

# 贵州月亮山5个优势树种叶片与 土壤生态化学计量特征

张亚冰<sup>1,4</sup>, 吕文强<sup>1</sup>, 周传艳<sup>1,2</sup>, 吴永贵<sup>4</sup>, 周少奇<sup>2,3</sup>

(1. 贵州省山地资源研究所, 贵阳 550001; 2. 华南理工大学 环境与能源学院, 广州 510640;

3. 贵州科学院, 贵阳 550001; 4. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025)

**摘要:**生态化学计量学是研究生态过程和生态作用中化学元素平衡的科学,对于揭示植物对营养元素的需要和土壤的养分供给能力具有十分重要的意义。以贵州省月亮山优势树种麻栎、枫香、木荷、马尾松、杉木为研究对象,对上层、中层及下层叶片以及群落土壤进行取样,测定C、N、P含量并分析生态化学计量学特征。结果表明:(1)贵州月亮山优势树种叶片C、N、P平均含量分别为 $(530.06 \pm 34.12)$  mg/g,  $(14.80 \pm 2.35)$  mg/g,  $(0.98 \pm 0.14)$  mg/g, 叶片C:N, C:P, N:P平均含量分别为 $(37.95 \pm 2.74)$ ,  $(572.9 \pm 34.5)$ ,  $(15.93 \pm 2.11)$ 。0—30 cm土壤C、N、P平均含量分别为 $(33.53 \pm 3.22)$  mg/g,  $(10.92 \pm 1.52)$  mg/g,  $(0.44 \pm 0.08)$  mg/g。(2)贵州月亮山5个优势树种上层、中层及下层叶片的碳、氮、磷及化学计量均不存在显著差异,表明叶位对叶片C、N、P含量未产生影响。(3)贵州月亮山落叶树种C、C:N, C:P显著小于常绿树种,N、P含量则显著大于常绿树种。(4)贵州月亮山非喀斯特森林群落0—20 cm土层C含量远低于同一纬度带的喀斯特森林,N含量远高于同一纬度带的喀斯特森林,而叶片C、N含量则相反。(5)本研究土壤C、N、P之间均表现出极显著正相关( $p < 0.01$ ),叶片C与土壤P表现出显著负相关( $p < 0.05$ ),其余均无相关关系。研究结果可为同纬度带喀斯特森林与非喀斯特森林对比研究提供科学基础。

**关键词:**生态化学计量学; 叶片; 土壤; 贵州月亮山

中图分类号:Q14;Q948

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2017)05-0182-07

## Stoichiometry Characteristics of Leaves and Soils of Five Dominant Tress Species in Yueliang Mountain of Guizhou

ZHANG Yabing<sup>1,4</sup>, LÜ Wenqiang<sup>1</sup>, ZHOU Chuanyan<sup>1,2</sup>, WU Yonggui<sup>4</sup>, ZHOU Shaoqi<sup>2,3</sup>

(1. Institute of Guizhou Mountain Resources, Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, 550001, China; 2. College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou, 510640, China; 3. Guizhou Academy of Sciences, Guiyang, 550001; 4. The College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**Abstract:**Stoichiometry is a scientific method of studying the balance of chemical elements in ecological interactions and processes, which provides a comprehensive approach for the study of elements in measuring relationship between biogeochemical cycle and the pattern of ecological processes, it is of great significance to reveal the demand of plant nutrition and the ability of soil nutrient supply. The forest ecosystem of the Yuelian Mountain in Guizhou is a non karst forest, which is typical and special in Guizhou Province. This research aimed to study the stoichiometric characteristics of leaves of 5 dominant tree species(*Quercus acutissima*, *Liquidambar formosana*, *Schima superba*, *Pinus massoniana*, *Cunninghamia lanceolat*) in different leaf positions and soils in their communities, which were of great significance for revealing the coupling relationship between vegetation and habitats. Taking the upper, middle and lower leaves of 5 dominant tree species and soils in their communities in the Yueliang Mountain of Guizhou, we analyzed the characteristics of ecological stoichiometry. The results showed that: (1) the average C, N, P contents of 5 dominant species in the

