

DOI: 10.5846/stxb201805211115

杨幸,王平,高大威,高宁宁,李璐杉,杨晓柳,钟乾娟.云南药山自然保护区黄背栎林和巧家五针松林生态化学计量特征.生态学报,2019,39(11):

Yang X, Wang P, Gao D W, Gao N N, Li L S, Yang X L, Zhong Q J. Ecological stoichiometry of Form. *Quercus pannosa* and Form. *Pinus squamata* in the Yaoshan Nature Reserve, Yunnan. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(11):

云南药山自然保护区黄背栎林和巧家五针松林生态化学计量特征

杨 幸¹, 王 平^{1,*}, 高大威¹, 高宁宁¹, 李璐杉¹, 杨晓柳¹, 钟乾娟²

1 云南师范大学旅游与地理科学学院, 昆明 650500

2 云南药山国家级自然保护区管护局, 昭通 654600

摘要:以云南药山自然保护区黄背栎林和巧家五针松林的 4 块样地为研究对象,旨在揭示这 2 种森林生态系统营养元素含量状况和土壤养分的供给能力。通过分析 4 块样地“叶片-凋落物-土壤”C、N、P 含量、生态化学计量特征及其相关性,结果表明:(1)不同样地同一组分的 C、N 含量差异显著,P 含量差异不显著,同一样地各组分间 C、N 含量差异显著,均为叶片>凋落物>土壤,P 含量则为叶片>土壤>凋落物;(2)不同样地叶片 C:P、N:P 比值和凋落物与土壤 C:N 比值差异不显著,其余指标差异均显著。同一样地叶片、凋落物、土壤的 C:N、C:P、N:P 比值差异显著,均为凋落物>叶片>土壤;(3)黄背栎林叶片-土壤 C 含量、C:P 比值和凋落物-叶片 N:P 比值呈极显著或显著相关,巧家五针松林凋落物-叶片 C、N 含量和叶片-土壤 P 含量、C:N、N:P 比值呈极显著或显著相关;(4)土壤 N 元素缺乏是限制植物生长的主要因素,P 元素主要源于土壤矿物风化释放,而非生物小循环。

关键词:生态化学计量;叶片;凋落物;土壤;药山自然保护区

Ecological stoichiometry of Form. *Quercus pannosa* and Form. *Pinus squamata* in the Yaoshan Nature Reserve, Yunnan

YANG Xing¹, WANG Ping^{1,*}, GAO Dawei¹, GAO Ningning¹, LI Lushan¹, YANG Xiaoliu¹, ZHONG Qianjuan²

1 College of Tourism and Geographic Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China

2 Management and Protection Bureau of Yaoshan National Nature Reserve in Yunnan Province, Zhaotong 654600, China

Abstract: We aimed to elucidate the nutrient element content and soil nutrient supply capacity of two forest ecosystems—Form. *Quercus pannosa* and Form. *Pinus squamata*—in the Yaoshan Nature Reserve of Yunnan, by using four sample plots. The analysis of C, N, and P content; ecologic stoichiometry; and its correlation with “leaf-litter-soil” in the four sample plots revealed the following. (1) The content of C and N in the same component was significantly different, and the content of P was not significantly different. There were significant differences in the content of C and N among the components in the same sample plot, and it decreased in the following order leaf > litter > soil. The content of P decreased in the order leaf > soil > litter. (2) The C:P and N:P ratios of leaf, and the C:N ratio of litter and soil were not significantly different in the four sample plots, whereas, the other indicators were significantly different. The C:N, C:P, and N:P ratios of leaf, litter, and soil in the same land were significantly different, and decreased in the order litter > leaf > soil. (3) The leaf-soil C content and C:P ratio, and litter-leaf N:P ratio in the Form. *Q. pannosa* exhibited highly significant or significant

基金项目:中央财政林业国家级自然保护区补助资金项目

收稿日期:2018-05-21; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: ynwangping@163.com

correlation. There was highly significant or significant correlation between the litter-leaf C and N content, leaf-soil P content, and C:N and N:P ratios in the Form. *P. squamata*. (4) The lack of soil N is the main factor limiting plant growth. Phosphorus is mainly derived from soil mineral weathering, rather than the short-term biological cycle.

