

桂西南喀斯特季节性雨林凋落叶分解速率和养分含量特征分析

李雨菲^{1,2)}, 郭屹立^{1)*}, 李先琨¹⁾, 李冬兴¹⁾, 王 斌¹⁾, 陈 婷¹⁾, 陆 芳¹⁾,
向悟生¹⁾, 黄甫昭¹⁾, 刘晟源³⁾, 李健星¹⁾, 文淑均¹⁾, 陆树华¹⁾

1) 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所广西喀斯特植物保育与恢复生态学重点实验室, 广西桂林 541006;
2) 桂林理工大学旅游与风景园林学院, 广西桂林 541006; 3) 广西弄岗国家级自然保护区管理中心, 广西崇左 532400

摘 要: 森林凋落物是森林生态系统极其重要的组成部分, 了解凋落物分解过程有助于理解森林生态系统的物质循环和养分平衡的机理。本研究以桂西南喀斯特季节性雨林凋落叶为研究对象, 将 2018 年全年收集的凋落叶混合均匀后采用分解袋法进行原位分解实验, 探讨桂西南喀斯特季节性雨林凋落物的分解特征。结果发现: 凋落叶在分解过程中整体失重模式呈现先快后慢的变化趋势, 且不同生境类型下调落叶失重率为: 洼地 > 坡地 > 峰顶; 分解过程中 C 含量呈波动状态, 但总体表现为下降趋势, 而 N 含量呈无规则波动; 失重率与海拔呈显著负相关, 并在分解初期和中后期与坡度呈显著负相关, C 含量变化同海拔呈显著正相关, 而与其他环境因子的相关性则随分解时间的变化而变化。桂西南喀斯特季节性雨林凋落叶分解速率低于亚热带常绿阔叶混交林, 但与同类型的喀斯特森林退化区相当; 喀斯特季节性雨林不同生境类型代表的微环境因子对凋落叶的分解具有重要影响, 其中海拔引起的温度和湿度的差异是影响喀斯特季节性雨林凋落叶分解速率和 C、N 含量变化的主要因素。

关键词: 喀斯特季节性雨林; 凋落叶; 分解速率; 养分含量

中图分类号: P642.252; S714 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2022.021001

Analysis of the Leaf Litter Decomposition Rate and Nutrient Content in a Karst Seasonal Rainforest in Southwest Guangxi

LI Yu-fei^{1,2)}, GUO Yi-li^{1)*}, LI Xian-kun¹⁾, LI Dong-xing¹⁾, WANG Bin¹⁾, CHEN Ting¹⁾, LU Fang¹⁾,
XIANG Wu-sheng¹⁾, HUANG Fu-zhao¹⁾, LIU Sheng-yuan³⁾, LI Jian-xing¹⁾, WEN Shu-jun¹⁾, LU Shu-hua¹⁾

1) Guangxi Key Laboratory of Plant Conservation and Restoration Ecology in Karst Terrain, Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuang Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin, Guangxi 541006;
2) College of Tourism and Landscape Architecture, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006;
3) Administration of Nonggang National Nature Reserve of Guangxi, Chongzuo, Guangxi 532400

Abstract: Forest litter is an important part of forest ecosystem. Knowledge of the nutrient release characteristics of litter leaves during decomposition is needed to understand the mechanism underlying the material cycle and nutrient balance in forest ecosystems. In this study, the litter leaves in the karst seasonal rainforest in Southwest Guangxi were mixed evenly in 2018; an in-situ decomposition test was then performed using the decomposition bag method to evaluate the decomposition characteristics of litter in the karst seasonal rainforest. The results revealed that the whole weight loss pattern during the decomposition process of litter leaves was first fast and then slow. Under different habitat types, the rate of leaf weight loss was in this order: depression > slope > peak; the content of leaf C was in this order: peak > slope > depression; and the content of leaf N was in this order: slope > depression > peak. The rate of weight loss of litter leaves during the whole decomposition process

本文由国家自然科学基金(编号: 32071540; 31760141; 31800371)和国家重点研发计划(编号: 2019YFC0507503)联合资助。

收稿日期: 2021-08-03; 改回日期: 2022-02-07; 网络首发日期: 2022-02-10。责任编辑: 闫立娟。

第一作者简介: 李雨菲, 女, 1996 年生。硕士研究生。主要从事风景园林、森林生态学研究。E-mail: 936755919@qq.com。

*通讯作者: 郭屹立, 男, 1981 年生。博士, 研究员。主要从事生物多样性与生态系统功能研究。E-mail: yiligu810414@163.com。

negatively correlated with altitude and negatively correlated with slope at the early and middle late stages of decomposition. The C content of litter leaves positively correlated with altitude; however, its correlation with other environmental factors changed with the decomposition time. The results of the present study showed that the decomposition rate of litter leaves in the karst seasonal rainforest in Southwest Guangxi was lower than that in subtropical evergreen deciduous broad-leaved mixed forests, but similar to that in the degradation area of the same type of karst forest. The microenvironment factors represented by different habitat types in the karst seasonal rainforest had an important influence on the litter decomposition. The difference in temperature and humidity caused by altitude is the main factor affecting the litter decomposition rate, C content, and N content in the karst seasonal rainforest.

