

## 喀斯特森林不同地形凋落物现存量及养分特征

薛 飞,龙翠玲\*,廖全兰,熊 玲

(贵州师范大学 地理与环境科学学院,贵州 贵阳 550001)

**摘 要:**分析茂兰喀斯特森林不同地形条件下,凋落物层现存量和主要养分元素含量、储量及其释放特征,以及与土壤理化性质相关关系,为探讨茂兰喀斯特森林生态系统的养分循环机制提供理论依据。在贵州茂兰国家级喀斯特森林自然保护区内,从坡地、槽谷和漏斗3种典型地形的地表采集各分解层的凋落物和矿质土土壤样品,测定凋落物层的现存量和主要养分元素含量、储量、释放率,使用 Pearson 相关性分析,探究土壤理化性质与凋落物层现存量、养分元素含量之间的相关性。结果表明:1)不同地形之间以及不同分解层之间,凋落物层现存量差异较大,具体表现为坡地>槽谷>漏斗和已分解层>半分解层>未分解层。2)凋落物各分解层养分元素含量及储量均表现为 C>Ca>N>Mg>K>P,不同地形之间凋落物养分总储量存在显著差异,且均以坡地最高,各养分元素因地形和分解层的差异而表现出不同的释放率。3)凋落物现存量与土壤碳、氮含量、含水量、容重、pH 之间存在显著相关性。表明地形对喀斯特森林凋落物养分释放分布特征及分解速率具有显著影响,其中坡地森林地表凋落物分解较快,营养元素循环周期较短。

**关键词:**喀斯特森林;凋落物层;现存量;养分元素;地形

**中图分类号:**S714

**文献标志码:**A

**文章编号:**1001-7461(2021)05-0028-08

### Characteristics of Litter Stock and Nutrients in Different Land Forms in Karst Forest

XUE Fei, LONG Cui-ling\*, LIAO Quan-lan, XIONG Ling

(College of Geography and Environmental Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, Guizhou, China)

**Abstract:** In order to provide a theoretical basis for the further investigation of the nutrient circulation mechanism in Maolan karst forest, the existing stock of litter layer and the contents of main nutrient elements, reserves and release characteristics of the litter layer under different terrain conditions, as well as the their relationships with soil physico-chemical properties were analyzed. The experiment was conducted in the Maolan National Karst Forest Nature Reserve in Guizhou, in which litter and soil samples were collected from different decomposed layers on the surfaces of three typical morphologies: slope, trough valley, and funnel land forms. Relative indicators were measured, such as the existing amount of litter layer, contents of the main nutrients and release rate. Pearson correlation analysis was adopted to explore the correlations between the physical and chemical properties of the soil and the existing amount of litter layer, as well as nutrient contents. The results showed that 1) significant differences in the existing amount of litter layer forms were found between different land forms and decomposition layers, and the orders were slope>trough valley>funnel, and fully decomposed layer>fragmented litter layer>fresh litter layer. 2) The contents and reserves of nutrient elements in each decomposition layer of litter were shown as C>Ca>N>Mg>K>P. There were significant differences in the total nutrient reserves of litter among different land forms, and the slope was the highest. Each nutrient element showed different release rates due to the differ-

收稿日期:2020-10-27 修回日期:2020-12-27

基金项目:国家自然科学基金(31660107);贵州省科技计划项目(黔科合平台人才[2017]5726-45)。

作者简介:薛 飞。研究方向:植物生态学。E-mail:627484731@qq.com

\* 通信作者:龙翠玲,博士,教授,硕士生导师。研究方向:植物生态学。E-mail:longcuiling898@163.com

ence in topography and decomposition layer. 3) There was a significant correlation between litter existing and soil carbon, nitrogen content, water content, bulk density, and pH. It was concluded that land forms had significant impacts on the nutrient release distribution characteristics and decomposition rate of litter in Karst forests. The decomposition rate of litter on the sloping forest surface was faster, and the cycle of nutrient elements was shorter.

**Key words:** Karst forest; litter layer; current stock; nutrient elements; land form

森林地表凋落物层是土壤养分的主要来源,其分解和养分归还还在维持森林生态系统的物质循环和养分平衡等方面起着重要作用<sup>[1]</sup>。同时,森林地表凋落物层作为生态学、土壤学和生物地球化学的重要研究内容,在涵养水源、促进土壤动物和微生物活动、改变植物群落组成、维持森林植物群落稳定性和可持续性<sup>[2-4]</sup>等方面具有重要意义。近年来,我国关于森林凋落物的产量动态<sup>[5]</sup>和分解特征<sup>[6]</sup>进行了大量研究,但对凋落物现存量、养分特征及其影响因子的研究较少。

凋落物产量、分解速率和积累年限共同决定了凋落物现存量的高低,而气候、地形、土壤、林分起源、植物群落的发育阶段、组成、结构等是影响凋落物现存量的重要因素<sup>[7]</sup>。地形作为影响森林生态系统结构和功能的主要因素,对森林小气候、植被群落组成、地表径流以及土壤理化性质、土壤动物与微生物活动等产生显著影响,进而影响地表凋落物层的现存量<sup>[8]</sup>。刘颖等<sup>[9]</sup>在研究长白山森林凋落物现存量时发现,相同纬度森林凋落物现存量随海拔梯度的增加先升高后降低。潘复静等<sup>[10]</sup>研究广西环江典型喀斯特峰丛洼地现存凋落物时发现,坡度对凋落物现存量存在显著影响。刘中奇等<sup>[11]</sup>研究黄土丘陵沟壑区封禁流域植被凋落物分布规律时发现,阴坡的凋落物现存量>阳坡。上述研究表明在我国温带和亚热带森林,凋落物现存量受到海拔、坡度和坡向等地形因素不同程度的影响。喀斯特森林作为独特的森林生态系统,地貌形态复杂多样,分布有漏斗、洼地、槽谷、落水洞、盲谷、盆地等地形类型,不同地形之间生境差异明显,致使其森林植被组成、凋落物和土壤的养分分布在空间上呈现高度的异质性。近年来,已有学者对喀斯特森林不同地形的种间联结<sup>[12]</sup>、种群结构<sup>[13]</sup>、植物多样性<sup>[14]</sup>、土壤理化性质<sup>[15]</sup>等方面展开研究,但地形如何影响喀斯特森林地表凋落物层现存量及养分状况的分布格局、养分释放特征和循环规律等尚不明确。本研究以贵州茂兰喀斯特森林自然保护区内漏斗、槽谷、坡地3种典型地形的森林凋落物为对象,探讨各地形条件下凋落物层的现存量、养分特征、储量差异及其与土壤养分和理化性质的关系,旨在深入了解喀斯特森林生