Key Words: ecological stoichiometry; leaf; litter; soil; Yaoshan Nature Reserve

随着现代生态学的快速发展,生态化学计量学已成为生态研究的热点问题^[1],它结合了生态学和化学计量学的基本原理,是研究生态系统能量平衡、多重化学元素(通常是 C、N、P)平衡以及元素平衡对生态交互作用影响的一种理论^[1-2]。生态化学计量学研究最早主要是针对水生生态系统开展的,海洋生态学家和地球化学家应用化学计量学原理探讨养分限制和养分循环的研究已有 50 多年历史^[3-4],近年来,它为土壤-凋落物-植物之间的相互作用以及 C、N、P 元素的循环提供了新方向和新思路^[5-6]。C、N、P 是植物体内最基本的化学元素,影响植物的生长发育和各种生理生化过程^[7];植物凋落物通过分解和淋溶,将各种元素释放出来,归还土壤^[8];而土壤作为植物立地与生长的基础,其 C、N、P 含量直接影响着植物群落的组成、结构与生产力水平^[9]。刘兴诏等^[10]通过对比分析鼎湖山南亚热带森林初、中、后 3 个演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征,发现针叶林、混交林和季风常绿阔叶林的植物叶片和土壤中的 N:P 随着演替过程同步增加;王玲玲^[11]比较分析了秦岭地区 5 种林龄华北落叶松针叶、茎干和细根中 C、N、P 含量,发现其 N:P 比值均远远小于临界值 14,华北落叶松的生长主要受氮元素的限制,随着林龄的增加,土壤中的 C、N、P 含量有增加的趋势,但土壤中的 C:P、N:P 值远低于我国土壤 C:P、N:P 的平均值,得出该地区土壤氮素匮乏,植物的生长会受氮元素限制。

药山国家级自然保护区是金沙江流域川、滇、黔交界地区生物多样性最为丰富、保存最为完好的地区,被《中国生物多样性保护行动计划》列为“森林生态系统的优先保护区”,其主要保护对象为常绿阔叶林生态系统及其珍稀濒危动植物,其中,黄背栎林(Form. *Quercus pannosa*)和巧家五针松林(Form. *Pinus squamata*)均为重点保护群系^[12]。黄背栎林是该保护区寒温带山地硬叶栎林中的优势类型,分布面积大,是一类古老而极为珍稀的森林植被^[12];巧家五针松是国家 I 级重点保护植物,为该保护区特有种,目前自然种群数仅 34 株,其珍稀濒危程度堪称植物界的“大熊猫”^[13]。本文以保护区天然黄背栎林、天然巧家五针松林和人工栽培的巧家五针松林为研究对象,就其生态系统中“叶片-凋落物-土壤”的 C、N、P 含量及 C:N、C:P、N:P 生态化学计量特征、养分限制情况及其影响因素进行研究,旨在揭示 2 类森林生态系统养分循环规律和系统稳定机制。

1 研究区概况

药山自然保护区(27°08'54"—27°25'31"N, 102°57'35"—103°10'13"E,以下简称保护区)位于滇东北昭通市巧家县北部,药山为乌蒙山支脉,最高点轿子顶,海拔 4041.6 m,最低点在牛栏江与金沙江交汇处,海拔 517 m,发源于保护区的河流分别汇入金沙江和牛栏江^[12]。出露的岩石有玄武岩、砂岩、页岩、石灰岩等。从金沙江、牛栏江干热河谷到冷湿的轿子顶,气候类型由河谷南亚热带半干旱季风气候逐渐递变为山地寒温带湿润季风气候,植被由干热河谷稀树草丛、半湿润常绿阔叶林等逐渐递变为高寒灌丛、高寒草甸等,主要地带性土壤由燥红土带、红壤带逐渐递变为暗棕壤带、亚高山草甸土带^[12],是云南高原上山地气候、植被、土壤垂直带谱最完整的自然保护区。黄背栎林分布区,海拔 3000—3200 m,气候为山地寒温带湿润季风气候,冷凉、潮湿,土壤为棕壤。巧家五针松林分布区,海拔 2000—2300 m,气候为山地暖温带半湿润季风气候,温暖、半湿润,土壤为红壤^[12]。

2 研究方法

2.1 样地设置和样品采集

以云南大学生态学和地植物学研究所 2016 年在保护区挑选设置的 2 块天然黄背栎林固定样地(编号为

YS1、YS2)和1块天然巧家五针松林固定样地(编号为YS3)为研究对象,课题组在距离样地YS3约450 m的人工巧家五针松林(2008年种植,株距行距均为4 m,树龄10年,树高约8—9 m)分布区内,设置1块面积20 m×20 m的样地(编号为YS4),各样地环境信息详见表1和表2。

2018年4月下旬,在4块样地内,以S型随机设置6个3 m×3 m的样方,在3 m×3 m样方内随机选3个点,扒开凋落物层,按0—20 cm深度采集3点土样并混合,采用四分法按对角线取300 g装入土袋;同时收集地面未分解的优势树种凋落物,采集长势较好的优势树种向阳的完整叶片。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample plots

样地编号 Sample number	地点 Place	经纬度 latitude and longitude	样方大小 Sample size	海拔 Elevation/m	坡向 Slope aspect	群系 Formation	总盖度 Total coverage/%	森林类型 Forest type
YS1	东坪镇道角村小羊棚子	27°16'51"N 103°0'6"E	30 m×30 m	3070	NE63°	黄背栎林	85	天然林
YS2	药山镇大村村蔓菁地	27°12'44.32"N 103°6'5.69"E	30 m×30 m	3185	SE20°	黄背栎林	90	天然林
YS3	白鹤滩镇杨家湾村樟木箐	26°52'5"N 103°0'42"E	30 m×30 m	2250	SW70°	巧家五针松林	80	天然林
YS4	白鹤滩镇杨家湾村窝档	26°52'3"N 103°0'31"E	20 m×20 m	2089	NE10°	巧家五针松林	65	人工林