Key words: karst seasonal rainforest; litter; decomposition rate; nutrient content

凋落物分解是陆地生态系统物质循环和能量流动的重要组成部分,也是维持生态系统功能的主要过程之一(Berg and McClaugherty, 1989; Sun et al., 2004)。凋落物分解释放的养分元素是土壤营养物质的主要来源,对土壤肥力的维持起着重要作用(Zsolnay, 1996; Liski et al., 2003; 王春阳等, 2010),也是土壤碳汇的主要来源(Cheng et al., 2006)。凋落物的分解和养分归还作为森林生态系统内养分循环的重要环节,对其进行研究不仅可以加深对森林生态系统物质循环和能量流动的认识,还可以加深对土壤及其肥力的形成过程、森林的涵养水源和森林碳汇以及森林演替的基质及其规律的认识,对认识生态系统中生物地球化学循环有着极其重要的意义。

中国西南喀斯特区是全球三大喀斯特集中分布区之一,该生态系统占国土面积的 35.93%,发育着独特且类型多种多样的热带和亚热带喀斯特植被生态系统(陈灵芝, 1993)。我国南方长期以来的湿热气候使得岩溶地区碳酸盐岩的化学风化强烈,因矿石组成的原因和雨水强烈淋洗,形成了岩石裸露率高、土被不连续、土层浅薄、土壤富钙偏碱性等特征。喀斯特生态系统中,其独特的地质背景、水文结构导致地上地下连通性好、水文过程变化迅速,水、土资源空间分布不匹配,水热因子高度时空异质性。目前有关森林生态系统凋落物分解和养分含量已有大量研究,有关喀斯特森林生态系统凋落物分解特征的研究还很少,如王敏等(2019)研究了茂兰亚热带喀斯特森林退化区凋落物的分解动态,而有关热带喀斯特季节性雨林的相关研究还未见报道。

弄岗北热带喀斯特季节性雨林拥有全球最具代表性的热带喀斯特森林。这种在热带裸露型碳酸盐岩溶地貌上发展起来的独特的森林生态系统,具有生物多样性丰富、生态系统极为脆弱等特征(孙鸿烈, 2005)。针对这种独特的森林生态系统在凋落物动态和机制方面缺乏了解,而对凋落物动态及物质

转化过程等科学问题的探索,是明晰喀斯特物质循环和能量流动过程及机制特殊性的关键。因此,在该地区开展凋落叶的分解过程和养分含量动态特征的研究,为独特的喀斯特退化生态系统植被修复提供科学依据。本研究拟解决以下科学问题:喀斯特地质背景下不同生境类型的凋落叶分解速率差异,不同生境类型中凋落叶分解过程中养分含量变化趋势,以及主导这些变化趋势的主要因素有哪些。

1 材料与方法

1.1 样地概况

弄岗国家级自然保护区位于广西省龙州县以东、宁明县以北。地理位置为 22°13'56" — 22°33'09"N, 106°42'28" — 107°04'54"E。区内地形为典型的喀斯特峰丛洼地,主要由可溶性和多孔石灰岩地质类型组成。保护区洼地底部海拔为 150~200 m,洼地最大深度为 114 m,最大宽度为 450 m。该区域地表水缺乏,而地下水通道丰富,形成了复杂的地下河系,其枯水期为 12 月至翌年 2 月,丰水期为 5 月至 7 月,最低水位埋深在 5~25 m,最高水位则高于地面 0~3 m。保护区年平均气温为 22℃,最冷月平均气温在 13℃以上,每年有 7 个月的月平均温度在 22℃以上,年均降水量为 1150~1550 mm,最高达 2043 mm,最少 890 mm,其中 75%的降水量集中在 5~9 月(Guo et al., 2018)。

依照 CTFS(Center for Tropical Forest Science)样地建设标准(Condit, 1998),广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所于 2011 年在弄岗国家级自然保护区建立了 15 ha 森林动态监测样地。样地包含喀斯特典型的“峰丛-洼地”景观类型,海拔范围 180~370 m,坡度范围 3.7°~78.9°,平均坡度 41.7°。根据土壤及植被分布情况,峰丛-洼地组合可分为 3 种生境类型:(1)峰顶:岩石裸露 95%,全天阳光直射;(2)坡地:岩石裸露 80%,光照充足,湿度适中;(3)洼地:岩石裸露 10%,周围山体可提供遮挡,荫蔽性高,存在季节性水淹现象(王斌等, 2014)。

1.2 实验设计及指标测定

本研究以弄岗 15 ha 样地中布设的 90 个 0.71 m × 0.71 m 凋落物收集器中收集的凋落叶为实验材料。按照凋落物收集器编号, 将 2018 年每月月中和月末收集的凋落物带回实验室, 剔除花、枝干、果实、杂物等组分, 仅保留凋落叶, 于 80℃ 烘箱中烘干至恒重(Guo et al., 2019)后冷藏。于 2019 年 1 月初再次烘干并按凋落物收集器编号混合均匀, 部分用于测定元素含量, 其余部分用电子天平称取 10 g 装入大小为 0.2 m × 0.2 m, 孔径 1 mm 的尼龙网袋中。按编号将尼龙袋放置在原凋落物收集器附近, 除去地表凋落物层, 使分解袋贴近地面自然分解。每个凋落物收集器所在的样方中心附近放置 6 个分解袋, 共 540 袋。自放置日起, 第 1、3、5、7、9、11 个月, 分 6 次取回。每次取回的凋落叶分解袋清除侵入的根系、泥沙后, 在 80℃ 烘干至恒重, 后用电子天平称重用于计算凋落叶质量损失率, 并记录凋落物收集器编号、收集日期、各组分重量等信息。将烘干的分解物磨碎, 过 100 目筛, 储存于密封袋中。凋落叶及分解过程中元素含量由陕西佰瑞斯生物科技有限公司检测。