收稿日期:2016-08-12

修回日期:2016-09-04

资助项目:国家自然科学基金(31360123);国家重大科学研究计划项目(2013CB956701);中国科学院战略性科技先导专项子课题(XDA05050205)

第一作者:张亚冰(1990—),女,河南开封人,在读硕士,研究方向:森林生态化学计量学。E-mail:18302634895@163.com

通信作者:周传艳(1973—),女,贵州黄平人,研究员,主要从事恢复生态学与保育生态学研究。E-mail:chyzhou66@163.com

周少奇(1965—),男,湖南益阳人,教授,主要从事环境生物技术,水污染控制,固废资源化等研究。E-mail:fesqzhou@scut.edu.cn

Yueliang Mountain were  $530.06 \pm 34.12$  mg/g,  $14.80 \pm 2.35$  mg/g and  $0.98 \pm 0.14$  mg/g, respectively, the averages of C : N, C : P, and N : P were  $37.95 \pm 2.74$ ,  $572.9 \pm 34.5$  and  $15.93 \pm 2.11$ , respectively, the average contents of C, N and P in 0—30 cm soil layer was  $33.53 \pm 3.22$  mg/g,  $10.92 \pm 1.52$  mg/g and  $0.44 \pm 0.08$  mg/g, respectively; (2) the contents of C, N and P and stoichiometric ratios of 5 dominant species in the upper, middle and lower layers of tress were not significant, which means the leaf position does not affect C, N and P contents; (3) C, C : N, C : P of tree species were less than the evergreen tree species; (4) in 0—20 cm surface soil, the C, P contents of non karst forest of Yueliang Mountain were much lower than those in the same latitude zone of the karst forest, and the N content was much higher than that in karst forest; However, leaf C, N contents were opposite; (5) correlation analysis showed that soil C, N and P were significantly positively correlated, however leaf C and soil P were not significantly positively correlated. The results can provide the scientific basis for the comparative study of karst and non karst forests in the same latitude zone.

**Keywords:** stoichiometry; leaves; soil; Yueliang Mountain in Guizhou;

生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多种化学元素平衡的科学,它能揭示生态系统各组分养分比例的调控机制,是研究土壤—植物相互作用与碳、氮、磷循环的新思路<sup>[1-2]</sup>。目前,生态化学计量学的研究领域不断拓展,现已应用于包括森林演替与衰退、生态系统养分供应与需求的平衡、限制元素的判断、群落演替等研究,生态化学计量学理论不断得到丰富和验证<sup>[3]</sup>。C元素是植物体内结构性物质<sup>[4]</sup>,而N和P是各种蛋白质和遗传物质的重要组成元素。由于自然界中N和P元素供应往往受限,因此成为生态系统生产力的主要限制因素<sup>[5]</sup>。植物C : N : P比值反映了生态系统碳循环、氮磷元素平衡与制约关系<sup>[1]</sup>,生长快速的有机体通常具有较低的C : N和C : P比值<sup>[4]</sup>,叶片N : P比则可以作为对生产力起限制性作用的营养元素的指示剂<sup>[6]</sup>。因此,研究森林生态系统土壤—植物C, N, P循环及其化学计量特征具有十分重要的理论和现实意义。

近年来,国内学者就森林系统生态化学计量学开展了大量相关研究<sup>[7-11]</sup>,其中,贵州森林覆盖率高,树种资源丰富,区系成分复杂<sup>[12]</sup>,成为森林生态化学计量学研究的热点。刘兴诏等<sup>[7]</sup>对亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中N, P的化学计量特征进行了研究,蔡艳等<sup>[8]</sup>对峨眉山常绿阔叶林常绿和落叶物种叶片C, N, P进行了测定,旷远文等<sup>[9]</sup>对贵州普定喀斯特森林3种优势树种叶片元素含量特征进行了研究,罗绪强等<sup>[10]</sup>对茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征进行了测定,胡忠良等<sup>[11]</sup>对贵州喀斯特山区不同植被下土壤C, N, P含量和空间异质性进行了研究。但是,贵州作为中国南方喀斯特的中心,现有研究大都集中在喀斯特森林生态系统,而对其非喀斯特森林生态系统的研究报道甚