表2 样地土壤基本信息

Table 2 Basic information on soil sample plots

样地编号 Sample number	土类 Soil type	枯落物厚度 Litter thickness/cm	表土层厚度 Topsoil thickness/cm	母岩 Mother rock	母质 Soil parent materials	pH	自然含水量 Natural moisture content/%	黏粒含量 Clay content/%
YS1	棕壤	1—2	28(Ah)	粉砂岩	残积物	4.7	55.74	9.80
YS2	棕壤	2—3	22(Ah)	玄武岩	残积物	5.6	46.93	2.23
YS3	红壤	2—3	21(Ah)	玄武岩	残坡积物	6.1	9.57	5.24
YS4	红壤	无明显	20(Ap)	玄武岩	残积物	6.0	11.01	4.20

Ah指自然土壤的表层腐殖质层;Ap指耕作土壤的表土层

2.2 样品分析

将野外采集的叶片、凋落物和土壤样品带回实验室,叶片和凋落物经105℃杀青10 min后,放入65℃的烘箱烘干至恒重,用植物粉碎机粉碎,过100目筛,用于C、N、P含量测定;土样按照《土壤理化分析与剖面描述》^[14]中的要求,置于阴凉处风干,去除动植物残体、石块等,研磨过60目土壤筛,制成粒径0.25 mm待试土样,用于测定土壤C、N、P含量。采用重铬酸钾-油浴加热法^[14]测定叶片、凋落物和土壤C含量;采用浓H₂SO₄消煮-凯式定氮法^[14]测定叶片、凋落物和土壤N含量;采用钒钼黄比色法^[15]测定叶片和凋落物P含量;采用钼锑抗比色法测定土壤P含量^[14]。

2.3 数据分析

采用Excel 2010对数据进行初步处理,再利用SPSS 22.0对4块样地叶片-凋落物-土壤的C、N、P含量及C:N、C:P、N:P生态化学计量特征进行单因素方差分析(One-way ANOVA),并采用LSD法作多重比较分析($\alpha=0.05$);最后对叶片-凋落物-土壤的C、N、P含量及C:N、C:P、N:P生态化学计量特征进行Pearson相关性分析。

3 结果与分析

3.1 叶片-凋落物-土壤C、N、P含量特征

图1所示,4块样地叶片、凋落物、土壤C含量范围分别是475.29—545.86、406.92—512.78、28.27—

129.06 g/kg, 叶片和凋落物 C 含量均为 $YS4 > YS3 > YS2 > YS1$, 并且差异显著 ($P < 0.05$); 土壤 C 含量为 $YS2 > YS1 > YS3 > YS4$, $YS1$ 和 $YS3$ 土壤 C 含量接近, 差异不显著 ($P > 0.05$), 其他样地间差异显著 ($P < 0.05$)。叶片、凋落物、土壤 N 含量分别为 2.557—3.267、2.24—3.08、0.31—1.053 g/kg, 叶片 N 含量 $YS4 > YS1 > YS2 > YS3$, 样地间差异不显著 ($P > 0.05$); 凋落物 N 含量 $YS4 > YS2 > YS1 > YS3$, 样地间差异显著 ($P < 0.05$); 土壤 N 含量 $YS2 > YS1 > YS3 > YS4$, 与土壤 C 含量显著性变化一致。 $YS4$ 土壤 C、N 含量偏低, 总盖度约 65%, 几乎无灌丛和杂草, $YS2$ 土壤 C、N 含量最高, 总盖度 90%, 枯落物层 (约 2 cm) 和腐殖质层 (26 cm) 比其他样地丰厚。叶片、凋落物、土壤 P 含量分别为 1.231—1.983、0.736—1.033、1.209—1.397 g/kg, 叶片 P 含量 $YS3 > YS2 > YS1 > YS4$, 样地间差异不显著 ($P > 0.05$); 凋落物 P 含量 $YS2 > YS4 > YS3 > YS1$, $YS4$ 和 $YS2$ 样地间差异不显著 ($P > 0.05$), 样地土壤 P 含量基本一致, 差异不显著 ($P > 0.05$)。4 块样地组分间 C、N、P 含量差异显著 ($P < 0.05$), 同一块样地组分间 C、N 含量显著性均为叶片 > 凋落物 > 土壤。