态系统养分循环特征及规律,为喀斯特森林林地管理和土壤肥力维持提供理论依据。

## 1 研究区概况

茂兰自然保护区位于贵州省荔波县境内,107°52'10"—108°05'40"E,25°09'20"—25°20'50"N,地处黔、桂交界处。保护区总面积约20 000 hm<sup>2</sup>,最高海拔1 078.6 m,最低海拔430 m,平均海拔800 m左右。保护区内年平均温度15.3℃,气温年较差18.3℃,年降水量1 752.5 mm,年平均相对湿度83%,属中亚热带季风湿润气候。该区主要是纯质石灰岩和白云岩组成的裸露岩溶地貌,局部地方覆盖有少量砂页岩,属于典型的喀斯特生境。区内水文地质条件复杂,岩石透水性极强,地表水强烈渗漏。

## 2 材料与方法

### 2.1 样地设置与群落调查

2018年9月初,选取研究区内坡地、槽谷和漏斗3种典型地形,每种地形设置3个标准样地(20 m×20 m),测定各样地海拔高度、坡度、土壤类型、水分条件等环境因子。于2018年9月中旬开展群落调查。在每个样地中设置4个10 m×10 m的样方,对样方内的树种进行调查,记录木本植物的种名、个体数、树高、胸径等(表1)。

组成比例计算公式为:

$$\text{组成比例} = \frac{\text{样方某树种株数}}{\text{样方所有树种总株数}} \quad (1)$$

木本植物密度计算公式为:

$$\text{木本植物密度} = \frac{\text{样方木本植物总株数}}{\text{样方总面积}} \quad (2)$$

重要值计算公式为:

$$\text{重要值} = \frac{\text{相对密度} + \text{相对频度} + \text{相对显著度}}{3} \quad (3)$$

平均胸径和树高的计算均采用简单的算数平均,公式为:

$$\bar{D} = \frac{\sum D_i}{n} \text{ 和 } \bar{H} = \frac{\sum H_i}{n} \quad (4)$$

式中, $\sum D_i$ 为*i*树种的胸径总和/cm, $\sum H_i$ 为*i*树种的树高总和/m,*n*为*i*树种的株数。

表 1 样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of sample sites

样地类型	海拔 /m	坡度 /(°)	优势物种	组成 比例/%	木本植物密 /(棵·hm <sup>-2</sup> )	重要值 /%	平均胸径 /cm	平均树高 /m
坡地	814	45	轮叶木姜子( <i>Litsea verticillata</i> )	38.08	4 090	35.77	3.15	4.78
			翅荚香槐( <i>Cladrastis platycarpa</i> )	4.92		6.45	7.46	4.47
			巴东荚蒾( <i>Viburnum henryi</i> )	6.96		5.08	2.00	5.23
			四照花( <i>Cornus japonica</i> var. <i>chinensis</i> )	4.41		3.78	5.05	3.64
			青冈栎( <i>Cyclobalanopsis glauca</i> )	2.12		3.63	9.87	8.36
			香叶树( <i>Lindera communis</i> )	4.16		2.93	1.53	2.64
			黄梨木( <i>Boniodendron minus</i> )	4.41		2.65	1.38	2.11
			球核荚蒾( <i>Viburnum propinquum</i> )	8.90		2.55	4.64	2.51
			南天竹( <i>Nandina domestica</i> )	21.99		2.40	0.56	1.65
			长梗罗伞( <i>Brassaiopsis glomerulata</i> )	8.12		2.36	2.86	1.84
			其他 59 种					
槽谷	685	15	四照花	6.63	4 395	10.04	4.24	3.82
			香港四照花( <i>Dendrobenthamia hongkongensis</i> )	4.74		9.52	6.70	4.61
			狭叶润楠( <i>Machilus rehderi</i> )	8.95		6.45	1.72	5.26
			翅荚香槐( <i>Cladrastis platycarpa</i> )	6.00		5.20	2.70	3.54
			香叶树	8.11		4.96	1.25	3.70
			轮叶木姜子	6.11		4.61	1.52	4.14
			云贵鹅耳枥( <i>Carpinus pubescens</i> )	5.37		4.31	2.50	6.20
			裂果卫矛( <i>Euonymus dielsianus</i> )	9.72		4.11	2.95	1.84
			南天竹	19.57		3.18	1.06	1.43
			革叶铁榄( <i>Sinosideroxylon wightianum</i> )	17.90		2.70	0.98	0.93
			其他 71 种					
漏斗	566	5	青冈栎	11.13	4 200	23.37	6.04	9.21
			四照花	8.95		8.09	3.38	7.34
			狭叶润楠	14.21		7.70	1.01	4.27
			轮叶木姜子	8.35		4.45	2.40	3.15
			香港四照花	3.88		3.75	2.98	3.44
			齿叶黄皮( <i>Clausena dumiana</i> )	5.47		3.60	0.97	2.64
			黄梨木	3.28		3.56	4.13	5.12
			皱叶海桐( <i>Pittosporum crispulum</i> )	8.64		3.37	4.28	1.93
			革叶铁榄	14.58		3.32	1.54	1.44
			南天竹	17.12		3.30	0.97	1.61
			其他 65 种					