1.3 数据处理

凋落叶失重率计算公式:

$$E = X_t / X_0$$

$$D_t = [(X_0 - X_t) / X_0] \times 100\%$$

E 为凋落叶残留率, D_t 为凋落叶失重率, X_0 为点落叶初始重量, X_t 为分解时间 t 的凋落叶残留量。

对不同生境条件下 C、N 含量利用多重比较进行显著性分析。采用 Pearson 相关分析探讨不同时间下的失重率、C 元素含量和 N 元素含量分别与环境因子之间的关系。环境因子的选择为凋落物收集器所在 10 m × 10 m 样方内的平均海拔、坡度、凹凸度、坡向、地形湿润度指数和干旱度指数(郭屹立等, 2015)。

所有数据分析和绘图均在 R 4.0.3 中实现。

2 结果与分析

2.1 凋落叶失重率的时空动态

凋落叶失重率随着分解时间的增加而增加, 但在不同的分解阶段明显不同, 且同一分解阶段不同生境类型差异显著。三种生境类型下, 分解速率排序为洼地 > 坡地 > 峰顶。凋落叶分解过程大体上可以分为两个阶段: 快速失重(前 3 个月)和缓慢失重(后 8 个月)(图 1)。

2.2 凋落叶 C、N 含量变化及 C/N 变化

凋落叶分解过程中, C 含量在分解 1 个月后迅速下降, 此后在不同生境中均呈波动变化, 但总体

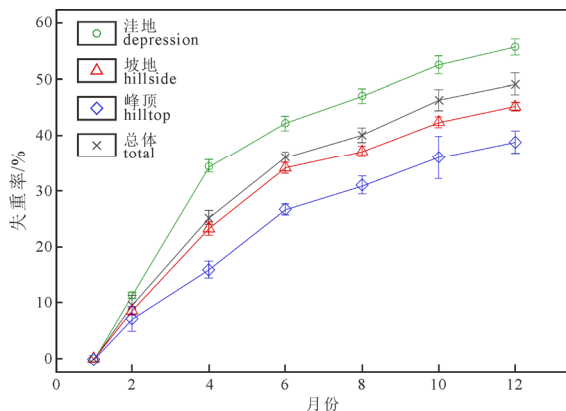


图 1 凋落叶分解速率在不同生境和时间条件下的变化规律

Fig. 1 Changes in the decomposition rate of litter leaves under different habitats and time conditions

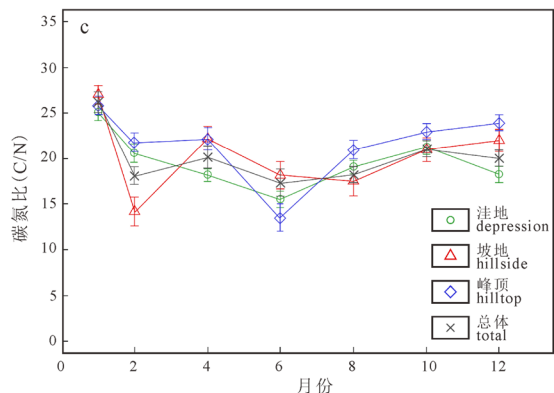
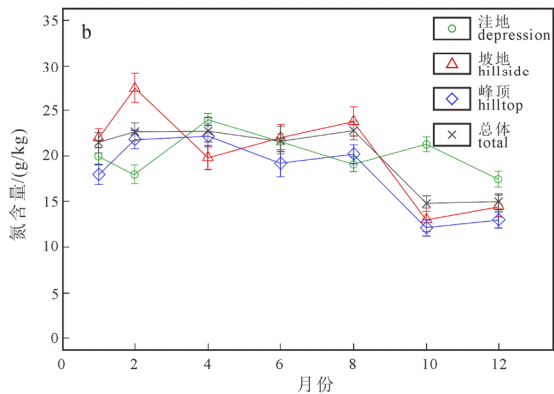
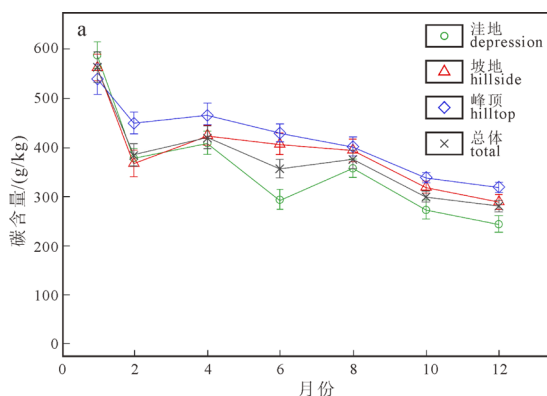


图 2 凋落叶 C、N 含量和碳氮比在不同生境和时间条件下的变化规律

Fig. 2 Changes in the C/N content and the ratio of C/N in litter leaves under different habitats and time conditions