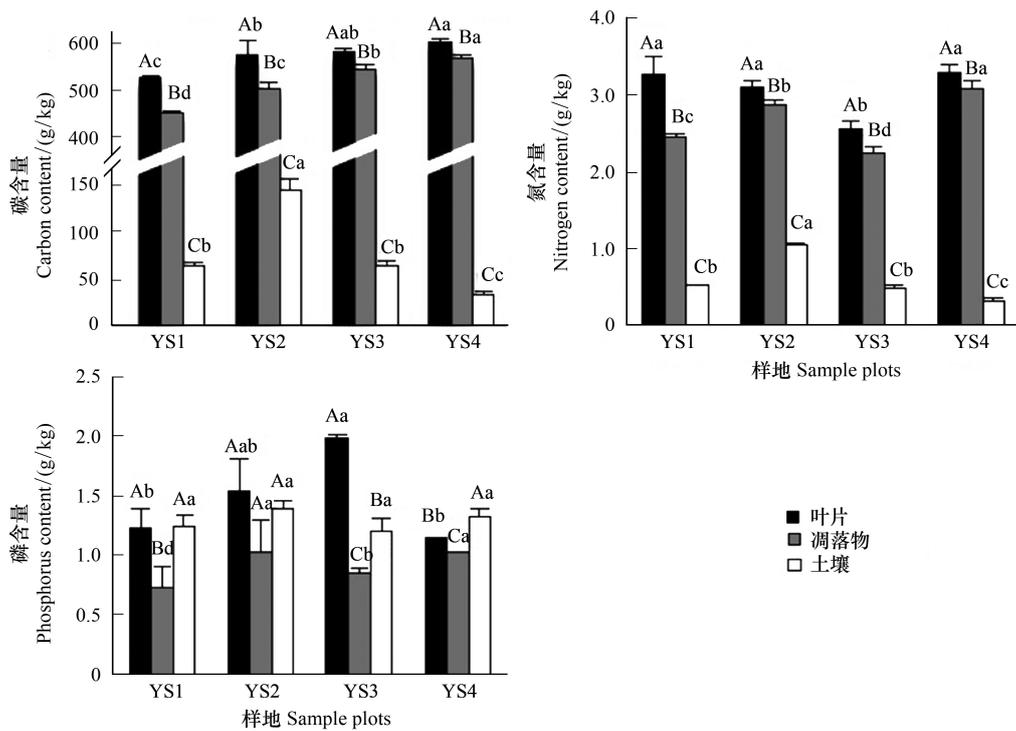


图1 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 含量

Fig.1 Leaf-litter-soil C, N, P contents

不同大写字母表示同一块样地不同组分之间差异显著;小写字母表示不同样地同一组分之间差异显著 ($P < 0.05$)

3.2 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 化学计量比特征

图2所示,4块样地叶片、凋落物、土壤的 C:N 范围分别为 145.52—206.39、158.69—219.73、91.91—122.46, 叶片 C:N 比值 $YS3 > YS2 > YS4 > YS1$, $YS4$ 和 $YS2$ 间差异不显著 ($P > 0.05$); 凋落物 C:N 比值 $YS3 > YS1 > YS4 > YS2$, $YS1$ 和 $YS4$ 间差异不显著 ($P > 0.05$); 土壤 C:N 比值 $YS3 > YS2 > YS1 > YS4$, 样地间差异不显著 ($P > 0.05$)。叶片、凋落物、土壤 C:P 比值分别为 265.47—474.25、440.75—576.53、21.24—90.00, 叶片 C:P 比值 $YS4 > YS1 > YS2 > YS3$, 样地间差异不显著 ($P > 0.05$); 凋落物 C:P 比值 $YS3 > YS1 > YS4 > YS2$, 样地间差异显著 ($P < 0.05$); 土壤 C:P 比值 $YS2 > YS3 > YS1 > YS4$, $YS1$ 和 $YS3$ 间差异不显著 ($P > 0.05$)。叶片、凋落物、土壤 N:P 比值分别为 1.29—2.86、2.62—3.33、0.23—0.74, 叶片 N:P 比值 $YS4 > YS1 > YS2 > YS3$, 样地间差异不显著 ($P > 0.05$); 4 块样地凋落物和土壤 N:P 比值大小和显著性差异与 C:P 一致。除了 $YS2$ 的 C:N 比值, 同一块样地各组分间 C:N、C:P、N:P 比值差异显著 ($P < 0.05$), 均为凋落物 > 叶片 > 土壤。

