

亚热带山地森林源头溪流米楮凋落叶分解的水溶性碳氮磷动态

郑旭灵¹, 魏文涛¹, 张潇月¹, 岳楷^{1,2}, 吴福忠^{1,2}

(1. 福建师范大学湿润亚热带生态—地理过程教育部重点实验室, 福州 350007;

2. 福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站, 福建 三明 365002)

摘要: 以亚热带常绿阔叶林建群种米楮(*Castanopsis carlesii*)凋落叶为研究对象, 对照地表环境, 研究了溪流和间歇性溪流凋落叶分解过程中水溶性有机碳、氮、磷含量变化及其累积损失特征。结果表明: (1) 3 种生境中凋落叶水溶性有机碳的含量在分解过程中均表现出逐渐降低的趋势, 但在溪流中降低程度最大, 损失率达 92.18%; 水溶性氮含量在溪流和间歇性溪流释放时间提前, 其变化程度相对较小; 相比于地表和间歇性溪流, 溪流中的凋落叶水溶性磷含量在分解过程中持续降低, 损失率达 86.75%。(2) 相对于地表, 溪流和间歇性溪流显著促进了凋落叶中的水溶性有机碳、氮、磷的释放速率, 表明源头溪流持续流动的水体促进凋落叶水溶性组分的释放。(3) 尽管 3 种生境中凋落叶水溶性有机碳、氮、磷元素的损失率共同受到温度、降水、环境中营养元素含量的影响, 但源头溪流持续流动的水流和间歇性溪流频繁的干湿交替促进凋落叶水溶性组分的释放。研究结果为揭示亚热带山地森林凋落叶分解过程中水溶性碳氮磷在不同生境中的释放动态提供基础数据。

关键词: 凋落物分解; 不同生境; 水溶性碳氮磷; 化学计量比

中图分类号: S718.53

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0309-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.037

Dynamics of Water-Soluble Carbon, Nitrogen and Phosphorus Content During Litter Decomposition of *Castanopsis carlesii* in Headwaters of Subtropical Mountain Forest

ZHENG Xuling¹, WEI Wentao¹, ZHANG Xiaoyue¹, YUE Kai^{1,2}, WU Fuzhong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Humid Subtropical Ecology-Geographic Processes of Ministry of Education, Fujian Normal University, Fuzhou 350007; 2. Fujian Sanming Forest Ecosystem National Research Station, Sanming, Fujian, 365002)

Abstract: Taking the litter of *Castanopsis carlesii* foliar, a constructive species of subtropical evergreen broad-leaved forest, as the research object, compared with the forest surface environment, a field study was conducted to understand the content changes and loss characteristics of water-soluble organic carbon, nitrogen and phosphorus during the decomposition of *C. carlesii* foliar litter in streams and intermittent streams. The results showed that: (1) In the three habitats, the water-soluble organic carbon of litter decreased continuously in the decomposition process, but the most loss was detected in the streams with a loss property of 92.18%. In contrast, the release time of water-soluble nitrogen in streams and intermittent streams were earlier and the changes were relatively small. Compared with the forest floor and intermittent streams, the content of water-soluble phosphorus in litter decreased continuously in streams with the loss ratio of 86.75% during the whole decomposition process. (2) Compared with the forest floor, both streams and intermittent streams significantly promoted the release rates of water-soluble organic carbon, nitrogen and phosphorus in litter, indicating that the continuous water flow could promote the release of water-soluble components during litter decomposition. (3) Although the loss rate of water-soluble organic carbon, nitrogen and phosphorus in litter were jointly affected by temperature, precipitation and the content of nutrient elements in the three habitats, the continuous water flow in head water streams and the frequent alternation of dry/wet in intermittent streams promoted the release of water-soluble components in the litter. The

收稿日期: 2022-03-10

资助项目: 国家自然科学基金项目(32171641, 31922052)

第一作者: 郑旭灵(2000—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事森林生态研究。E-mail: zxling2022@163.com

通信作者: 吴福忠(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事森林土壤学、森林生态学研究。E-mail: wufzchina@163.com

results provide some basic data for revealing the decomposition dynamics of water-soluble components in the litter of different habitats in subtropical mountain forests.

Keywords: litter decomposition; different habitats; water-soluble carbon; nitrogen and phosphorus; stoichiometric ratio

源头溪流是森林的重要组成部分^[1],是生态系统养分输出及其与下游水域系统信息交流的关键纽带^[2]。除长期持续流水的溪流外,受季节性降水和地形地貌的影响,森林地表往往分布有丰富的间歇性溪流,仅在 1 年中的特定时间持续流动(通常持续数周至数月)^[3],被认为是最具活力、复杂性和多样性的系统之一^[4],可通过干湿交替,在保留、转化和转移碳、营养物质和颗粒物的生物地球化学循环中发挥重要作用^[5]。森林凋落物的输入和分解为消费者和分解者提供必要的碳源和氮磷等养分,是溪流异养生物的重要物质和能量来源^[6],同时也为下游水体输入营养物质和能量^[7]。水溶性物质的大量损失是凋落叶分解初期的主要特征^[8]。相对于地表,凋落物水溶性物质在溪流中释放受到独特的环境因素调控,如相对稳定的水体温度、低氧、充足的水源供应、持续强烈的水体冲刷作用等^[9],而间歇性溪流的干湿交替作用可能显著促进凋落物水溶性物质释放^[10]。然而,已有研究极少关注溪流和间歇性溪流凋落叶分解过程水溶性组分变化,极大地限制了对森林—水体复合系统中物质迁移和循环过程的全面认识。