少。本文选取贵州非喀斯特典型森林月亮山地区5个优势树种,研究其叶片与土壤生态化学计量学特征,试图回答以下4个问题:(1)月亮山非喀斯特森林植物生态化学计量特征及其养分供应规律。(2)不同叶位叶片C, N, P含量及生态化学计量特征。(3)不同生活型植物生态化学计量特征。(4)喀斯特与非喀斯特地区植物—土壤养分含量比较分析。有助于了解月亮山非喀斯特森林养分供应规律,有利于探讨喀斯特森林与常态地貌森林养分循环的区别和联系,可为贵州省月亮山地区森林生态系统养分循环机制的深入研究奠定基础。

## 1 研究区概况

月亮山区地跨黔桂两省的榕江、从江、环江、荔波、三都、融水6县。月亮山主峰海拔1 490.3 m,相对高差1 100余米。地处亚热带北缘,植被区系属亚热带常绿落叶阔叶林。月亮山区气候温暖湿润,珍稀动物种类繁多,素有“物种基因库”之称。该研究采样区域( $108^{\circ}12' - 108^{\circ}32' E$ ,  $25^{\circ}42' - 25^{\circ}58' N$ )范围涉及贵州省榕江县西南部水尾乡、计划乡、古州乡和东江乡共4个乡的5个村(计埃村、水尾村、仁育村、马鞍村和四村)(表1),平均海拔800~900 m。年日照时数为1 193.6~1 312.6 h,年日照百分率为19%~27%。年平均气温15.7~12.1℃,年平均降水量1 211 mm,年平均相对湿度80%左右<sup>[13-14]</sup>

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集

以贵州省榕江县月亮山区5种植物群落麻栎林(*Quercus acutissima*)、枫香林(*Liquidambar formosana*)、木荷林(*Schima superba*)、马尾松林(*Pinus*

massoniana)和杉木林(*Cunninghamia lanceolat*)的土壤及其优势树种叶片为研究对象,于 2011 年 10 月依据地形设置 600 m<sup>2</sup>(20 m×30 m)~1 000 m<sup>2</sup>(20 m×50 m)的样地 21 个(基本概况见表 1)。在样地内设置 10 m×10 m 的小样方,分别在样地对角线不同位置,将优势树种树冠三等分后,分别在各层的东、南、西、北四个方位采集上层叶、中层叶、下层叶,多点采集组成混合样;在样地内挖掘土壤剖面,按照 0—10 cm,10—20 cm,20—30 cm 3 个层次,分别用环刀、土钻取样 3 个,充分混匀后,每个样品 500 g,装入自封袋带回,冷藏。

2.2 样品 C,N,P 含量测定

将采集的叶片样品带回实验室,洗去叶片灰尘、杂垢,于 105℃下杀青 10 min,80℃下烘干至恒重,用

植物粉碎机粉碎后,分析全碳、全磷、全氮含量;将采集的土壤样品于室内进行自然风干,挑除活体根系、碎石等杂物,磨细后过 0.15 mm 筛,用于土壤 C,N,P 含量的测定。叶片和土壤 C 含量的测定采用重铬酸钾外加热法;叶片和土壤 N 含量的测定采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>—H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 消煮,凯式定氮法;叶片 P 含量的测定采用钒钼黄比色法;土壤 P 含量的测定采用钼锑抗比色法<sup>[15]</sup>。

2.3 数据分析

各统计数据以平均值±标准误差表示。使用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 对数据进行整理和分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)法进行方差分析;对植物与土壤的元素化学计量学特征进行 Person 相关性分析。使用 Origin 8.5 进行图形绘制。