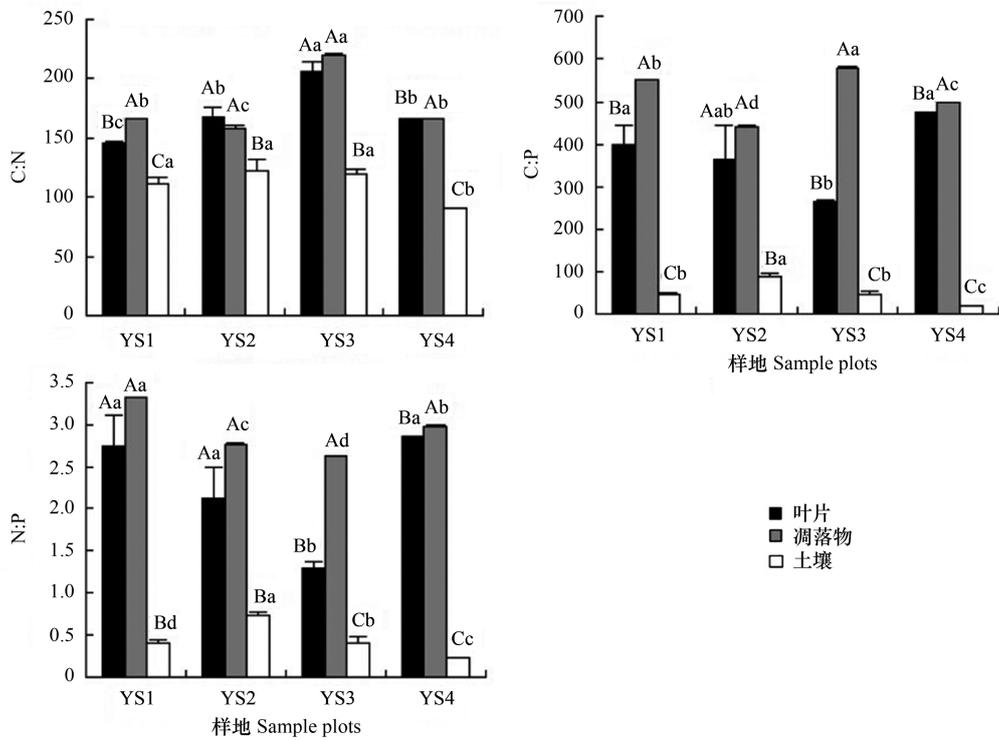


图2 叶片-凋落物-土壤化学计量比特征

Fig.2 Leaf-litter-soil stoichiometry characteristics

不同大写字母表示同一组内不同样地之间差异显著;小写字母表示不同样地同一组内不同组分之间差异显著 ($P < 0.05$)

3.3 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 含量及化学计量比的相关性

从表 3 可以看出:YS1 叶片-土壤 C 含量为极显著负相关 ($P < 0.01$),凋落物-土壤 N 含量、凋落物-叶片和

表 3 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 含量及化学计量比的相关性分析

Table 3 Relationships of leaf-litter-soil C, N, P contents and their stoichiometry

指标 Indicators	组分 Component	YS1	YS2	YS3	YS4
C	凋落物-叶片	-0.413	0.457	-0.779 *	0.913 **
	凋落物-土壤	0.448	-0.021	-0.910 **	-0.413
	叶片-土壤	-0.912 **	0.714 *	0.779 *	-0.413
N	凋落物-叶片	0.413	0.874 *	-0.787 *	-0.914 **
	凋落物-土壤	0.817 *	0.125	-0.779 *	-0.413
	叶片-土壤	0.169	-0.019	0.913 **	0.413
P	凋落物-叶片	0.825 *	0.172	0.417	0.158
	凋落物-土壤	0.332	-0.913 *	0.413	-0.308
	叶片-土壤	0.668 *	-0.180	0.916 **	-0.901 *
C:N	凋落物-叶片	0.413	0.145	0.898 *	-0.185
	凋落物-土壤	0.218	-0.272	0.892 *	-0.388
	叶片-土壤	-0.586	0.824 *	0.912 **	0.889 *
C:P	凋落物-叶片	0.845 *	-0.154	-0.908 *	0.159
	凋落物-土壤	0.476	-0.585	-0.900 *	-0.608
	叶片-土壤	0.738 *	0.794 *	0.911 **	0.580
N:P	凋落物-叶片	0.841 *	-0.893 *	-0.489	0.815 *
	凋落物-土壤	0.768 *	0.272	-0.425	0.696 *
	叶片-土壤	0.900 *	-0.450	0.910 **	0.888 *

* 表示在 0.05 水平上显著相关 ($P < 0.05$), ** 表示在 0.01 水平上显著相关 ($P < 0.01$)

叶片-土壤 P 含量、C:P 及 N:P 比值均呈显著正相关 ($P < 0.05$), 其他组分间含量和比值相关性不显著 ($P > 0.05$); YS2 叶片-土壤 C 含量及 C:N、C:P 比值为显著正相关 ($P < 0.05$), 凋落物-叶片 N 含量和 N:P 比值显著相关 ($P < 0.05$) 凋落物-土壤 P 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$); YS3 叶片-土壤 C、N、P 含量及 C:N、C:P、N:P 比值均呈极显著正相关 ($P < 0.01$), 凋落物-叶片和凋落物-土壤 C、N 含量及 C:P 比值均呈显著负相关 ($P < 0.05$); YS4 凋落物-叶片 C、N 含量及 N:P 比值和叶片-土壤 P 含量及 C:N、N:P 比值为显著相关 ($P < 0.05$)。