我国南方地区水热丰沛,孕育着全球最大的湿润亚热带山地森林,物质循环快,生物多样性丰富,生产力高,被认为是北回归线上荒漠带上的“绿洲”。山岭沟壑间隐藏着密集的源头溪流,森林地表在降雨季节分布有丰富的间歇性溪流。受地形因素影响,亚热带山地森林坡度陡峭,沟谷幽深,源头溪流纵比降大,且夏季雨量充沛,坡面径流量大,冲刷作用较强,大量森林凋落物集聚到间歇性溪流和溪流中,成为森林生态系统物质迁移和循环的重要组成部分。凋落物中的水溶性氮、磷在淋溶作用下直接输入生态系统中,提高环境中有效养分含量^[8],水溶性组分的释放是表征凋落物分解的关键前端过程,在间歇性溪流和溪流中可能具有更为重要的意义,但缺乏必要的认识。2010—2019 年,研究区域天然常绿阔叶林的米楮凋落叶平均占凋落物总量的 27.8%^[11]。因此,以亚热带森林建群树种米楮(*Castanopsis carlesii*)凋落叶为研究对象,采用凋落物分解袋法,研究地表、间歇性溪流、溪流凋落叶分解过程中水溶性有机碳(water soluble organic carbon, WSOC)、水溶性氮(water soluble nitrogen, WSN)、水溶性磷(water soluble phosphorus, WSP)含量的动态变化与释放特征,以

期为全面认识亚热带山地森林生态系统物质迁移与循环过程提供新的思路 and 基础数据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究样地选择在福建三明森林生态系统国家野外科学观测研究站(26°19'N,117°36'E),该地区属于典型的中亚热带季风气候,具有夏热冬温、四季分明、雨热同期的特点,年平均气温 19.3 ℃,年平均降水量为 1 610 mm,降水多集中在 3—8 月。山地地形陡峭,平均海拔 300 m,沟谷广布,孕育着丰富的源头溪流和间歇性溪流,水源丰富,土壤以红壤或红黄壤为主。地带性植被为亚热带常绿阔叶林,优势树种为米楮,乔木层主要有米楮(*Castanopsis carlesii*)、木荷(*Schima superba*)等;灌木层主要有山茶(*Camellia japonica*)、金银花(*Lonicera japonica*)等;草本层主要有黑莎草(*Gahnia tristis*)、油草(*Leptochloa chinensis*)、芒萁(*Dicranopetris dichotoma*)等。研究期间平均气温及降水量见图 1。

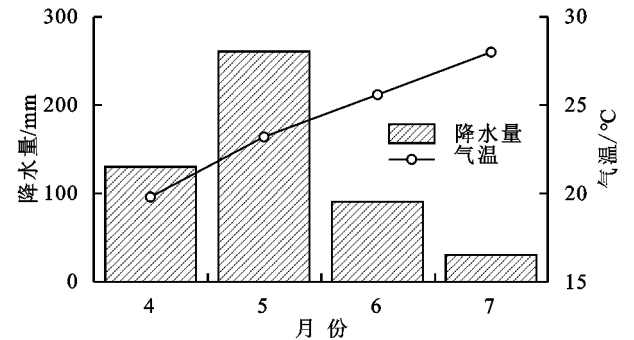


图 1 研究区空气温度和降水量动态

1.2 样地设置与样品埋设

于 2021 年 1 月初收集新鲜的米楮凋落叶,带回实验室自然风干。称取 9 份米楮凋落叶风干样 10.00 g,于 65 ℃ 的烘箱中烘干至质量恒定,由此计算出风干样和烘干样含水率的转换系数,研磨过 60 目筛后测定其初始化学质量指标。称取相当于烘干重 10.00 g 的风干凋落叶装入孔径为 1 mm 凋落物尼龙网袋(20 cm×20 cm)中。2021 年 3 月,在研究区域选择以米楮为建群种的典型常绿阔叶林,在林下地表设置 3 个样地作为 3 个重复,每个样地设置 3 个 3 m×3 m 的均质样方,每个样方之间距离 100 m,避免相互干扰,并除去样方内土壤表层的植物和凋落物,将凋落袋平铺于地表。随机选择环境条件基本一致、相距较远且自然凋落物较为集中,具有代表性的 3 条间歇