呈现下降趋势。C 含量在不同生境中表现出峰顶 > 坡地 > 洼地的趋势,但在个别分解阶段的差异性并不显著,如分解的第 8 个月。N 含量则在不同生境中均呈无规则波动变化,如在洼地中为“上升-下降-上升”,坡地为“下降-上升-下降”,峰顶为“上升-下降-上升-下降”,且总体变化趋势并不明显。此外,N 含量在不同生境间亦未表现出明显规律性。C/N 比在分解开始后有明显下降趋势,但在分解后期略呈上升趋势。其中,峰顶总体表现出较高的 C/N 比,尤其在分解的第 7 个月之后,但在分解的第 5 个月却明显低于其他两种生境,而洼地和坡地间差异性规律并不明显(图 2)。

2.3 失重率和 C、N 含量与环境因子之间的相关性

凋落叶失重率在不同分解时期与环境因子之间表现出不同的相关性(表 1)。在整个分解过程中,凋落叶失重率与海拔呈显著负相关;在分解初期(前 3 个月)与中后期(后 6 个月)凋落叶失重率与坡度间呈显著负相关;在分解的第 1 个月,凋落叶失重率与坡向正弦值呈现显著性负相关,与坡向余弦值

呈现显著正相关;在分解的第 3、7 和 11 个月内,凋落叶失重率同湿润度指数呈显著正相关。

凋落叶分解过程中,C 含量的变化与海拔之间呈显著正相关(表 2)。C 含量与坡度在分解的中后期为显著正相关;在分解初期(第 1 个月)C 含量与坡向正弦值间呈极显著性正相关,而在分解至中、后期(6、8 和 10 月份)时,C 含量与坡向正弦值均呈现出显著性正相关。

凋落叶在整个分解过程中 N 含量与环境因子间的相关性并没有一定的规律性,且大多没有显著相关性(表 3)。其相关性主要表现为凋落叶在分解期的 4 月份和 10 月份时与海拔因子间呈显著负相关,于 2 月份和 8 月份时与海拔因子间呈显著正相关;在 2 月份和 8 月份与坡向余弦值呈显著正相关。

3 讨论与结论

3.1 不同生境类型凋落叶分解速率的差异

凋落叶在不同生境和不同分解时间的失重率差异明显。不同生境下失重率表现为:洼地 > 坡地

表 1 凋落叶失重率与环境因子间的相关性

Table 1 Correlations between the decomposition rate of leaf litter and environmental factors

环境因子	失重率 1	失重率 2	失重率 3	失重率 4	失重率 5	失重率 6
海拔	-0.304**	-0.570**	-0.394**	-0.443**	-0.394**	-0.334**
坡度	-0.315**	-0.274**	-0.201	-0.238*	-0.283**	-0.279**
凹凸度	-0.194	-0.204	-0.187	-0.151	-0.092	-0.131
坡向正弦值	-0.270*	-0.150	-0.037	-0.009	-0.004	-0.079
坡向余弦值	0.208*	0.021	0.027	-0.019	0.054	0.021
干旱度指数	-0.210	-0.152	-0.058	-0.061	-0.038	-0.137
湿润度指数	0.170	0.315**	0.167	0.230*	0.164	0.242*

表 2 凋落叶 C 含量与环境因子间的相关性

Table 2 Correlations between the C contents of leaf litter and environmental factors

环境因子	C1	C2	C3	C4	C5	C6
海拔	0.244*	0.312**	0.675**	0.277*	0.413**	0.488**
坡度	0.074	0.113	0.262*	0.230*	0.421**	0.311**
凹凸度	0.060	0.079	0.010	0.057	-0.009	0.008
坡向正弦值	0.285**	0.056	0.252*	0.262*	0.215*	0.117
坡向余弦值	-0.153	-0.085	0.157	0.096	0.107	0.008
干旱度指数	0.295**	0.215*	0.147	0.100	0.035	0.231*
湿润度指数	-0.142	-0.134	-0.345**	-0.175	-0.418**	-0.335**

注: C1、C2、C3、C4、C5、C6 分别代表凋落叶分解袋回收次数。例如,1 代表第一次回收(即 2019 年 2 月份回收),以此类推。
** $P < 0.01$; * $P < 0.05$ 。

表 3 凋落叶 N 含量与环境因子间的相关性

Table 3 Correlations between the N contents of leaf litter and environmental factors

环境因子	N1	N2	N3	N4	N5	N6
海拔	0.495**	-0.291**	0.129	0.317**	-0.404**	-0.211
坡度	0.100	0.088	-0.017	0.158	-0.157	0.156
凹凸度	-0.177	0.175	-0.199	-0.130	-0.150	-0.112
坡向正弦值	0.009	0.165	0.071	0.120	-0.012	0.019
坡向余弦值	0.349**	-0.148	0.131	0.231*	-0.063	0.103
干旱度指数	0.027	-0.025	-0.056	0.013	-0.201	-0.092
湿润度指数	-0.182	0.011	-0.061	-0.141	0.185	0.137

> 峰顶。这与郭忠玲等(2006)对长白山凋落叶分解速率随海拔升高而降低的研究结论一致。三种生境下凋落叶的分解趋势均呈现出两个阶段: 快速失重阶段和缓慢失重阶段, 这个结果与其他研究结论基本一致(张庆费和徐绒娣, 1999)。而这种变化规律主要归结于两个方面: 一方面, 分解初期的凋落叶分解速率与凋落叶中容易分解的基质有关(徐波等, 2016)。分解初期分解速率更多受到凋落物自身理化性质和微生物组群(Finzi and Schlesinger, 2002)以及降水的淋溶作用的影响(程煜, 2003)。分解后期, 凋落叶基质成分更多为高 C/N、高木质素/N 的有机质组分, 以及酚类和木质素等较难分解的物质, 减缓了凋落叶的分解速度(Berg et al., 2000; Berg, 2000)。