## 2.2 凋落物的收集与测定

2.2.1 年凋落物归还量测定 按照“梅花形”五点法在每个样地距离地面 0.5 m 处,布置 5 个接收面积为 1 m×1 m 的凋落物收集器,从 2018 年 12 月—2019 年 12 月,每月收集凋落物 1 次,收集 12 个月。将凋落物分成树叶、枝、花果和碎屑 4 组分,于 80℃将各组分凋落物烘干至恒重并称重,总计各类凋落物量和年凋落物量。

2.2.2 凋落物层现存量的测定 为了避免偶然性,分别于 2019 年 1、4、7、10 月 4 次进行凋落物和土壤取样,取 4 次采样测定的平均值作为最终测定结果。在上述设置的 9 个典型样地中,按照随机加局部控制的原则,分别进行 5 个重复的凋落物和土壤样品采集,每个重复样方大小为 1 m<sup>2</sup>,根据地表凋落物

的分解特征和结构<sup>[16]</sup>,分别进行未分解层(L 层)、半分解层(F 层)、已分解层(Y 层)3 个层次的采样:L 层,厚度 0~3 cm,颜色无明显变化,叶形结构较完整的凋落物;F 层,中层 3~5 cm 呈无完整结构,呈半破碎状的凋落物;Y 层,5~7 cm 碎屑状的凋落物。将采集的凋落物样品进行编号保存,带回实验室进行鲜重测定,于 70℃的烘箱中烘干至恒重并计算含水率,估算样地内凋落物各分解层现存量。

2.2.3 凋落物养分分析 取上述烘干后凋落物的样品粉碎过筛(100 目)进行养分元素含量测定。凋落物全 C 用重铬酸钾氧化-外加热法测定;全 N 用半自动凯氏定氮仪测定<sup>[17]</sup>。全 P 用硝酸-高氯酸消煮-钼锑抗比色法测定;全 K 采用硝酸-高氯酸消煮-火焰分光光度计法测定;全 Ca 和全 Mg 用硝酸-高

氯酸消煮-EDTA 滴定法测定<sup>[18]</sup>。

2.3 土壤的采集与测定

在上述重复样方内采用 A 型 3 点采样法,用环刀采集凋落物下方的 0~10 cm 的原状土,并将土样装入密封袋,用于测定土壤含水量和容重。另取部分自然风干土壤,磨细后过筛(100 目),测定土壤养分。

土壤全 C 和全 N 测定方法与凋落物测定相同;全 C 用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;全 K 采用氢氧化钠熔融-火焰分光光度计法;全 Ca 全 Mg 采用盐酸-硝酸-高氯酸消煮-EDTA 滴定法;土壤容重用环刀法测定;土壤 pH 值用 pH 计测定<sup>[17]</sup>,测定结果见表 2。

表 2 不同地形土壤养分及理化性质

Table 2 Soil nutrients and physical and chemical properties in different land forms

样地 类型	C /(g·kg <sup>-1</sup> )	N /(g·kg <sup>-1</sup> )	P /(g·kg <sup>-1</sup> )	K /(g·kg <sup>-1</sup> )	Ca /(g·kg <sup>-1</sup> )	Mg /(g·kg <sup>-1</sup> )	pH	容重 /(g·cm <sup>-3</sup> )	含水量 /%
坡地	56.04±10.91 c	4.96±1.01 b	1.10±0.36 ab	7.20±1.32 b	63.43±8.20 a	10.31±0.50 a	7.34±0.05 a	1.12±0.02 a	35.85±5.54 c
漏斗	120.22±10.13 a	8.06±0.86 a	1.14±0.38 a	6.22±1.78 b	53.25±15.57 a	9.19±0.17 a	7.19±0.06 b	0.99±0.03 c	51.30±2.37 a
槽谷	83.82±9.91 b	5.12±0.51 b	0.93±0.27 b	11.10±1.82 a	66.20±13.47 a	10.80±1.30 a	7.17±0.11 b	1.04±0.02 b	45.15±0.28 b

注:不同小写字母代表不同地形之间的差异显著(P<0.05)。

2.4 统计分析

2.4.1 凋落物层积累量、凋落物周转期、分解率  
凋落物积累量为凋落物现存量与年凋落物量的差值,计算公式为:

M=SL-L (5)

凋落物周转期和分解率计算公式为:

T=SL+L/L和K=1/T (6)

式中,M 为凋落物积累量/(g·m<sup>-2</sup>);SL 为凋落物现存量/(g·m<sup>-2</sup>);L 为年凋落物量/(g·m<sup>-2</sup>);T 为凋落物周转期/a;K 为凋落物分解率<sup>[19]</sup>。

2.4.2 凋落物层及各分解层养分元素储量和释放率  
凋落物层及各分解层养分元素储量计算公式为:

Dab=Wa×Cab/1000 (7)

式中,D<sub>ab</sub> 为 a 分解层凋落物 b 养分元素的储量/(kg·hm<sup>-2</sup>),W<sub>a</sub> 为 a 分解层凋落物现存量/(kg·hm<sup>-2</sup>),C<sub>ab</sub> 为 a 分解层凋落物 b 养分元素的含量/(g·kg<sup>-1</sup>)。

凋落物分解层的养分元素释放率计算公式为:

E<sub>i</sub>=M<sub>i</sub>/N<sub>i</sub> (8)

式中,E<sub>i</sub> 为未分解层(或半分解层)凋落物 i 种养分元素的释放率,已分解层不计算养分元素的释放率,因为已分解层凋落物分解转化为土壤有机物。M<sub>i</sub> 为凋落物未分解层与半分解层或半分解层与已分解层 i 种养分元素储量之差/(kg·hm<sup>-2</sup>),N<sub>i</sub> 为未分解层(或半分解层) i 种养分元素的储量/(kg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[20]</sup>。

利用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、LSD 多重比较、差异显著性检验(P<0.05)以及 Pearson 相关性分析。相关图例用 Graph Pad Prism6.0 软件进行绘制,数据均为

平均值±标准差。

3 结果与分析

3.1 凋落物层现存量及其分布特征

由表 3 可见,茂兰喀斯特森林不同地形森林凋落物层现存量存在显著差异,表现为坡地>槽谷>漏斗。坡地凋落物层现存总量分别约为漏斗和槽谷的 1.32 和 1.22 倍。同一地形不同分解层凋落物均存在显著差异,且均表现为已分解层>半分解层>未分解层,已分解层凋落物现存量最高,为凋落物层现存量的 48%~57.2%,约为半分解层的 1.89 倍,未分解层的 2.65 倍。表明地表凋落物层近 80%的凋落物处于半分解和已分解状态,1/2 以上的凋落物已经完全分解。不同地形凋落物年归还量以坡地最高,现存量以漏斗最高。3 种地形凋落物周转期 2.08~2.25 a,分解率 0.44~0.48,其中坡地凋落物周转期最短,分解率最大,漏斗凋落物周转期最长,分解率也最低。

3.2 凋落物层养分元素的含量

由图 1 可知,凋落物各养分元素含量均表现为:C>Ca>N>Mg>K>P,同一分解层不同地形之间,各养分元素的含量存在显著差异。3 种地形之间凋落物全 C、全 P、全 Ca 含量均值无显著差异,全 N、全 K、全 Mg 含量均值存在显著差异。其中,凋落物全 N 含量坡地和漏斗显著>槽谷,全 K 含量槽谷最大,全 Mg 含量坡地最大。

同一地形不同分解层之间,凋落物全 C、全 N、全 Ca 和全 Mg 含量存在显著差异,且均表现为未分解层>半分解层>全分解层,即全 C、全 N、全 Ca 和全 Mg 含量随凋落物分解程度加深而不断释放;全 K 含量随分解层变化规律不一致,且半分解层含量最低;全 P 含量随凋落物分解程度加深而逐渐累积。



表 3 不同地形凋落物层归还量、现存量、周转期及分解率

Table 3 The return amount, current stock, turnover period and decomposition rate of litters in different land forms

样地类型	凋落物现存量/(g·m <sup>-2</sup> )				归还量 (g·m <sup>-2</sup> )	现存量 (g·m <sup>-2</sup> )	周转期 /a	分解率
	未分解层	半分解层	已分解层	总计				
坡地	102.19±44.18 Ab (20.4)	143.10±43.74 Ab (28.6)	254.88±48.34 Aa (51.0)	500.17±105.34 A (100)	461.58	38.59	2.08	0.48
漏斗	73.68±7.46 Ac (19.5)	122.82±25.76 Ab (32.5)	181.40±25.92 Ba (48.0)	377.91±42.88 B (100)	302.63	75.28	2.25	0.44
槽谷	78.59±15.08 Ab (19.1)	97.07±19.74 Ab (23.6)	235.15±23.27 Aa (57.2)	410.81±30.66 AB (100)	356.53	54.28	2.15	0.46

注:括号内的数据为各分解层占总凋落物现存量的百分比/%,不同大写字母代表同一分解层不同地形之间的差异显著( $P<0.05$ ),不同小写字母代表同一地形不同分解层之间的差异显著( $P<0.05$ ),下同。