性溪流和 1 条森林溪流作为样点放置凋落叶袋。将放置于间歇性溪流(3 月 31 日至 4 月 3 日、4 月 8—11 日、4 月 14 日至 7 月 7 日、7 月 23—24 日期间,合计 93 天有水流;4 月—7 日、4 月 12—13 日、7 月 8—22 日期间,合计 21 天为无流水状态)的凋落叶袋通过安全绳固定于样带内的灌木主枝根部,以防冲刷脱落。从森林溪流上游向下随机选取 3 个点,作为 3 个重复,每个样点两两相距 1~2 km,将系有凋落叶袋的安全绳放置于溪流水体的中央,与自然条件下凋落叶分布相似,可随水体流动而涨落,安全绳固定于样带内的高大树木主根根部^[12]。

1.3 凋落叶采集与室内处理

放置样品后每月(2021 年 4—7 月)采集 1 次凋落叶袋,每次在不同生境随机采集凋落叶袋各 3 袋,由于第 5 个月溪流中凋落叶已全部分解,故只获得了 4 个月数据。将采集的凋落叶带回室内清除泥土和杂物,于 65℃ 的烘箱中烘干至恒重后粉碎,过 60 目筛,待测。

1.4 水溶性有机碳、氮、磷含量的测定

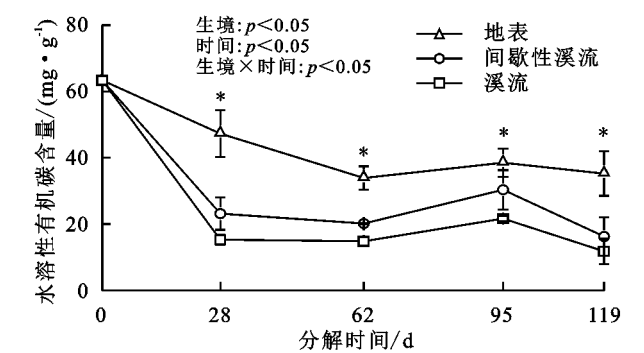
准确称取 0.500 g 干样,加入 150 mL 的锥形瓶中,加入 50 mL 蒸馏水,常温下振荡 60 min,并过 0.45 μm 滤膜,即为待测液,将待测液放置于生化培养箱中(4℃)保存用以分析。水溶性有机碳含量采用 TOC 分析仪(TOC-V CPH Shimadzu, Japan)测定^[13];水溶性氮含量采用连续流动分析仪(Skalar San⁺⁺, Netherlands)测定;水溶性磷含量采用钼锑抗比色法测定^[14]。

1.5 数据处理与分析

1.5.1 元素累积质量损失率计算 不同生境下米楮凋落叶在不同分解时间水溶性有机碳、氮、磷残留量的计算公式为:

$$M' = M_t \times C_t \tag{1}$$

式中: M_t 为第 t 次采样凋落叶剩余干重质量(g); C_t



注: * 表示同一月份不同生境之间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 水溶性氮

生境、分解时间及其交互作用显著影响米楮凋落叶分解过程中水溶性氮含量动态($p < 0.05$)。在分解

为第 t 次采样元素浓度(mg/g)($t = 1, 2, 3, 4$)。

凋落叶分解过程中各元素到不同分解时间的累积损失率计算公式为^[15]:

$$R_2 = (M'_0 - M'_t) / M'_0 \times 100\% \tag{2}$$

式中: M'_0 为凋落叶初始样中元素剩余质量(g); M'_t 为第 t 次采样凋落叶中元素剩余质量(mg)($t = 1, 2, 3, 4$)。

1.5.2 数据分析 采用 SPSS 21.0 软件对数据进行统计分析,采用 Origin 2021 软件绘图。采用重复测量方差(Repeated measures ANOVA)分析生境、分解时间以及两者的交互作用分别对米楮凋落叶水溶性有机碳、氮、磷含量及其化学计量比和累积质量损失率的影响,显著性水平设定为 $p = 0.05$ 。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较水溶性有机碳、氮、磷在同一分解时间不同生境下的差异。采用 Spearman 相关分析检验凋落叶水溶性有机碳、氮、磷含量、累积质量损失率及化学计量比与环境因子的相关性。

2 结果与分析

2.1 水溶性有机碳

由图 2 可以看出,在凋落叶分解过程中,水溶性有机碳含量在不同生境下表现出相似的动态特征,均呈明显下降趋势,但在不同生境、分解时间以及两者的交互作用下,其下降程度存在显著差异($p < 0.05$),水溶性有机碳含量整体表现为溪流<间歇性溪流<地表。随着凋落叶的分解,3 种生境下凋落叶水溶性有机碳累积质量损失率均持续增加,但在同一分解时间不同生境中存在显著差异($p < 0.05$),在溪流中释放最快,间歇性溪流次之,地表最慢。在分解前 28 天,溪流与间歇性溪流中的凋落叶水溶性有机碳大量释放,累积损失率分别达 79.01%,69.00%。经 4 个月的分解,凋落叶水溶性有机碳在不同生境中损失 71.90%~92.18%,但在溪流和间歇性溪流中分解的速率相对于地表更为迅速。