表 1 样地概况

编号	采样点	优势树种	经纬度	海拔/m	坡度/(°)	坡位	郁闭度/%
1	榕江县计划乡计埃村	麻栎	108°14′05.08″E,25°44′56.04″N	416	22	中坡	40
2	榕江县水尾乡水尾村	麻栎	108°13′48.07″E,25°43′00.90″N	618	26	山顶	50
3	榕江县水尾乡水尾村	麻栎	108°13′38.09″E,25°43′03.30″N	534	27	中坡	60
4	榕江县水尾乡水尾村	麻栎	108°13′39.03″E,25°43′05.04″N	549	27	上坡	60
5	榕江县水尾乡水尾村	枫香	108°13′35.07″E,25°43′33.00″N	398	25	中坡	40
6	榕江县水尾乡水尾村	枫香	108°13′22.06″E,25°42′31.03″N	567	25	中坡	50
7	榕江县水尾乡水尾村	枫香	108°13′37.01″E,25°43′33.04″N	367	25	下坡	40
8	榕江县水尾乡水尾村	枫香	108°13′23.01″E,25°42′31.09″N	568	25	中坡	50
9	榕江县水尾乡水尾村	木荷	108°12′54.00″E,25°42′38.20″N	495	25	中坡	60
10	榕江县水尾乡水尾村	木荷	108°12′56.08″E,25°42′45.50″N	456	27	下坡	80
11	榕江县东江乡水尾村	木荷	108°31′27.08″E,25°57′47.02″N	316	25	下坡	30
12	榕江县水尾乡水尾村	木荷	108°13′05.02″E,25°42′41.02″N	476	27	中坡	70
13	榕江县古州乡仁育村	马尾松	108°31′45.02″E,25°55′08.05″N	367	25	下坡	85
14	榕江县古州乡仁育村	马尾松	108°31′56.01″E,25°55′14.07″N	346	25	中坡	80
15	榕江县水尾乡水尾村	马尾松	108°13′23.30″E,25°42′38.30″N	484	25	中坡	40
16	榕江县东江乡四村	杉木	108°31′27.08″E,25°57′56.01″N	284	26	下坡	30
17	榕江县水尾乡四村	杉木	108°12′59.07″E,25°42′46.02″N	463	27	下坡	70
18	榕江县水尾乡水尾村	杉木	108°12′53.70″E,25°42′38.60″N	440	25	下坡	40
19	榕江县东江乡四村	杉木	108°31′26.04″E,25°58′04.40″N	325	26	下坡	70
20	榕江县东江乡四村	杉木	108°31′30.01″E,25°58′09.02″N	300	26	下坡	45
21	榕江县古州乡马鞍村	杉木	108°32′48.01″E,25°56′07.08″N	395	25	中坡	60

3 结果与分析

3.1 不同树种叶片 C,N,P 平均含量及 C : N, C : P,N : P 比较

由表 2 可以看出,5 个树种叶片 C 含量的大小依次为枫香<麻栎<木荷<杉木<马尾松。麻栎和枫香 C 含量显著低于木荷、马尾松和杉木。叶片 N 含量的大小依次为杉木<马尾松<木荷<枫香<麻栎。叶片 P 含量的大小依次为木荷<马尾松<麻栎<杉木<枫香。麻栎和枫香 N,P 含量显著高于木荷、马尾松和杉木。C : N 比值大小依次为枫香<麻栎<木荷<杉木<马尾

松。C : P 比值大小依次为枫香<杉木<麻栎<马尾松<木荷。麻栎和枫香 C : N,C : P 显著低于木荷、马尾松和杉木。N : P 比值大小依次为杉木<马尾松<枫香<麻栎<木荷。木荷、麻栎、枫香和马尾松之间 N : P 差异性显著,马尾松和杉木之间差异性不显著。

麻栎和枫香两个落叶树种 N,N : P 均低于中国落叶林 N,N : P,P 含量均高于于中国落叶树种 P 含量。木荷、杉木和马尾松 3 个常绿树种中,杉木和马尾松 N,N : P 均低于中国常绿林 N,N : P,P 含量均高于于中国常绿林 P 含量,而木荷的 N,P,N : P 含量特征均与杉木和马尾松相反。