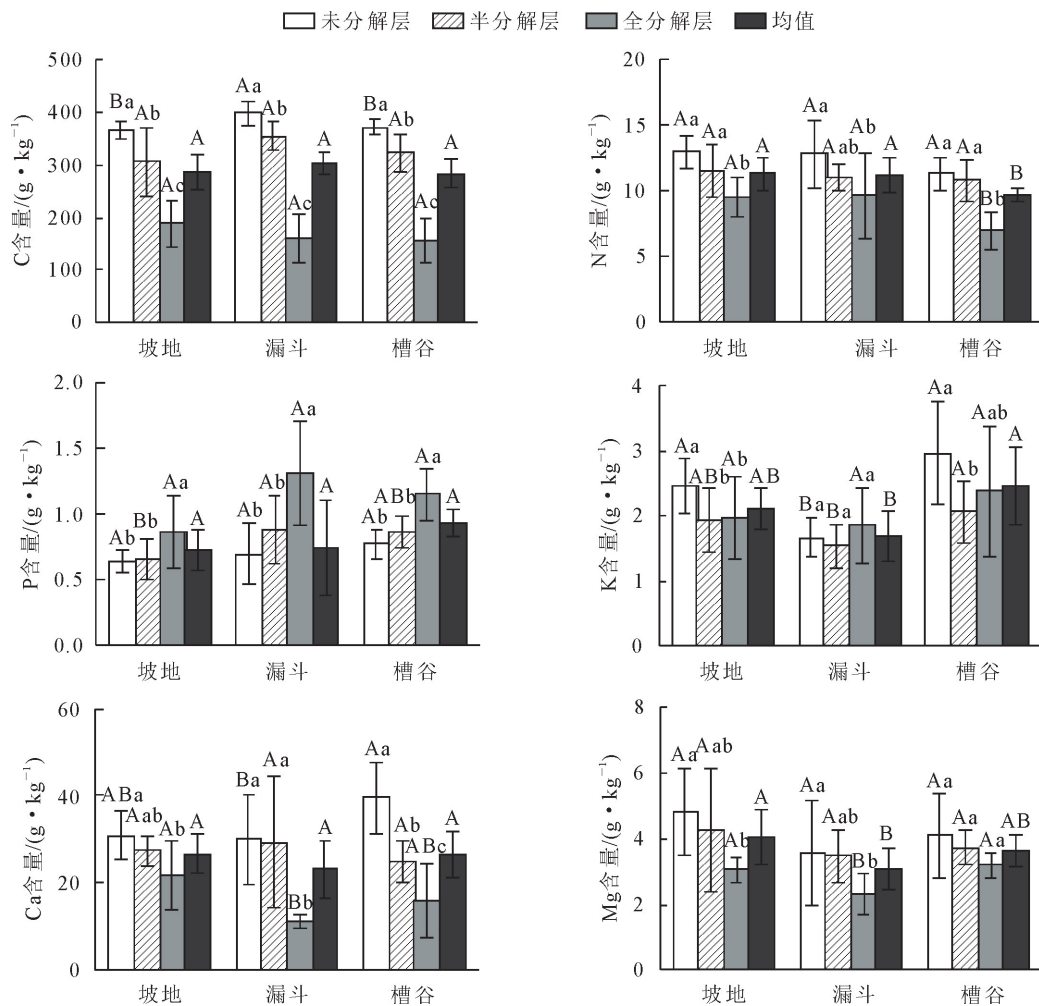


图 1 3 种地形不同分解层凋落物养分含量特征

Fig. 1 Nutrient content characteristics of litter in different decomposition layers of three land forms

### 3.3 凋落物层主要养分元素的储量及其释放率

由表 4 可知,凋落物层及各分解层养分元素储量均表现为: C>Ca>N>Mg>K>P,同一分解层不同地形之间,凋落物层及各分解层养分元素总储量、全 C、全 N、全 K、全 Ca、全 Mg 总储量存在显著差异,且均以坡地最高。同一地形不同分解层之间,凋落物养分总储量存在显著差异,坡地和槽谷表现为已分解层>半分解层>未分解层,而漏斗表现为半

分解层>已分解层>未分解层。总体趋势为凋落物层营养元素储量随分解程度加深而得到累积。

凋落物层主要营养元素释放速率全 C 最高,全 P 最低,坡地、漏斗和槽谷 3 种地形从未分解层到半分解层养分元素总释放率分别为 -17.70%、-49.57%、-4.64%,从半分解层到已分解层分别为 -13.61%、30.88%、-21.82%,漏斗的半分解层养分元素总释放率比未分解层明显增强,而槽谷则

明显减弱,坡地变化不明显。

3.4 凋落物与土壤理化性质的相关关系

凋落物与土壤理化性质之间的相关关系见表 5,凋落物现存量与土壤 C 含量和土壤含水量呈极显著负相关( $P<0.01$ ),与土壤容重呈极显著性正相关,与土壤 N 含量显著负相关( $P<0.05$ ),和土

壤 pH 显著正相关;凋落物 N 含量与土壤 K 含量极显著负相关;凋落物 P 含量与土壤 K 含量显著正相关;凋落物 K 含量与土壤 C、N、P 含量显著负相关,与土壤 K、Mg 含量显著正相关;凋落物 Mg 含量与土壤 C 含量显著负相关,与土壤容重极显著正相关,与土壤含水量极显著负相关。

表 4 不同地形凋落物层养分储量及释放特征

Table 4 Characteristics of nutrient reserves and release in litters of different land forms

样地类型	分解层次	养分元素储量/(kg·hm <sup>-2</sup> )						
		C	N	P	K	Ca	Mg	总计
坡地	未分解层	375.16(-16.94)Ab	13.27(-23.96)Ab	0.65(-38.46)Ab	2.50(4.80)Ab	31.58(-24.57)Ab	4.92(-23.98)Ab	428.08(-17.70)Ab
	半分解层	438.70(-9.39)Aab	16.45(-49.91)Ab	0.90(-35.56)Ab	2.38(-41.6)Ab	39.34(-41.18)Ab	6.1(-27.38)Aab	503.87(-13.61)Aab
	已分解层	479.91 Aa	24.66 Aa	1.22 Aa	3.37 Aa	55.54 Aa	7.77 Aa	573.47 Aa
	总计	1293.77 A	54.38 A	2.77 A	8.25 A	126.46 A	18.79 A	1504.42 A
漏斗	未分解层	293.58(-48.38)Bb	9.48(-39.56)Bb	0.52(-76.92)Bb	1.22(-54.92)Bb	21.51(-67.55)Bb	2.61(-63.98)Bb	328.92(-49.57)Bb
	半分解层	435.62(32.67)Aa	13.23(-35.83)Bb	0.92(-39.13)Ab	1.89(-74.60)Ab	36.04(44.42)Aba	4.28(2.10)Ba	491.98(30.88)Aa
	已分解层	293.3 Bb	17.97 Ba	1.28 Aa	3.30 Aa	20.03 Bb	4.19 Ba	340.07 Bb
	总计	1022.5 B	40.68 B	2.72 A	6.41 B	77.58 B	11.08C	1160.97 B
槽谷	未分解层	293.04(-7.03)Bb	8.91(-20.43)Bb	0.61(-40.98)Abb	2.33(14.16)Aa	31.02(22.57)Aa	3.21(-12.46)Bb	339.12(-4.64)Bb
	半分解层	313.63(-17.30)Bab	10.73(-55.19)Cb	0.86(-52.33)Ab	2.00(-29.00)Aa	24.02(-56.37)Ba	3.61(-74.52)Bb	354.84(-21.82)Bb
	已分解层	367.89 Ba	16.65 Ba	1.31 Aa	2.58 Ba	37.56 ABa	6.30 Aa	432.29 Ba
	总计	974.56 B	34.61 B	2.78 A	6.91 AB	92.6 B	13.12 B	1126.26 B