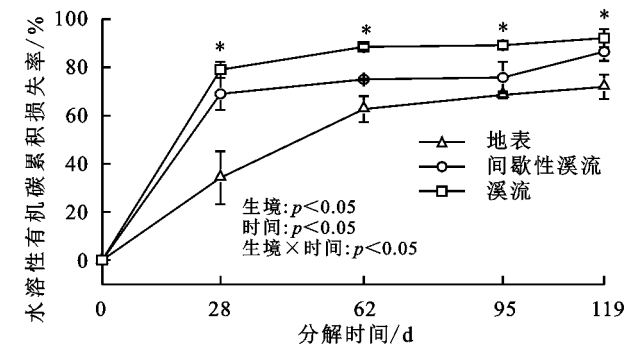


图 2 米楮凋落叶水溶性有机碳含量及其累积损失率随分解时间的动态特征

过程中凋落物水溶性氮含量整体表现为地表>间歇性溪流>溪流。在分解前 62 天,3 个生境中凋落叶水溶性氮含量均表现为持续升高,但溪流和间歇

性溪流降低的时间明显提前,表现为在分解 62~95 天时,地表持续升高而溪流和间歇性溪流均呈降低的趋势。经 4 个月的分解,凋落叶水溶性氮累积质量损失在不同生境中存在显著差异($p<0.05$)。尽管地表和溪流均表现出富集—释放的模式,但溪流中的水溶性氮富集时间更短,且富集程度远低于地表。同

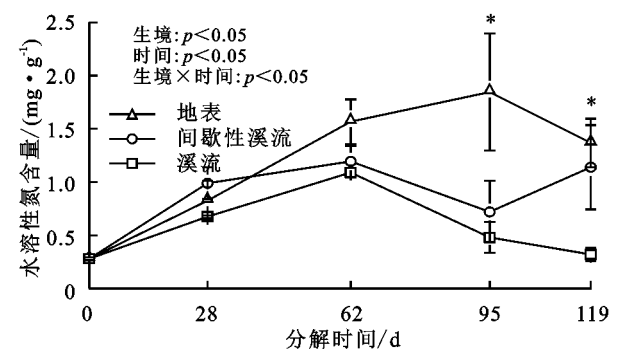
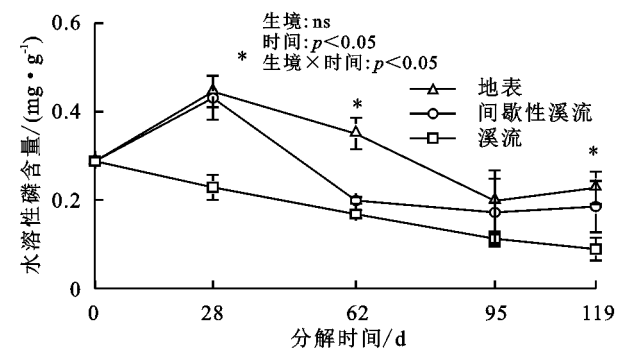


图 3 米槠凋落叶水溶性氮含量及其累积损失率随分解时间的动态特征

2.3 水溶性磷

经 4 个月的分解,凋落叶水溶性磷含量在溪流中持续降低,而地表和间歇性溪流在分解前 28 天升高,在分解 28~95 天不断降低,整个分解过程中凋落物水溶性磷含量均表现为地表>间歇性溪流>溪流(图 4)。生境、分解时间对米槠凋落叶水溶性磷累积质量损失率有显



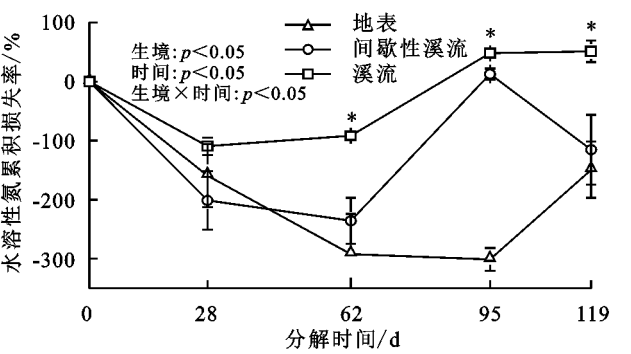
注: * 表示同一月份不同生境之间差异显著($p<0.05$); ns 表示同一月份不同生境之间差异不显著($p>0.05$)。下同。