4 讨论

4.1 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 含量

保护区 4 块样地叶片 C 含量均高于全球植物叶片 C 含量的平均值 (464 g/kg), N 含量低于全球和中国叶片 N 元素的平均值 (20.09、20.2 g/kg), 除了 YS3 叶片 P 含量高于全球和中国叶片的平均含量 (1.77、1.46 g/kg) [16-18], 其他均低于全球叶片 P 含量。4 块样地叶片 C 含量巧家五针松林 (535.94 g/kg) > 黄背栎林 (497.35 g/kg), 因为针叶林具有特殊的养分获取方式, 其各器官平均 C 含量高于阔叶林的 1.6%—3.4% [19-20]。通常 C 不是植物生长的限制元素, C 在大多数植物体内含量很高且变异较小 [21], YS1 叶片 C 含量显著低于 YS2, 这与 YS2 土壤 C 含量显著高于 YS1 有关, YS3 和 YS4 叶片 C 含量差异较小。叶片 N 含量 YS3 (2.56 g/kg) < YS2 (3.10 g/kg) < YS1 (3.27 g/kg) < YS4 (3.29 g/kg), YS4 叶片 N 含量显著大于 YS3, 可能由于 YS4 之前是早耕地, 与施用氮肥有关。叶片 P 含量为 YS3 (1.98 g/kg) > YS2 (1.55 g/kg) > YS1 (1.23 g/kg) > YS4 (1.15 g/kg), 植物叶片 P 含量一方面反映了植物对 P 元素的利用效率, 另一方面反映土壤 P 元素的供应能力, 一般认为全磷含量相差不大的酸性土壤, pH 越高 (YS3 > YS4 > YS2 > YS1), 有效磷含量就越高, 另外土壤黏粒含量高低对有效磷也有影响, 土壤黏粒含量越高对磷吸附能力越强 (YS1 > YS3 > YS4 > YS2), 导致土壤供磷能力减弱 [22]。YS1 土壤 pH 最小为 4.7, 黏粒含量最高为 9.80%, 因此, 土壤供磷能力低于其他 3 块样地。

凋落物分解速率影响着生态系统中的养分循环速率, 它受气候、凋落物质量和土壤微生物的影响, 同种植物的凋落物, 温度越高, 降水越多, 土壤微生物越多, 凋落物分解越快, 养分元素淋溶越强烈, 输入土壤的有机质量越多 [8]。土壤 C、N 含量: YS2 > YS1、YS3 > YS4, 说明 YS2 凋落物分解速率强于 YS1, YS3 凋落物分解速率强于 YS4。黄背栎林凋落物 C、N、P 含量 (431.18、2.66、0.80 g/kg) 低于哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物的 C、N、P 含量 (500.12、15.22、0.89 g/kg) [23], N、P 含量低于全球木本植物凋落物 N、P 的平均含量 (10.9、0.85 g/kg) [24]。巧家五针松林凋落物 C、P 含量 (502.86、1.03 g/kg) 高于辽东山区落叶松林、红松林、油松林凋落物的 C、P 含量 [25], N 含量 (2.66 g/kg) 低于辽东地区松林的凋落物 N 含量 [25] 和全球木本植物凋落物 N 的平均含量 (10.9 g/kg), P 含量高于全球凋落物平均值 (0.85 g/kg) [24]。

样地土壤 C、P 含量均高于中国陆地土壤平均含量 (24.56、0.78 g/kg), N 含量低于中国陆地土壤平均含量 (1.88 g/kg) [26], 土壤出现 N 元素供应不足的现象, 与当地植被叶片缺 N 元素一致。已有研究表明: 表层土壤有机质和总氮与年均温呈线性负相关 (不考虑土壤类型), 与黏粒含量呈线性正相关 [27]。巧家五针松林样地处于山地暖温带, 黄背栎林样地处于山地寒温带, 因此巧家五针松林样地土壤 C、N 含量低于黄背栎林样地; 黏粒含量: YS1 > YS2, YS3 > YS4, YS3 土壤 C、N 含量显著高于 YS4, 而 YS2 土壤 C、N 含量显著高于 YS1。在野外, 根据我们实地挖掘的土壤剖面可以看出, 腐殖质层厚度: YS1 (28 cm) > YS2 (22 cm), 并且 YS1 土壤剖面心土层有明显的腐殖质聚积现象, YS 心土层未出现明显的腐殖质聚积现象, 土壤 (0—20 cm) 自然含水量: YS1 (55.74%) > YS2 (46.93%), 因此可以推断出: YS1 表层土壤 C、N 含量显著低于 YS2 与降水对土壤有机质的向下淋移有关。