表 2 5 个不同树种 C、N、P 含量及化学计量特征

树种	C/(mg·g <sup>-1</sup> )	N/(mg·g <sup>-1</sup> )	P/(mg·g <sup>-1</sup> )	C : N	C : P	N : P
麻栎	497.28±24.32c	18.08±1.58a	0.97±0.12b	27.63±1.94bc	546.71±64.34b	19.80±1.91b
枫香	443.26±42.93d	17.12±3.69a	1.17±0.32a	26.69±4.46c	399.77±87.89c	14.92±1.66c
木荷	528.52±33.14bc	16.35±2.83a	0.74±0.09c	33.30±6.80b	730.83±122.61a	22.42±4.11a
杉木	555.89±63.37b	11.51±3.24b	1.01±0.25ab	44.51±10.43a	521.40±138.54b	11.87±1.86d
马尾松	608.95±89.59a	13.77±3.10b	0.95±0.25b	45.61±8.10a	610.29±114.24b	12.46±1.46d
中国落叶林 <sup>[11]</sup>	—	22.2(129)	1.30(189)	—	—	14.8(126)
中国常绿林 <sup>[11]</sup>	—	14.1(149)	0.88(229)	—	—	15.2(149)

不同的字母代表不同树种间差异显著( $p<0.05$ ),“—”表示无数据,括号内为样本量。

3.2 5 个主要树种不同叶位 C、N、P 含量及 C : N、C : P、N : P 比较

麻栎、枫香、木荷、马尾松和杉木 5 个树种上、中、

下层不同叶位叶片的 C、N、P 含量及其化学计量值差异不显著(图 1)。但麻栎上、中、下不同叶位叶片 N、P 含量的变化规律一致,枫香、木荷、杉木亦是如此。

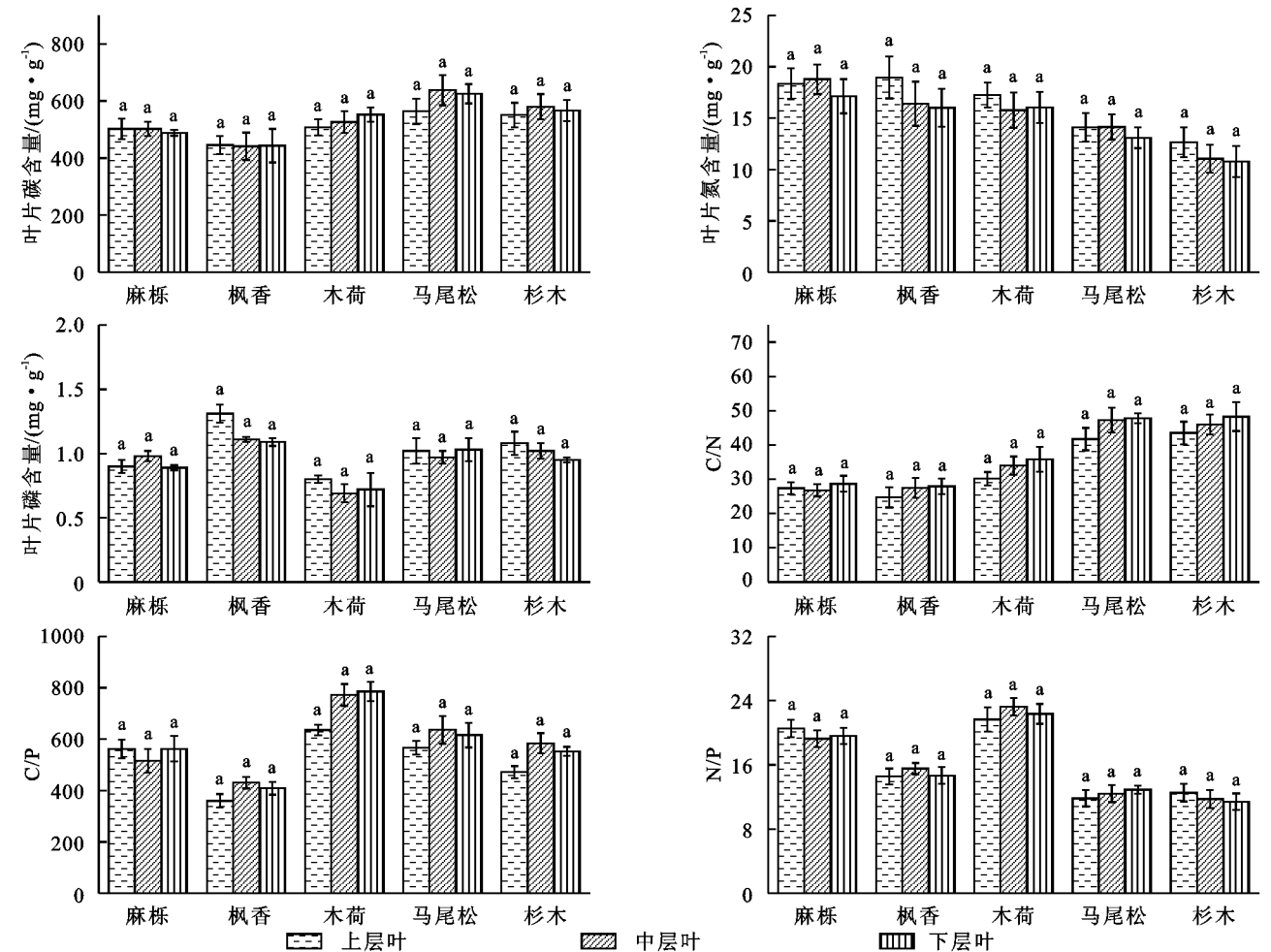


图 1 5 种优势树种不同叶位的 C、N、P 化学计量特征

3.3 土壤 C、N、P 含量特征

贵州月亮山 0—30 cm 土壤 C 含量为 9.39~71.04 mg/g,平均含量(33.53±3.22) mg/g,土壤 N 含量为 4.42~19.66 mg/g,平均含量(10.92±1.52) mg/g,土壤 P 含量为 0.10~0.79 mg/g,平均含量(0.44±0.08) mg/g。由表 3 可知,C 元素在不同土层间差异显著( $p<0.05$ ),N 元素在 0—10 cm,10—20 cm