图 4 米槠凋落叶水溶性磷含量及其累积损失率随分解时间的动态特征

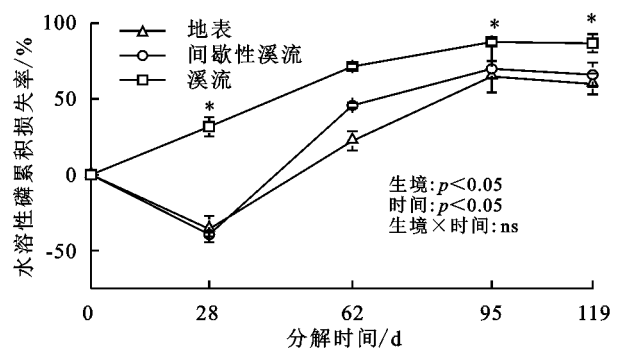
2.4 水溶性有机碳、氮磷化学计量比

生境对凋落叶 WSN/WSP 具有显著影响($p<0.05$),但对凋落叶 WSOC/WSN 和 WSOC/WSP 无显著影响。3 种生境 WSOC/WSN 在分解前 28 天迅速减小,分解 28~119 天波动较小。WSOC/WSP 在分解前 28 天迅速减小,在分解 28~95 天,3 种生境均不断增大且溪流最大,为 194.70。WSOC/WSN 和 WSOC/WSP 均在分解前 28 天大幅减小,表现出和水溶性有机碳在分解前 28 天大幅释放的一致性(图 2、图 5)。在分解过程中,溪流凋落叶 WSN/WSP 表现为分解前 62 天不断增大,在分解 62~119 天持续减小,间歇性溪流在分解前 62 天、95~119 天均表现增大的趋势,在分解 62~95 天减小。虽在 3 种生境中,WSN/WSP 在分解前 62 天都增大,但增大程度存在差别,表现为溪流>间歇性溪

时,在凋落叶分解 62~119 天水溶性氮在溪流中持续释放,释放程度大于地表。相对于地表和溪流,间歇性溪流中凋落物水溶性氮含量表现为富集—释放—富集的趋势,其释放程度介于地表和溪流之间。凋落叶水溶性氮释放率整体表现为溪流>间歇性溪流>地表(图 3)。



著影响($p<0.05$)。在不同生境下,凋落叶水溶性磷累积质量损失率表现为溪流>间歇性溪流>地表,损失率分别为 86.75%,65.98%,59.91%(图 4)。虽然地表和间歇性溪流的水溶性磷损失率的动态特征相似,但间歇性溪流中释放程度明显大于地表。与其他 2 种生境相比,溪流中水溶性磷持续释放,累积质量损失率不断增大。



流>地表;且相比于地表,WSN/WSP 在间歇性溪流和溪流中减小的时间明显提前。

3 讨论

凋落叶水溶性组分在分解过程中的动态是森林生态系统物质和能量流动的重要内容,亦是森林与水体碳和养分元素间生态联系的重要载体^[16]。本研究发现,溪流持续流动的水体和间歇性溪流明显的干湿交替均显著促进凋落叶水溶性有机碳和氮磷养分的释放。在 3 种生境中,水溶性有机碳均持续释放,且表现为溪流>间歇性溪流>地表;与地表相比,溪流和间歇性溪流中的凋落叶水溶性氮释放的时间明显提前;在地表和间歇性溪流中,水溶性磷表现为先富集再释放再富集的趋势,溪流中水溶性磷表现为持续释放,释放程度表现为溪流>间歇性溪