另一方面, 环境中温度和湿度均会对凋落叶分解产生影响(Chen et al., 2001; 李雪峰等, 2007)。在喀斯特特殊地质作用下, 峰顶坡度陡峭、岩石裸露率高、水分缺乏, 可能会导致微生物数量降低和酶活性受到抑制, 减缓凋落叶分解速度。而洼地和周边谷地因季节性积水, 土壤覆盖率高且土层深厚, 其微环境更有利于微生物的生存, 从而有利于凋落叶分解。本次实验开始于冬季(旱季), 随着气温逐渐回升, 降水量也逐渐增加, 微生物快速繁殖, 凋落叶分解率加快。而在实验的中后期凋落叶的分解速度减缓, 这可能是凋落叶分解达到一定时期后, 纤维素、木质素等难以被微生物利用的大分子有机物为凋落叶主要成分, 从而减缓了凋落叶的分解速率。此外, 分解后期(11 月和 12 月)随着降雨的减少也会对凋落物分解产生影响。

与其他森林生态系统相比, 桂西南喀斯特季节性雨林的凋落叶在前 3 个月内的分解率要远低于中亚热带常绿阔叶林的庐山国家级自然保护区、低于南温带落叶阔叶林的宝天曼国家级自然保护区(高唤唤, 2018), 而与同为喀斯特地质背景的中亚热带常绿落叶阔叶混交林的茂兰国家级自然保护区相当(窦百强等, 2019)。有研究表明各气候带凋落物的分解速率呈现出热带 > 亚热带 > 温带 > 寒温带的规律(Chen et al., 2001), 但弄岗北热带喀斯特季节性雨林并不符合这一规律。这表明, 至少在凋落物分解的前 3 个月, 弄岗北热带喀斯特季节性雨林凋落物分解较慢, 未表现出通过营养元素的快速循环来维持喀斯特总体贫瘠环境中的高生物多样性。这也可能与此时冬春季节低温少雨的气候条件有关。

3.2 不同生境类型凋落叶分解过程中养分变化

凋落叶在分解过程中养分元素会发生迁移, 不同生境和时间条件下, 养分迁移的模式也有所不同。在整个分解过程中, 不同生境下 C 含量大致表

现为峰顶 > 坡地 > 洼地。这可能是由于喀斯特峰顶和高坡位的高温、干旱等微环境条件制约了凋落叶分解, 而洼地及周边谷地因季节性积水及土层较厚的优势促进了有机质的分解, 表现出较高的分解率。

在三种生境中, 凋落叶分解初期 C 含量都出现了短暂的上升。这可能是因为凋落叶在分解初期, 凋落叶组成成分的纤维素、木质素等有机碳含量较高的难分解物质还未分解。当凋落叶的有机碳损失量小于干物质失重量时, 有机碳浓度将会表现出上升趋势, 而后随着有机物的大量分解, 有机碳浓度则开始降低。洼地生境下 C 元素含量后期呈上下波动状态, 而坡地和峰顶则是处于持续下降过程, 这可能与大部分灰分元素的富集造成其浓度的稀释有关(Aber et al., 1989)。

已有研究表明喀斯特地质背景下形成的错综复杂的溶沟、溶槽、岩缝、石脊等微环境导致了光、热、水、养分等资源的重新分配(侯文娟等, 2016), 从而可能会间接地引起凋落叶 N 元素分解过程的复杂性。通常情况下, 分解时 N 元素会进行先富集再释放的模式, 即当凋落叶中初始 N 含量较低时, 微生物会从外界环境中吸收 N 元素来满足自身活动的需要, 这样便引起了 N 元素的富集(窦荣鹏等, 2010), 其原因也可能与自生固氮菌的入侵有关(李志安等, 2004)。但在本研究中, 洼地和峰顶在分解初期 N 含量都呈上升趋势, 而坡地生境下 N 含量在最初则呈下降的趋势, 即在坡地生境下 N 含量最初并未表现出富集现象, 这可能是由于坡地生境下土壤 N 含量相对较高(郭屹立等, 2017), 在凋落叶分解时基本满足微生物活动所需 N 源的需求, 从而出现了 N 元素直接释放的可能。本研究发现, 不同生境间 N 含量并未表现出明显的规律性, 这也表明凋落物分解过程中 N 元素的归还过程有很大的复杂性。

一般认为 C/N 比对氮的释放临界值是 25, 当 C/N 比小于 25 时, 氮被矿化使凋落物中 N 释放。C/N 比越低营养元素的迁移率越高, 分解速率越快, 主要是因为 C/N 比低时 N 元素含量高, 能够为微生物提供充足 N 源。当 C/N 比高时, 说明 N 含量匮乏, 微生物作为分解者由于缺少 N 源而使生长发育受限, 因此使凋落物分解速率减慢(侯玲玲, 2012)。弄岗北热带喀斯特季节性雨林中凋落物不同分解阶段 C/N 比均低于 25, 这表明凋落物中氮元素始终处于缓慢释放过程。但是, 这种释放过程在不同生境间存在明显差异, 其中峰顶及其周边高坡位地区 C/N 比略高而营养元素释放较慢, 这可能是受峰顶及周边高坡位的高温、干旱等微环境条件所致。

