. 不同林龄杉木组织迁移养分的再利用. 植物生态学报, 2019, 43(5): 458-470.
- [34] 薛立, 徐燕, 吴敏, 李燕. 4 种阔叶树种叶中氮和磷的季节动态及其转移(英文). 生态学报, 2005, 25(3): 520-526.
- [35] Vitousek P. Nutrient cycling and nutrient use efficiency. The American Naturalist, 1982, 119(4): 553-572.
- [36] 张家城, 盛炜彤. 杉木人工林树上宿存枯死枝、叶在冠层与在枯枝落叶层分解的比较研究. 林业科学, 2001, 37(6): 2-10.
- [37] 盛炜彤, 范少辉. 杉木及其人工林自身特性对长期立地生产力的影响. 林业科学研究, 2002, 15(6): 629-636.
- [38] 吕茂奎, 谢锦升, 江淼华, 罗水金, 曾少娟, 纪淑蓉, 万菁娟, 杨玉盛. 米槎常绿阔叶次生林和杉木人工林穿透雨和树干径流可溶性有机质浓度和质量的比较. 应用生态学报, 2014, 25(8): 2201-2208.
- [39] Uselman S M, Qualls R G, Lilienfein J. Quality of soluble organic C, N, and P produced by different types and species of litter: Root litter versus leaf litter. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 54: 57-67.
- [40] Gerdol R, Marchesini R, Iacumin P. Bedrock geology interacts with altitude in affecting leaf growth and foliar nutrient status of mountain vascular plants. Journal of Plant Ecology, 2017, 10(5): 839-850.
- [41] Sardans J, Peñuelas J. Drought decreases soil enzyme activity in a Mediterranean *Quercus ilex* L. forest. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(3): 455-461.
- [42] Overdieck D, Ziche D, Böttcher-Jungclaus K. Temperature responses of growth and wood anatomy in European beech saplings grown in different carbon dioxide concentrations. Tree Physiology, 2007, 27(2): 261-268.
- [43] Gargallo-Garriga A, Sardans J, Pérez-Trujillo M, Oravec M, Urban O, Jentsch A, Kreyling J, Beierkuhnlein C, Parella T, Peñuelas J. Warming differentially influences the effects of drought on stoichiometry and metabolomics in shoots and roots. New Phytologist, 2015, 207(3): 591-603.
- [44] Gonzalez-Meler M A, Silva L B, Dias-De-Oliveira E, Flower C E, Martinez C A. Experimental air warming of a *stylosanthes capitata*, Vogel dominated tropical pasture affects soil respiration and nitrogen dynamics. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 46.
- [45] Reich P B, Oleksyn J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101(30): 11001-11006.
- [46] Lie Z Y, Huang W J, Liu X J, Zhou G Y, Yan J H, Li Y L, Huang C M, Wu T, Fang X, Zhao M D, Liu S Z, Chu G W, Kadowaki K, Pan X P, Liu J X. Warming leads to more closed nitrogen cycling in nitrogen-rich tropical forests. Global Change Biology, 2021, 27(3): 664-674.