4.2 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 化学计量比特征

叶片的 C:N 和 C:P 可以反映植物所能同化 C 的能力、营养利用的效率以及植物的生长速率 [28], 一定程度上也反映了土壤中 N 和 P 元素的供应状况 [21]。人工巧家五针松针叶 C:P、N:P 比值显著高于天然巧家五针松林, 与学者对秦岭中幼龄华北落叶松针叶随林龄的增加 C:P、N:P 比值降低一致 [29]。已有研究表明, 植

物叶片 N:P 小于 14 时,植物生长受到氮素限制;而 N:P 大于 16 时,植物生长受到磷素限制;介于 14 与 16 之间,植物受氮素、磷素共同限制^[30]。4 块样地叶片 N:P 均小于 14,表明 N 元素是该地区的主要限制因素。

凋落物 C:N、C:P 均为 YS3>YS1>YS4>YS2,总体来看巧家五针松 C:N、C:P 比值(193.02、536.55)大于黄背栎林(162.39、496.82),表明巧家五针松林的碳蓄积能力较强,另有研究表明,N 控制着凋落物的分解速率,C:N 比值与凋落物分解速率呈反比关系^[8],表明黄背栎林凋落物的分解速率高于巧家五针松林。曾昭霞等^[21]认为,土壤 N、P 含量相对偏高,而植物的 N、P 养分再吸收率偏低的情况下,凋落物(C:N、C:P)>植物叶片>土壤。图 1 可以看出 4 块样地土壤 P 含量较高,因此得出,样地植物生长所需的 P 元素主要来源于土壤中岩矿风化所提供的养分,而非通过养分的再吸收利用来满足植物生长的需求。

土壤 C:N、C:P、N:P 比值为 YS2>YS3>YS1>YS4,研究表明 C:N 是土壤氮素矿化能力的标志,与土壤有机质分解速率呈反比关系^[31],YS3 与 YS4 处于暖温带,土壤矿化和有机质分解能力应强于 YS1 和 YS2,而表层土壤 C、N 含量主要来源于凋落物的分解淋溶,与凋落物的产量、质量及形态特征关系密切,一般针叶林的凋落物不易分解、矿化^[32]。YS4 土壤 C:N 比值(91.19)最低,与其他 3 块样地比值差异显著($p<0.05$),其他 3 块样地 C:N 比值差异不显著($p>0.05$),YS4 之前是早耕地,总盖度为 65%,林下灌丛草本稀少,无明显的枯落物层,因此土壤表层 C、N 含量均少。

4.3 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 含量及化学计量比的相关性

相关分析结果表明,黄背栎林植物叶片-土壤 C 含量、C:P 比值和凋落物-叶片 N:P 比值呈极显著或显著相关,巧家五针松林凋落物-叶片 C、N 含量和叶片-土壤 P 含量、C:N、N:P 比值呈极显著或显著相关,表明黄背栎和巧家五针松生长所需的营养元素主要从土壤中获取,而凋落物直接来源于叶片,其养分含量与叶片紧密相关,巧家五针松林凋落物-叶片的相关性比黄背栎林的好,表明黄背栎林下凋落物的腐解程度高。本研究黄背栎林和巧家五针松林叶片、凋落物及土壤之间的各指标相关性不同,毕建华等^[25]通过对比分析辽东山区不同森林类型生态化学计量特征,发现各指标在不同林型叶片、凋落物和土壤间的相关性也不同,而祁连山排露沟流域青海云杉林随着海拔(2900—3300 m)增加,叶片、凋落物和土壤 C:N 比两两均呈显著正相关($p<0.05$),叶片与凋落物及土壤与凋落物 C:P 比均呈显著负相关($p<0.05$)^[33],表明植被类型是影响生态化学比值的主要因子。天然巧家五针松林和人工巧家五针松林的叶片-凋落物 C 含量显著性相反,这可能与天然和人工巧家五针松自身的碳蓄积能力有关,其他指标针叶林基本呈显著负相关,可能与凋落物的分解和养分的再吸收率较高有关。

5 结论

通过对保护区 4 块样地叶片-凋落物-土壤 C、N、P 含量及生态化学计量特征进行研究,得出以下结论:

(1) 不同样地同一组分的 C、N 含量差异显著,P 含量差异不显著,同一样地各组间 C、N 含量差异显著,均为叶片>凋落物>土壤,P 含量则为叶片>土壤>凋落物。4 块样地土壤 N 含量均低于中国陆地土壤平均含量,其中 YS2 枯落物和腐殖质层比其他样地丰厚,且有机质向下淋移不明显,土壤 C、N 含量显著高于其他 3 块样地。

(2) 不同样地叶片 C:P、N:P 比值和凋落物与土壤 C:N 比值差异不显著,其余指标差异均显著,同一样地叶片、凋落物、土壤的 C:N、C:P、N:P 比值差异显著,均为凋落物>叶片>土壤。样地叶片 N:P 均小于 14,表明 N 元素缺乏是限制植物生长的主要因素,因此,合理施加氮肥可以提高该区域林木的生产力。土壤 P 含量均较高,且凋落物(C:N、C:P)>植物叶片>土壤,表明土壤 P 元素主要源于土壤矿物风化释放,而非生物小循环。