间差异显著( $p<0.05$ ),P 元素在不同土层间差异均不显著( $p>0.05$ )。

3.4 叶片与土壤 C、N、P 相关性分析

由表 4 可见,研究区植物叶片 C、N、P 之间均无显著相关性,而土壤 C、N、P 之间均表现出极显著正相关( $p<0.01$ )。叶片与土壤 C、N、P 之间只有叶片 C 与土壤 P 表现出显著负相关性( $p<0.05$ ),其余均无相关关系。

表 3 5 个树种不同土层土壤 C,N,P 的分布特征

土层/cm	C/(mg · g <sup>-1</sup> )				N/(mg · g <sup>-1</sup> )				P/(mg · g <sup>-1</sup> )			
	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差	最大值	最小值	平均值	标准差
0—10	71.04	18.78	41.93 a	10.04	19.66	7.62	13.17 a	1.88	0.79	0.12	0.48 a	0.11
10—20	52.26	15.51	32.43 b	6.83	15.73	6.64	10.43 a	1.77	0.76	0.10	0.43 a	0.10
20—30	46.54	9.39	24.91 c	5.94	14.30	4.42	8.71 b	1.35	0.66	0.21	0.42 a	0.12

注: 同列不同的字母表示差异显著( $p<0.05$ )。

表 4 叶片与土壤 C,N,P 的相关性

元素类型	叶片 C	叶片 N	叶片 P	土壤 C	土壤 N	土壤 P
叶片 C	1.000	-0.247	0.178	-0.345	-0.406	-0.494 *
叶片 N	-0.247	1.000	0.251	-0.104	0.127	0.154
叶片 P	0.178	0.251	1.000	0.153	0.418	0.176
土壤 C	-0.345	-0.104	0.153	1.000	0.843 **	0.646 **
土壤 N	-0.406	0.127	0.418	0.843 **	1.000	0.822 **
土壤 P	-0.494 *	0.154	0.176	0.646 **	0.822 **	1.000