注:括号内的数据为元素释放率/%。

表 5 凋落物与土壤理化性质的相关性

Table 5 Correlation between litters and physical and chemical properties of soil

指标	土壤 C	土壤 N	土壤 P	土壤 K	土壤 Ca	土壤 Mg	土壤 pH	土壤容重	土壤含水量
凋落物现存量	-0.557 <sup>*</sup>	-0.415 <sup>*</sup>	0.091	0.042	0.199	0.124	0.456 <sup>*</sup>	0.542 <sup>**</sup>	-0.501 <sup>**</sup>
凋落物 C	0.220	0.187	0.04	-0.173	-0.135	-0.219	0.05	-0.18	0.198
凋落物 N	0.013	0.221	-0.089	-0.464 <sup>**</sup>	-0.123	-0.212	0.25	0.244	-0.173
凋落物 P	0.108	-0.053	-0.291	0.409 <sup>*</sup>	-0.227	0.115	-0.263	0.067	0.01
凋落物 K	-0.372 <sup>*</sup>	-0.398 <sup>*</sup>	-0.443 <sup>*</sup>	0.374 <sup>*</sup>	0.129	0.375 <sup>*</sup>	-0.034	0.25	-0.222
凋落物 Ca	-0.223	-0.261	-0.276	0.002	0.075	0.194	-0.049	0.24	-0.159
凋落物 Mg	-0.425 <sup>*</sup>	-0.333	-0.273	0.089	0.222	0.296	0.107	0.535 <sup>**</sup>	-0.540 <sup>**</sup>

注: \* 表示显著相关( $P<0.05$ ), \*\* 表示极显著相关( $P<0.01$ ); - 表示影响为负效应。

4 结论与讨论

茂兰喀斯特森林研究区域内地表凋落物层的现存量及养分特征受到地形和土壤理化性质显著影响。不同地形间凋落物层的现存量及养分特征差异明显,其中坡地森林地表凋落物现存量最大,周转期最短,分解率最高,养分储量最高。整体而言,虽然凋落物在不同地形和分解层的现存量和养分特征等方面存在差异,但基本维持在一定范围内,这与茂兰喀斯特森林人为干扰较少,森林植被以常绿落叶阔叶树种混交、灌木层发育完善等因素有关。此外,凋落物层现存量及养分特征受多个因子共同影响,今后可围绕多种因子的交互作用统一研究,以期更全面和深入地了解茂兰喀斯特森林养分循环机制。

本研究中凋落物层现存量为 0.430 kg·m<sup>-2</sup>,年平均归还量为 0.374 kg·m<sup>-2</sup>,其中凋落物层现存量与黄宗胜等<sup>[21]</sup>、赵畅等<sup>[22]</sup>在茂兰喀斯特地区

的研究结果相近,年平均归还量略低于钱正敏等<sup>[23]</sup>的研究结果。茂兰喀斯特森林凋落物现存量对比常态地貌较低,不符合随纬度增大凋落物现存量增加的规律<sup>[24]</sup>。年凋落物量也仅为同一地带性常绿阔叶林的 30%左右,反映了凋落物现存量受喀斯特地貌等非地带性因素的影响<sup>[24]</sup>。究其原因该区森林植被组成中常绿树种居多,落叶树种较少,加之土壤浅薄,土壤水分和养分匮乏,综合影响下形成了生物量较低的喀斯特山地植被,导致其凋落物产量和现存量均较低。

地形是影响喀斯特森林植物群落和土壤养分时空异质性的的重要因素,地形差异导致地表植被的物种组成和凋落物的归还量、分解速率等存在差异,进而影响凋落物层和各分解层现存量的分布。本研究对比 3 种地形森林凋落物现存量,发现坡地>槽谷>漏斗。坡地凋落物现存量最大,原因可能有两方面,一方面坡地水土流失严重,土壤浅薄且养分含量

低,土壤容重和 pH 较大,自然含水量低(表 2),土壤微生物对凋落物的分解受到制约;另一方面坡地光照条件较好,但土壤条件恶劣,不适宜植物幼苗生长,乔木以常绿树种轮叶木姜子和落叶树种翅荚香槐居多,且多为个体较大的成年树木(表 1),因而年凋落物归还量较大。漏斗地形土壤养分和理化条件好,环境相对稳定,但其地势低洼易出现积水现象,且光照较少,林内温度低,木本植物多为耐荫的常绿树种,且以幼苗和幼树居多(表 1),因而年凋落物归还量较少。此外,本研究发现,在相同的地形条件下,不同分解层凋落物现存量会随着凋落物分解程度的加深而增加,半分解和已分解层凋落物所占比重增加,该结果与陈金磊等<sup>[20]</sup>的研究结果一致。地表凋落物层的分解主要包括水分淋溶、光降解、自然碎化、土壤动物取食、微生物分解等过程<sup>[25]</sup>,茂兰喀斯特森林降水频繁,淋溶作用较强,致使未分解凋落物的碳水化合物及水溶性物质迅速流失和降解,而纤维素、木质素等物质由于难以分解,在半分解层和已分解层累积,致使凋落物分解速率下降,因此凋落物得以积累<sup>[26]</sup>。