3.3 环境因子对失重率、养分含量差异性的影响

凋落物失重率及分解过程中养分含量均受环境因子的影响,其中海拔因子对失重率和养分含量的影响较大。凋落叶失重率在不同分解时期与海拔均呈显著负相关。这可能是因为喀斯特地质背景下峰顶及周边高坡位接受到更强烈的太阳直射地表温度较高、土层浅、土壤含水量低等原因形成的。这与太平洋热带岛屿 Mauna Loa 的研究结果一致(Vitousek et al., 1994)。凋落叶失重率与坡度在整个分解过程分解率呈负相关。这可能是因为以海拔为主导的微环境作用间接影响了地表水分分布,加之受到微环境,如光强、岩石分布状况等影响,引起了不同坡度的林分间温度和湿度变化(Hornsby et al., 1995),而最终影响了凋落叶分解速率。地形湿润度指数在整个分解过程中与凋落叶分解率呈正比。其原因是因为凋落叶的分解一般由淋溶、自然粉碎、代谢等作用共同完成(Warning and Schlesinger, 1985),湿润度越高,水分越多,淋溶作用越强。

凋落叶分解过程中 C 含量与海拔相关性较强,而与其他环境因子之间的相关性主要表现在因分解时间的不同而不同。C 含量在整个过程中均与海拔呈显著正相关,这与武夷山凋落物 C 含量随海拔升高不断降低的结论不同(刘倩等, 2018)。弄岗样地海拔梯度仅为 194~374 m,且在峰顶及周边高坡位受阳光直射、岩石裸露率高等因素影响常表现出高温、干旱的环境特征(Guo et al., 2016)。在高温、干旱环境下凋落物分解缓慢且容易维持较高的 C 含量(郭屹立等, 2017)。N 含量在 4 月和 10 月随海拔升高不断降低,这可能是因为弄岗夏季高温多雨,而温度和水分影响微生物群落(Aber and Melillo, 1980),微生物活性的变化影响养分浓度的变化(Kuzatkowski et al., 2004)。

本研究是在自然环境下进行的凋落物多物种混合的原位分解实验。元素含量与环境因子的相关性虽然可以为揭示影响凋落物分解和营养元素归还过程的主要因素提供一定线索,但是,由于弄岗北热带喀斯特季节性雨林温度和降雨等四季变化明显,再加上喀斯特峰丛-洼地海拔梯度下形成的温度、湿度、岩石裸露率、光照强度等环境因子的剧烈变化,导致该区域凋落物分解和营养元素归还过程具有一定复杂性,而这一复杂环境下凋落物分解过程还亟需开展控制试验加以验证。

Acknowledgements:

This study was supported by National Natural Science Foundation of China (Nos. 32071540, 31760141, and 31800371), and National Key Research

and Development Program of China (No. 2019YFC0507503).

参考文献:

- 陈灵芝. 1993. 中国的生物多样性: 现状及其保护对策[M]. 北京: 科学出版社.
- 程煜. 2003. 闽楠叶凋落物分解动态及其养分释放规律研究[D]. 福州: 福建农林大学.
- 窦百强, 容丽, 俞国松, 李恒. 2019. 茂兰喀斯特森林自然保护区凋落叶分解动态[J]. 水土保持通报, 39(2): 94-100.
- 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 马元丹, 宋新章, 郭培培, 张小川. 2010. 4 种亚热带树木凋落叶的分解研究[J]. 浙江林学院学报, 27(2): 163-169.
- 高唤唤. 2018. 不同海拔梯度上凋落物分解特征研究--以庐山和宝天曼为例[D]. 上海: 上海交通大学.
- 郭屹立, 李冬兴, 王斌, 白坤栋, 向悟生, 李先琨. 2017. 北热带喀斯特季节性雨林土壤和 6 个常见树种凋落物的 C、N、P 化学计量学特征[J]. 生物多样性, 25(10): 1085-1094.
- 郭屹立, 王斌, 向悟生, 丁涛, 陆树华, 黄俞淞, 黄甫昭, 李冬兴, 李先琨. 2015. 广西弄岗北热带喀斯特季节性雨林监测样地种群空间点格局分析[J]. 生物多样性, 23(2): 183-191.
- 郭忠玲, 郑金萍, 马元丹, 李庆康, 于贵瑞, 韩士杰, 范春楠, 刘万德. 2006. 长白山各植被带主要树种凋落物分解速率及模型模拟的试验研究[J]. 生态学报, 26(4): 1037-1046.
- 侯玲玲. 2012. 小兴安岭主要森林群落类型凋落物量及其分解动态研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学.
- 侯文娟, 高江波, 彭韬, 吴绍洪, 戴尔阜. 2016. 结构—功能—生境框架下的西南喀斯特生态系统脆弱性研究进展[J]. 地理科学进展, 35(3): 320-330.
- 李雪峰, 韩士杰, 张岩. 2007. 降水量变化对蒙古栎落叶分解过程的间接影响[J]. 应用生态学报, 18(2): 261-266.
- 李志安, 邹碧, 丁永祯, 曹裕松. 2004. 森林凋落物分解重要影响因素及其研究进展[J]. 生态学杂志, 23(6): 77-83.
- 刘倩, 王书丽, 邓邦良, 郑翔, 黄立君, 郭晓敏, 张学玲, 张令. 2018. 武功山山地草甸不同海拔凋落物-土壤碳、氮、磷含量及其生态化学计量特征[J]. 应用生态学报, 29(5): 1535-1541.
- 孙鸿烈. 2005. 中国生态系统[M]. 北京: 科学出版社.
- 王斌, 黄俞淞, 李先琨, 向悟生, 丁涛, 黄甫昭, 陆树华, 韩文衡, 文淑均, 何兰军. 2014. 弄岗北热带喀斯特季节性雨林 15 ha 监测样地的树种组成与空间分布[J]. 生物多样性, 22(2): 141-156.
- 王春阳, 周建斌, 夏志敏, 陈兴丽. 2010. 黄土高原区不同植物凋落物可溶性有机碳含量及其降解[J]. 应用生态学报, 21(12): 3001-3006.
- 王敏, 容丽, 俞国松, 李芹. 2019. 茂兰喀斯特森林退化区凋落物的分解动态[J]. 广西植物, 39(8): 1081-1091.
- 徐波, 朱忠福, 李金洋, 吴彦, 邓贵平, 吴宁, 石福孙. 2016. 九寨沟国家自然保护区 4 个典型树种叶片凋落物在林下及高山湖泊中的分解及养分释放特征[J]. 植物生态学报, 40(9): 883-892.
- 张庆费, 徐绒娣. 1999. 浙江天童常绿阔叶林演替过程的凋落物