流>地表。这些结果一方面充分证明源头溪流和间歇性溪流在森林生态系统物质迁移和循环过程中的重要作用;另一方面,也为凋落物在不同生境中的分解机制提供新的认识。

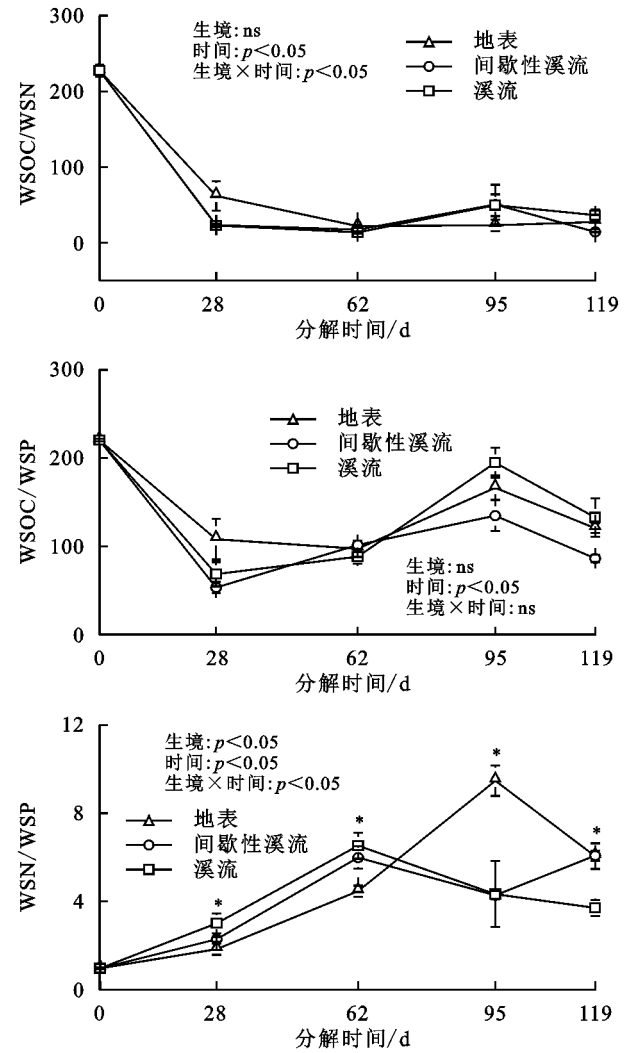
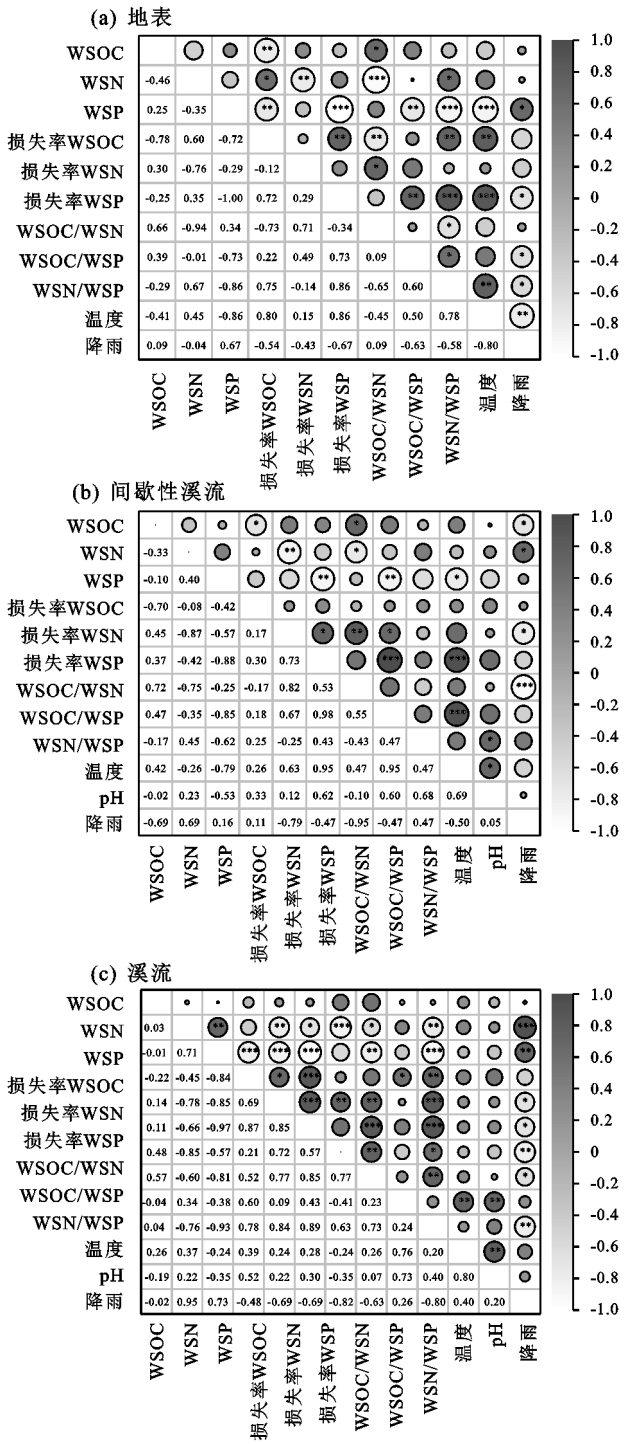


图 5 米槠凋落叶水溶性有机碳、氮、磷化学计量比随分解时间的动态特征

凋落叶水溶性有机碳的损失代表着其为森林—水体复合系统带来物质和能量,源头溪流的物质输入将直接影响下游生态系统的水体质量和物质循环^[17]。本研究表明,在 3 种生境中,凋落叶水溶性有机碳含量在分解前 28 天大幅下降,释放程度表现为溪流>间歇性溪流>地表。亚热带源头溪流水量充足,持续流动的水体使得凋落叶物理破碎加剧,且在水体环境中凋落叶短时间内能迅速释放水溶性物质^[8],因此凋落叶水溶性有机碳在溪流中释放率最高,达 92.18%,这与之前的研究^[18]结果基本相似。间歇性溪流频繁的干湿交替促进了凋落叶水溶性有机碳释放。形成间歇性溪流时,对凋落叶进行冲蚀、淋溶,且淋溶作用的增强促进光照辐射对凋落叶光化学裂解作用^[19],进一步加快水溶性物质的淋失;当间歇性溪流干涸时,温度升高及氧气充足的环境增强分解者的活性,干湿交替使得

凋落叶更加破碎化,凋落叶的分解速率加快^[20]。而天然地表树木郁闭度高,这可能是不同生境分解速率差异显著的原因^[15]。相关性分析(图 6)发现,在溪流和地表生境中水溶性有机碳的损失均与水溶性磷的损失及温度呈极显著正相关。原因可能与微生物活动有关,水热条件适宜,提高微生物的活性,促使凋落叶分解,释放养分以供其活动^[21],进一步促进凋落叶中水溶性有机碳的释放^[22]。



注: WSOC 为水溶性有机碳含量; WSN 为水溶性氮含量; WSP 为水溶性磷含量; * 表示 $p<0.05$; ** 表示 $p<0.01$; *** 表示 $p<0.001$ 。