(3) 黄背栎林叶片-土壤 C 含量、C:P 比值和凋落物-叶片 N:P 比值呈极显著或显著相关,巧家五针松林凋落物-叶片 C、N 含量和叶片-土壤 P 含量、C:N、N:P 比值呈极显著或显著相关。

参考文献 (References):

- [1] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, Fagan W F, Markow T A, Cotter J, Harrison J F, Hobbie S E, Odell G M, Weider L. Biological stoichiometry from genes to ecosystems. *Ecology Letters*, 2010, 3(6): 540-550.
- [2] Zhang L X, Bai Y F, Han X G. Application of N:P stoichiometry to ecology studies. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(9): 1009-1018.
- [3] Zeng D H, Chen G S. Ecological stoichiometry: a science to explore the complexity of living systems. *Acta Phytocological Sinica*, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [4] Schindler D W. Balancing planets and molecules. *Nature*, 2003, 423(6937): 225-226.
- [5] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. *生态学报*, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [6] 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. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [7] Reich P B, Tjoelker M G, Machado J L, Oleksyn J. Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants. *Nature*, 2006, 439(7075): 457-461.
- [8] 刘强, 彭少麟. 植物凋落物生态学. 北京: 科学出版社, 2010.
- [9] 邵宜晶, 俞梦笑, 江军, 曹楠楠, 褚国伟, 闫俊华. 鼎湖山 3 种演替阶段森林土壤 C、N、P 现状及动态. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(6): 523-530.
- [10] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [11] 王玲玲. 华北落叶松人工林碳氮磷生态化学计量特征及土壤肥力变化研究[D]. 杨陵: 西北农林科技大学, 2016.
- [12] 彭明春, 王崇云, 党承林, 张智英, 王平, 王金亮, 陆树刚, 李玉辉, 江望高, 胡志浩, 胡健生, 何兆荣. 云南药山自然保护区生物多样性及保护研究. 北京: 科学出版社, 2006: 3-4, 34-34.
- [13] 贺佳飞. 云南省有效保护珍稀濒危植物巧家五针松. *云南林业*, 2013, 34(3): 17-17.
- [14] 刘光崧. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996: 123-125, 14-155, 166-167.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 76-78.
- [16] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [17] 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.
- [18] Han W X, Fang J Y, Gao D L, Zhang Y. Leaf Nitrogen and Phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [19] 王希华, 黄建军, 阎恩荣. 天童国家森林公园常见植物凋落叶分解的研究. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 457-467.
- [20] 马文济, 赵延涛, 张晴晴, ARSHAD A, 史青茹, 阎恩荣. 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. *植物生态学报*, 2014, 38(8): 833-842.
- [21] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特森林植物—凋落物—土壤生态化学计量特征. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 682-693.
- [22] 张星星, 杨柳明, 陈忠, 李一清, 林燕语, 郑宪志, 楚海燕, 杨玉盛. 中亚热带不同母质和森林类型土壤生态酶化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(16): 5828-5836.
- [23] 鲁志云, 宋亮, 王训, 李玉武, 张一平, 沙丽清. 哀牢山森林凋落物与腐殖质及土壤的生态化学计量特征. *山地学报*, 2017, 35(3): 274-282.
- [24] Kang H Z, Xin Z J, Berg B, Burgess P J, Liu Q L, Liu Z C, Li Z H, Liu C J. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants. *Annals of Forest Science*, 2010, 67(8): 811-811.
- [25] 毕建华, 苏宝玲, 于大炮, 吴健, 曹琳琳, 代力民, 周莉. 辽东山区不同森林类型生态化学计量特征. *生态学杂志*, 2017, 36(11): 3109-3115.
- [26] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [27] 孙鸿烈. 生态系统综合研究(中国生态系统研究网络 20 年). 北京: 科学出版社, 2009: 270-272.
- [28] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 张志钧, 李忠文. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [29] 牛瑞龙, 高星, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 孙鹏跃, 白小芳. 秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2016, 36(22): 7384-7392.
- [30] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. *The Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [31] Don A, Schumacher J, Scherer-Lorenzen M, Scholten T, Schulze E D. Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites—implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma*, 2007, 141(3/4): 272-282.
- [32] 田茂洁. 土壤氮素矿化影响因子研究进展. *西华师范大学学报: 自然科学版*, 2004, 25(3): 298-303.
- [33] 赵维俊, 刘贤德, 金铭, 张学龙, 车宗玺, 敬文茂, 王顺利, 牛赟, 齐鹏, 李雯靖. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征. *土壤学报*, 2016, 53(2): 477-489.