现存量[J]. 生态学杂志, 18(2): 17-21.

References:

- ABER J D, MELILLO J M. 1980. Litter decomposition: measuring relative contributions of organic matter and nitrogen to forest soils[J]. *Canadian Journal of Botany*, 58(4): 416-421.
- ABER J D, NADELHOFFER K J, STEUDLER P, MELILLO J M. 1989. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems[J]. *BioScience*, 39(6): 378-386.
- BERG B, JOHANSSON M B, MEENTEMEYER V. 2000. Litter-decomposition in a transect of Norway spruce forests: substrate quality and climate control[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 30(7): 1136-1147.
- BERG B, MCCLAUGHERTY C A. 1989. Nitrogen and phosphorus release from decomposing litter in relation to the disappearance of lignin[J]. *Canadian Journal of Botany*, 67(4): 1148-1156.
- BERG B. 2000. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils[J]. *Forest Ecology and Management*, 133(1-2): 13-22.
- CHEN H, HARMON M E, TIAN H Q. 2001. Effects of global change on litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 21(9): 1549-1563.
- CHEN Ling-zhi. 1993. The current situation of biodiversity in China and its protection counter measures[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- CHENG X L, LUO Y Q, CHEN J Q, LIN G H, CHEN J K, LI B. 2006. Short-term C4 plant *Spartina alterniflora* invasions change the soil carbon in C3 plant-dominated tidal wetlands on a growing estuarine Island[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(2): 3380-3386.
- CHENG Yu. 2003. Study on litter-fall decomposing dynamic and nutrients releasing rule of *Phoebe bournei*[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University(in Chinese with English abstract).
- CONDIT R. 1998. Tropical forest census plots: Methods and results from Barro Colorado Island, Panama and a comparison with other plots[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- DOU Bai-qiang, RONG Li, YU Guo-song, LI Heng. 2019. Decomposition dynamics of leaf litters in Maolan karst forest nature reserve[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 39(2): 94-100(in Chinese with English abstract).
- DOU Rong-peng, JIANG Hong, YU Shu-quan, MA Yuan-dan, SONG Xin-zhang, GUO Pei-pei, ZHANG Xiao-chuan. 2010. Leaf litter decomposition of four tree species in subtropical China[J]. *Journal of Zhejiang Forestry College*, 27(2): 163-169(in Chinese with English abstract).
- FINZI A C, SCHLESINGER W H. 2002. Species control variation in litter decomposition in a pine forest exposed to elevated CO₂[J]. *Global Change Biology*, 8(12): 1217-1229.
- GAO Huan-huan. 2018. Litter decomposition across altitude gradient: case study in Lushan and Baotianman Mountains[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University(in Chinese with English abstract).
- GUO Y L, CHEN Y H, MALLIK A U, WANG B, LI D X, XIANG W S, LI X K. 2019. Predominance of abiotic drivers in the relationship between species diversity and litterfall production in a tropical karst seasonal rainforest[J]. *Forest Ecology and Management*, 449: 117452.
- GUO Y L, WANG B, MALLIK A U, HUANG F Z, XIANG W S, DING T, WEN S J, LU S H, LI D X, HE Y L, LI X K. 2016. Topographic species-habitat associations of tree species in a heterogeneous tropical karst seasonal rain forest, China[J]. *Journal of Plant Ecology*, 10(3): 450-460.
- GUO Y L, XIANG W S, WANG B, LI D X, MALLIK A U, CHEN Y H, HUANG F Z, DING T, WEN S J, LU S H, LI X K. 2018. Partitioning beta diversity in a tropical karst seasonal rainforest in Southern China[J]. *Scientific Reports*, 8(1): 1-12.
- GUO Yi-li, LI Dong-xing, WANG Bin, BAI Kun-dong, XIANG Wu-sheng, LI Xian-kun. 2017. C, N and P stoichiometric characteristics of soil and litter fall for six common tree species in a northern tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China[J]. *Biodiversity Science*, 25(10): 1085-1094(in Chinese with English abstract).
- GUO Yi-li, WANG Bin, XIANG Wu-sheng, DING Tao, LU Shu-hua, HUANG Yu-song, HUANG Fu-zhao, LI Dong-xing, LI Xian-kun. 2015. Spatial distribution of tree species in a tropical karst seasonal rainforest in Nonggang, Guangxi, southern China[J]. *Biodiversity Science*, 23(2): 183-191(in Chinese with English abstract).
- GUO Zhong-ling, ZHENG Jin-ping, MA Yuan-dan, LI Qing-kang, YU Gui-rui, HAN Shi-jie, FAN Chun-nan, LIU Wan-de. 2006. Researches on litterfall decomposition rates and model simulating of main species in various forest vegetations of Changbai Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 26(4): 1037-1046(in Chinese with English abstract).
- HORNSBY D C, LOCKABY B G, CHAPPELKA A H. 1995. Influence of microclimate on decomposition in loblolly pine stands: a field microcosm approach[J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 25(10): 1570-1577.
- HOU Ling-ling. 2012. Study on litter decomposition dynamics and production of ten major community types in Xiaoxing'an Mountain, China[D]. Harbin: Northeast Forestry University(in Chinese with English abstract).
- HOU Wen-juan, GAO Jiang-bo, PENG Tao, WU Shao-hong, DAI Er-fu. 2016. Review of ecosystem vulnerability studies in the karst region of Southwest China based on a structure-function-habitat framework[J]. *Progress in Geography*, 35(3): 320-330(in Chinese with English abstract).
- KURZATKOWSKI D, MARTIUS C, HÖFER H, GARCIA M, FÖRSTER B, BECK L, VLEK P. 2004. Litter decomposition, microbial biomass and activity of soil organisms in three agroforestry sites in central Amazonia[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 69(3): 257-267.