图 6 米槠凋落叶各指标与环境因子的相关关系分析

凋落叶水溶性氮和磷是凋落叶启动和联系森林—水体复合系统氮和磷循环的关键内容^[23]。氮元素作为影响植物生长的关键营养元素,在大多数凋落叶分解研究中氮元素的变化是无规律的^[24]。本研究发现,凋落叶水溶性氮在溪流和间歇性溪流中的释放时间明显提前,原因可能是溪流持续流动的水体,强烈的冲刷作用以及间歇性溪流的干湿交替和淋洗作用促进凋落叶的物理破碎,使得其释放时间提前。水溶性磷总体呈释放状态,溪流中释放最快,这可能还与溪流充足的水源供应、水体环境对温度变化的缓冲以及来自上游水体持续的营养物质供应有关,使其保证了相关微生物群落结构和活性^[25]。水溶性氮、磷富集的主要原因可能是大气氮、磷沉降^[26-27]和微生物的活动^[12]。经相关性分析,在溪流中水溶性氮、磷含量均与降雨量呈极显著正相关(图 6)。4、5 月降雨量大(图 1),降雨淋洗林冠层大量截留的干沉降^[28]。气温回暖,降水充沛,为真菌和微生物活动提供了有利的水热条件,其活性增强,不仅分解凋落叶以获取养分,还从周围环境吸收有效营养元素^[15],从而形成氮、磷元素的富集。在溪流中,水溶性氮的释放与 WSOC/WSN、WSOC/WSP 均呈极显著正相关(图 6)。本研究,WSOC/WSN 为 13.61~227.39,表现出不同的释放模式,说明在亚热带常绿阔叶林凋落叶中水溶性氮的释放是受多种因素综合作用的结果。研究^[29]还发现,与凋落叶水溶性氮相比,水溶性磷更易随水体的流动而流失至下游水体。

凋落叶水溶性有机碳、氮、磷的化学计量关系反映凋落物分解和养分动态平衡与耦合,是维持森林生态系统结构和功能稳定性的重要指标^[30]。C/N、C/P 是常见的凋落物质量指标,N/P 是养分限制的敏感性指数^[31]。C/N 是最能反映凋落物分解速率的指标之一,凋落物中的 C/N 越高,耐分解化合物含量越多,分解速度越慢^[32]。本研究,3 种生境 WSOC/WSN、WSOC/WSP 表现出相似的动态特征,均在分解前 28 天大幅减小,且 WSOC/WSN 与降雨量呈极显著负相关,可能的原因是水溶性有机碳在分解过程中不断释放,水热条件的改善使得大量微生物定植在凋落叶上,分解凋落叶的养分不足以满足其活动,微生物从周围环境中吸收外源氮及大气氮沉降的影响。研究发现,WSOC/WSP 在分解 28~95 天增大,可能的原因是 5、6 月淋溶作用强烈,植物生长和微生物活动需要吸收大量的养分,水溶性磷不断释放。在不同生境中,WSN/WSP 存在显著差异($p < 0.05$),WSN/WSP 增大的原因可能是 WSN 含量得到极大的补

充,凋落物自身氮素无法满足微生物的活动,从周围环境中富集一部分养分,大气氮沉降也对凋落物层的氮素进行补充,同时磷素在水体流动及降雨淋溶作用下不断流失,导致 WSN/WSP 不断增大^[33]。

4 结 论

(1)经过 4 个月的分解,3 种生境中凋落叶水溶性有机碳、磷整体均表现出明显的释放,释放程度为溪流>间歇性溪流>地表,即水溶性有机碳累积损失率为 92.18%>86.51%>71.90%,水溶性磷累积损失率为 86.75%>65.98%>59.91%。

(2)水溶性氮表现出富集—释放、富集—释放—富集 2 种模式,且溪流和间歇性溪流的释放时间较地表明显提前,其在分解 62~95 天累积损失率分别为 48.13%和 12.86%。

(3)在 3 种生境中,WSOC/WSN 和 WSOC/WSP 均在分解前 28 天大幅降低,与水溶性有机碳损失表现出一致性。WSN/WSP 在不同生境存在显著差异,其动态特征与水溶性氮含量的特征相似。

研究结果表明,溪流水体更能促进凋落叶水溶性物质的释放,水溶性物质易随水体的流动而流失,成为森林物质迁移的重要形式,也是森林地表—水域生态联系的重要纽带,为更加全面地认识亚热带森林生态系统凋落物为载体的物质迁移和循环过程提供一定科学依据。

参考文献:

- [1] 王云琦,王玉杰.森林溪流水质的研究进展[J].水土保持研究,2003,10(4):242-246.
- [2] Battin T J, Kaplan L A, Findlay S, et al. Biophysical controls on organic carbon fluxes in fluvial networks[J]. Nature Geoscience, 2009, 1(8):95-100.
- [3] Ken M, Walter K. Harshness: Characterisation of intermittent stream habitat over space and time[J]. Marine and Freshwater Research, 2005, 56(1):13-23.
- [4] Acuna V, Datry T, Marshall J, et al. Why should we care about temporary waterways? [J]. Science, 2014, 343(6175):1080-1081.
- [5] Bonada N, Resh V H. Mediterranean-climate streams and rivers: Geographically separated but ecologically comparable freshwater systems [J]. Hydrobiologia, 2013, 719(1):1-29.
- [6] Wallace J B, Eggert S L, Meyer J L, et al. Effects of resource limitation on a detrital-based ecosystem[J]. Ecological Monographs, 1999, 69(4):409-442.
- [7] Kim S J, Kim J, Kim K. Organic carbon sequestration and discharge from a deciduous forest catchment in Korea[J]. Biogeosciences Discussions, 2009, 6(5):10089-10120.