研究表明,凋落物层各养分元素含量为  $C > Ca > N > Mg > K > P$ ,与刘璐等<sup>[27]</sup>对神农架常绿落叶阔叶混交林的现存凋落物的研究结果一致,但凋落物的 K、Ca、Mg 含量均较高,这与喀斯特森林植被适应土壤高 K、Ca、Mg 的生理机制有关。地表凋落物层养分含量区别于新鲜凋落物,新鲜凋落物养分含量主要由树种所决定,而地表凋落物层参与了森林地化循环等生态过程,其养分含量除受树种组成影响外,还与土壤、微气候等环境条件以及各养分元素在分解过程中的可淋溶性和生物固持等因素有关<sup>[27]</sup>。对比 3 种地形凋落物层养分含量,全 N、全 K、全 Mg 含量存在显著差异,坡地和漏斗凋落物全 N 含量显著 > 槽谷,而全 K 含量槽谷最大,全 Mg 含量坡地最大,引起该结果的主要原因可能是各地形树种组成的差异,导致凋落物组成和初始化学性质的差异,其次也可能与各地形生境条件差异所导致 N、K、Mg 元素淋溶和生物固持的程度不同有关。由于凋落物始终处于不断分解和再积累的过程中,因此按照其降解程度的差异进行分层研究,能够判断凋落物各养分元素伴随分解进程变化的总体趋势,即释放或累积。研究表明,凋落物各养分元素含量的变化与凋落物分解过程中各元素的释放模式有关<sup>[28]</sup>。本研究中,凋落物层全 C、全 N、全 Ca 和全 Mg 的含量随凋落物分解而呈现下降趋势;全 C 含量随着分解而下降,可能与微生物活动对凋落物有机物质的消耗有关。葛晓敏等<sup>[29]</sup>研究发现凋落物

N 含量随分解先富集后释放,而马文济等<sup>[30]</sup>研究发现凋落物 N 含量随着凋落物分解而下降,本研究与后者研究结果一致,这可能与茂兰喀斯特森林降雨频繁,淋溶作用较强有关。全 K 含量无明显变化趋势,但最低值均出现在半分解层,这可能与 K 元素易迁移的特性有关,即 K 元素或以离子状态维持在未分解凋落物中,或在凋落物组织结构被破坏后快速迁移至已分解层。P 含量受植被生长节律、雨水淋溶、微生物降解等因素影响,在凋落物分解过程中表现出不同的模式。在本研究中,凋落物全 P 含量随分解得到累积,与赵畅等<sup>[22]</sup>的研究相一致。

凋落物层及各分解层养分储量与其现存量和各养分元素的含量相关<sup>[28]</sup>。本研究中,凋落物层各养分元素储量表现为  $C > Ca > N > Mg > K > P$ ,分布情况显著受地形影响,坡地养分元素总储量最高。除 P 元素外其余各养分元素储量均以坡地为最高,这与坡地凋落物层现存量和养分含量相对高于其他地形有关。养分元素释放率能够反映凋落物在各分解层的分解速率<sup>[31-32]</sup>,本研究中 3 种地形凋落物层及分解层各养分元素释放率多为负值,表明凋落物养分元素的释放,滞后于凋落物的质量损失,凋落物层及各分解层营养元素释放率 C 最高, P 最低,表明 C 元素分解速率较大,而 P 元素分解缓慢,这可能与元素特性以及微生物活动有关。凋落物层养分总储量和各养分元素储量在各分解层之间,总体趋势表现为随分解程度加深而得到累积。致使凋落物层养分元素大量聚集在已分解层的现象,可能与凋落物在分解过程中产生的化合物对养分元素的螯合作用,使养分元素难以释放有关<sup>[33]</sup>。

## 参考文献:

- [1] 刘强,彭少麟.植物凋落物生态学[M].北京:科学出版社,2010:1-6.
- [2] 何琴飞,彭玉华,侯远瑞,等.珠江中游几种林地涵养水功能的调查分析[J].西北林学院学报,2017,32(1):48-53.  
HE Q F, PENG Y H, HOU Y R, *et al.* Investigation and analysis of water conservation function of several forest types in the middle reaches of Pearl River[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 48-53. (in Chinese)
- [3] 晏静,张国良,张瑞海,等.凋落物分解对节肢动物群落结构的影响[J].生物多样性,2016,24(11):1288-1295.  
YAN J, ZHANG G L, ZHANG R H, *et al.* The effect of flavaria bidentis litter decomposition on the structure of arthropod communities[J]. Biodiversity Science, 2016, 24(11): 1288-1295. (in Chinese)
- [4] 黄承才,葛滢,朱锦茹,等.浙江省马尾松生态公益林凋落物及与群落特征关系[J].生态学报,2005,25(10):2507-2513.
- [5] 廖良宁,卢姿瑾,李远发,等.桂西北细叶云南松天然林凋落物及土壤养分特征[J].西北林学院学报,2019,34(1):31-38.