- LI Xue-feng, HAN Shi-jie, ZHANG Yan. 2007. Indirect effects of precipitation on litter decomposition of *Quercus mongolica*[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 18(2): 261-266(in Chinese with English abstract).
- LI Zhi-an, ZOU Bi, DING Yong-zhen, CAO Yu-song. 2004. Key factors of forest litter decomposition and research progress[J]. Chinese Journal of Ecology, 23(6): 77-83(in Chinese with English abstract).
- LISKI J, NISSINEN A, ERHARD M, TASKINEN O. 2003. Climatic effects on litter decomposition from arctic tundra to tropical rainforest[J]. Global Change Biology, 9(4): 575-584.
- LIU Qian, WANG Shu-li, DENG Bang-liang, ZHENG Xiang, HUANG Li-jun, GUO Xiao-min, ZHANG Xue-ling, ZHANG Ling. 2018. Carbon, nitrogen and phosphorus contents and their ecological stoichiometry in litters and soils on meadow of Wugong Mountain, Jiangxi, China at different altitudes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 29(5): 1535-1541(in Chinese with English abstract).
- SUN Hong-lie. 2005. Chinese Ecosystem[M]. Beijing: Science Press(in Chinese).
- SUN O J, CAMPBELL J, LAW B E, WOLF V. 2004. Dynamics of carbon stocks in soils and detritus across chronosequences of different forest types in the Pacific Northwest, USA[J]. Global Change Biology, 10(9): 1470-1481.
- VITOUSEK P M, TURNER D R, PARTON W J, SANFROD R L. 1994. Litter decomposition on the mauna loa environmental matrix, Hawai'i: Patterns, mechanisms, and models[J]. Ecology, 75(2): 418-429.
- WANG Bin, HUANG Yu-song, LI Xian-kun, XIANG Wu-sheng, DING Tao, HUANG Fu-zhao, LU Shu-hua, HAN Wen-heng, WEN Shu-jun, HE Lan-jun. 2014. Species composition and spatial distribution of a 15 ha northern tropical karst seasonal rain forest dynamics study plot in Nonggang, Guangxi, southern China[J]. Biodiversity Science, 22(2): 141-156(in Chinese with English abstract).
- WANG Chun-yang, ZHOU Jian-bin, XIA Zhi-min, CHEN Xing-li. 2010. Soluble organic carbon in plant litters on Loess Plateau: Content and biodegradability[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 21(12): 3001-3006(in Chinese with English abstract).
- WANG Min, RONG Li, YU Guo-song, LI Qin. 2019. Decomposition of litters in Maolan karst forest degradation area[J]. Guihaia, 39(8): 1081-1091(in Chinese with English abstract).
- WARING R H, SCHLESINGER W H. 1985. Forest ecosystems: concepts and mangement[M]. New York: Academic Press.
- XU Bo, ZHU Zhong-fu, LI Jin-yang, WU Yan, DENG Gui-ping, WU Ning, SHI Fu-sun. 2016. Leaf decomposition and nutrient release of dominant species in the forest and lake in the Jiuzhaigou National Nature Reserve, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 40(9): 883-892(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Qing-fei, XU Rong-di. 1999. Standing crops of the litter-fall in the succession series of evergreen broad-leaved forest in Tiantong, Zhejiang Province[J]. Chinese Journal of Ecology, 18(2): 17-21(in Chinese with English abstract).
- ZSOLNAY A. 1996. Dissolved humus in soil waters[C]//Humic Substances in Terrestrial Ecosystems. Amsterdam: Elsevier: 171-223.