- [8] Berg B, McClaugherty C. Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration [M]. Berlin: Springer Verlag, 2020.
- [9] Manuel A S G, Verónica F, Cristina C, et al. A conceptual model of litter breakdown in low order streams[J]. International Review of Hydrobiology, 2015, 100(1): 1-12.
- [10] Arce M I, Mendoza-Lera C, Almagro M, et al. A conceptual framework for understanding the biogeochemistry of dry riverbeds through the lens of soil science [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 188(1): 441-451.
- [11] Ni X Y, Lin C F, Chen G S, et al. Decline in nutrient inputs from litterfall following forest plantation in subtropical China [J]. Forest Ecology and Management, 2021, 496: e119445.
- [12] 岳楷, 杨万勤, 彭艳, 等. 高寒森林溪流对凋落叶分解过程中木质素降解的影响 [J]. 植物生态学报, 2016, 40(9): 893-901.
- [13] Wu J S, Jiang P K, Chang S X, et al. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China [J]. Canadian Journal of Soil Science, 2010, 90(1): 27-36.
- [14] Zhang Y, Yang J P, Yang W Q, et al. Climate, plant organs and species control dissolved nitrogen and phosphorus in fresh litter in a subalpine forest on the eastern Tibetan Plateau [J]. Annals of Forest Science, 2018, 75: e51.
- [15] 岳楷, 杨万勤, 彭艳, 等. 岷江上游高山森林冬季河流中凋落叶碳、氮和磷元素动态特征 [J]. 应用与环境生物学报, 2015, 21(2): 301-307.
- [16] Cleveland C C, Neff J C, Townsend A R, et al. Composition, dynamics, and fate of leached dissolved organic matter in terrestrial ecosystems: Results from a decomposition experiment [J]. Ecosystems, 2004, 7(3): 275-285.
- [17] 蔡庆华, 唐涛, 刘建康. 河流生态学研究中的几个热点问题 [J]. 应用生态学报, 2003, 14(9): 1573-1577.
- [18] 刘博文, 张丽, 吴福忠, 等. 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 [J]. 生态学杂志, 2020, 39(4): 1130-1140.
- [19] 宋新章, 张慧玲, 江洪, 等. UV-B 辐射对亚热带森林凋落叶分解的影响 [J]. 林业科学, 2012, 48(1): 13-17.
- [20] Hornsby D C, Lockaby B G, Chappelka A H. Influence of microclimate on decomposition in loblolly pine stands: A field microcosm approach [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1995, 25(10): 1570-1577.
- [21] 马志良, 高顺, 杨万勤, 等. 亚热带常绿阔叶林 6 个常见树种凋落叶在不同降雨期的分解特征 [J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7553-7561.
- [22] 张磊, 贾淑娴, 李啸灵, 等. 改变凋落物和根系输入对米楮天然林土壤微生物群落的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 270-277.
- [23] 袁吉, 黄美玉, 麦淑媛, 等. 华西雨屏区麻栎人工混交林凋落物水溶性有机碳、氮、磷含量及化学计量比随物候节律的变化特征 [J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 376-383.
- [24] 胡霞, 吴宁, 吴彦, 等. 川西高原季节性雪被覆盖对窄叶鲜卑花凋落物分解和养分动态的影响 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1226-1232.
- [25] Martínez A, Larrañaga A, Pérez J, et al. Temperature affects leaf litter decomposition in low-order forest streams: Field and microcosm approaches [J]. FEMS Microbiology Ecology, 2014, 87(1): 257-267.
- [26] 谢迎新, 张淑利, 冯伟, 等. 大气氮素沉降研究进展 [J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(4): 897-904.
- [27] 赵泽敏, 吴福忠, 杨玉盛, 等. 中亚热带杉木人工林和米楮次生林树干茎流和穿透雨磷的动态特征 [J]. 水土保持学报, 2021, 35(4): 129-134.
- [28] 康希睿, 张涵丹, 王小明, 等. 北亚热带 3 种森林群落对大气湿沉降重金属的调控 [J]. 生态学报, 2021, 41(6): 2107-2117.
- [29] 张川, 杨万勤, 岳楷, 等. 高山森林溪流冬季不同时期凋落物分解中水溶性氮和磷的动态特征 [J]. 应用生态学报, 2015, 26(6): 1601-1608.
- [30] Aerts R, Chapin F S I. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns [J]. Advances in Ecological Research, 2000, 30: 1-67.
- [31] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征 [J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [32] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: A laboratory study [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3): 391-399.
- [33] 湛贤, 刘洋, 邓静, 等. 川西亚高山森林凋落物不同分解阶段碳氮磷化学计量特征及种间差异 [J]. 植物研究, 2017, 37(2): 216-226.