- LIAO L N, LU Z J, LI Y F, *et al.* Litter and soil nutrient characteristics of *Pinus yunnanensis* var. *tenuifolia* natural forest in northwest Guangxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 31-38. (in Chinese)
- [6] 蒲嘉霖, 刘亮. 亚热带森林凋落物分解特征及水文效应[J]. 水土保持研究, 2019, 26(6): 165-170.
- PU J L, LIU L. Hydrology functions and decomposition characteristics of litter in subtropical forest[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(6): 165-170. (in Chinese)
- [7] 刘士玲, 郑金萍, 范春楠, 等. 我国森林生态系统枯落物现存量研究进展[J]. 世界林业研究, 2017, 30(1): 66-71.
- [8] 薛飞, 龙翠玲, 廖全兰, 等. 喀斯特森林凋落物对土壤养分及土壤酶的影响[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 449-458.
- XUE F, LONG C L, LIAO Q L, *et al.* An analysis of litter, soil, stoichiometry, and soil enzymes in karst forest[J]. Journal of Forest and Environment, 2020, 40(5): 449-458.
- [9] 刘颖, 韩士杰, 林鹿. 长白山4种森林凋落物分解过程中养分动态变化[J]. 东北林业大学学报, 2009, 37(8): 28-30.
- [10] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C:N:P 生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 335-343.
- [11] 刘中奇, 朱清科, 邝高明, 等. 半干旱黄土丘陵沟壑区封禁流域植被枯落物分布规律研究[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 20-24.
- [12] 吴邦利, 龙翠玲, 秦随涛. 茂兰喀斯特森林不同地形部位青冈种群结构与分布格局研究[J]. 广西植物, 2018, 38(1): 48-56.
- [13] 龙翠玲. 不同地形部位喀斯特森林物种多样性的比较研究——以贵州茂兰自然保护区为例[J]. 中国岩溶, 2007, 26(1): 55-60.
- [14] 秦随涛, 龙翠玲, 吴邦利. 地形部位对贵州茂兰喀斯特森林群落结构及物种多样性的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(7): 18-26.
- QIN S T, LONG C L, WU B L. Effects of topographic sites on the community structure and species diversity of karst forest in Maolan, Guizhou Province of southwestern China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2018, 40(7): 18-26. (in Chinese)
- [15] 郑鸾, 龙翠玲. 茂兰喀斯特森林不同地形土壤生态化学计量特征[J]. 南方农业学报, 2020, 51(3): 545-551.
- [16] 张德强, 余清发, 孔国辉, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林凋落物层化学性质的研究[J]. 生态学报, 1998, 18(1): 3-5.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016: 30-50.
- [18] 张万儒, 杨光滢, 屠星南, 等. 森林植物与森林枯枝落叶层全硅、铁、铝、钙、镁、钾、钠、磷、硫、锰、铜、锌的测定: LY/T 1270-1999, [S]. 北京: 中国林业科学研究院林业研究所, 1999: 283-289.
- [19] 郭婧, 喻林华, 方晰, 等. 中亚热带4种森林凋落物量、组成、动态及其周周期[J]. 生态学报, 2015, 35(14): 4668-4677.
- GUO J, YU L H, FANG X, *et al.* Litter production and turnover in four types of subtropical forests in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(14): 4668-4677. (in Chinese)
- [20] 陈金磊, 张仕吉, 李雷达, 等. 亚热带不同植被恢复阶段林地凋落物层现存量和养分特征[J]. 生态学报, 2020, 40(12): 1-14.
- CHEN J L, ZHANG S J, LI L D, *et al.* Stock and nutrient characteristics of litter layer at different vegetation restoration stages in subtropical region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12): 1-14. (in Chinese)
- [21] 黄宗胜, 符裕红, 喻理飞. 喀斯特森林植被自然恢复中凋落物现存量及其碳库特征演化[J]. 林业科学研究, 2013, 26(1): 8-14.
- [22] 赵畅, 龙健, 李娟, 等. 茂兰喀斯特原生林不同坡向及分解层的凋落物现存量和养分特征[J]. 生态学杂志, 2018, 37(2): 295-303.
- ZHAO C, LONG J, LI J, *et al.* Litter stock and nutrient characteristics of decomposing litter layers in Maolan Karst primary forest in different slope directions[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(2): 295-303. (in Chinese)
- [23] 钱正敏, 冉景丞, 容丽, 等. 茂兰喀斯特森林凋落物量动态研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(8): 3485-3487.
- [24] 俞国松, 王世杰, 容丽, 等. 茂兰喀斯特森林主要演替群落的凋落物动态[J]. 植物生态学报, 2011, 35(10): 1019-1028.
- [25] 李强, 周道玮, 陈笑莹. 地上枯落物的累积、分解及其在陆地生态系统中的作用[J]. 生态学报, 2014, 34(14): 3807-3819.
- [26] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 等. 森林凋落物分解研究进展[J]. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.
- GUO J F, YANG Y S, CHEN G S, *et al.* A review on litter decomposition in forest ecosystem[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(4): 93-100. (in Chinese)
- [27] 刘璐, 赵常明, 徐文婷, 等. 神农架常绿阔叶混交林凋落物养分特征[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7611-7620.
- LIU L, ZHAO C M, XU W T, *et al.* Litter nutrient characteristics of mixed evergreen and deciduous broadleaved forests in Shennongjia, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7611-7620. (in Chinese)
- [28] 施昀希, 黎建强, 陈奇伯, 等. 滇中高原5种森林类型凋落物及营养元素储量研究[J]. 生态环境学报, 2018, 27(4): 617-624.
- SHI Y X, LI J Q, CHEN Q B, *et al.* Litterfall accumulation and nutrient content in five forest ecosystems in central Yunnan Plateau[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2018, 27(4): 617-624. (in Chinese)
- [29] 葛晓敏, 唐罗忠, 王瑞华, 等. 杨树人工林生态系统凋落物生物量及其分解特征[J]. 生态环境学报, 2017, 26(9): 1457-1464.
- [30] 马文济, 赵延涛, 张晴晴, 等. 浙江天童常绿阔叶林不同演替阶段地表凋落物的 C:N:P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(8): 833-842.
- [31] 钟国辉, 辛学兵. 西藏色季拉山暗针叶林凋落物层化学性质研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(1): 167-169.
- [32] 丛健. 开敞度调控对人工红松阔叶林土壤理化性质的影响[J]. 森林工程, 2016, 32(5): 1-6.
- [33] HOBBIE S E, EDDY W C, BUYARSKI C R, *et al.* Response of decomposing litter and its microbial community to multiple forms of nitrogen enrichment[J]. Ecological Monographs, 2012, 82(3): 389-405.