注: \* 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( $p<0.01$ )。

4 讨论

4.1 叶片 C,N,P 含量与养分供应规律

本研究 5 个乔木树种中,除枫香外,其他树种 C 含量均大于 Elser 等<sup>[16]</sup>研究的全球 492 种陆生植物叶片 C 平均含量 464 mg/g,也明显大于云南普洱季风常绿阔叶林的 C 平均含量 476.9 mg/g<sup>[17]</sup>,浙江天童山 32 个物种的 C 平均含量 450.0 mg/g<sup>[18]</sup>;5 个乔木树种均大于黄土高原 7 个采样点 126 个植物叶片样品的 C 平均含量 438 mg/g<sup>[19]</sup>。这表明贵州月亮山区乔木树种叶片 C 含量普遍较高,具有较强的碳蓄积能力。5 个乔木树种叶片 N,P 平均含量均低于中国大区域的 N 含量 18.6 mg/g,P 含量 1.21 mg/g<sup>[20]</sup>。与中国从南到北小区域尺度上的研究结果相比,本研究 N,P 含量均低于黄土高原 7 个采样点 126 个植物样品 N 含量 24.1 mg/g 和 P 含量 1.6 mg/g<sup>[19]</sup>以及浙江天童山 32 个物种 N 含量 16.06 mg/g<sup>[18]</sup>,但 P 含量稍高于浙江天童山 P 含量 0.9 mg/g<sup>[18]</sup>;本研究 5 个主要树种叶片 N 平均含量低于浙江天童山、黄土高原,与在中国区域尺度的研究结果叶片 N 含量随纬度的增加而增加的趋势<sup>[20]</sup>基本相符。月亮山区 5 个树种 N 含量较低一方面可能与该地区降雨量大有一定关系。有研究表明,降水量高的区域,乔木冠层叶片硝态氮的淋溶系数也相应较高<sup>[21]</sup>,进而导致叶片中 N 含量降低;另一方面,对一个稳定的生态系统,营养输入和输出的比例一致<sup>[27]</sup>。月亮山区土壤 P 含量较低,可能因此限制了植物对土壤 N 的吸收。研究表明,叶片 P 含量除稍高于浙江天童山,均显著低于其他地区。Aerts 等<sup>[22]</sup>认为叶片 P 质量分数与土壤 P 质量分数密切相关,而贵州月亮山土壤一般质地较黏,呈

酸性,普遍缺磷<sup>[23]</sup>,土壤中 P 含量的缺乏限制了植物叶片对 P 的吸收。

C 与 N,P 化学计量比的研究表明,生态系统中 C 的储存在一定程度上是由关键养分 N,P 的可获得量所控制的,N,P 稀缺意味着 C 的相对过量(C : N 和 C : P 上升),反之,N,P 充足意味着 C 的相对不足(C : N 和 C : P 下降)<sup>[1]</sup>。5 个树种中,马尾松 C 含量最高,而 N 含量较低,P 含量较枫香和杉木低,因此其生长同时受 N,P 限制;枫香叶片 N,P 含量均最高,而 C 含量最低,意味着枫香的生长过程中 C 相对不足。5 个树种叶片生态化学计量特征一方面因不同植物叶片性状遗传特性和环境条件不同而异<sup>[24]</sup>。另一方面,需要进一步采样来研究随着时间推移,光照、热量及水分变化的情况下 C,N,P 含量与 C : N, C : P 及 N : P 的变化趋势,使得到的结论更全面。植物叶片 N : P 比值可以作为判断环境对植物生长养分供应状况的指标<sup>[22]</sup>。Aerts 和 Chapin<sup>[22]</sup>认为当叶片 N : P<14 时,群落水平上植物生长主要受 N 限制;N : P>16 时,植物生长主要受 P 限制;当 14< N : P<16 时,植物生活受 N 和 P 共同限制。Chen 等<sup>[25]</sup>对中国内蒙古东部大青沟自然保护区的研究结果表明,植物生长受 N 和 P 限制的 N : P 阈值为 12, 14。本研究植物叶片 N : P 为 15.52,由于贵州月亮山区土壤高 N 含量和低 P 含量的特点,推测 Chen 等<sup>[25]</sup>的研究结果适用于贵州月亮山对于 N : P 养分限制状况的描述,即贵州月亮山地区森林植物的生长主要受 P 限制。

4.2 不同叶位叶片 C,N,P 含量及其生态化学计量特征

麻栎、枫香、木荷、马尾松和杉木 5 个树种上、中、

下层不同叶位叶片的C、N、P含量及其化学计量特征均不存在显著差异。推测虽然月亮山主要树种不同叶位的光照和水分含量有一定的差异,但是叶片的不同叶位不是影响C、N、P含量的主要因素。而且采样时间是10月,处于5个树种的果实成熟期,此时叶片光照强度降低,光合速率下降,蛋白质、核酸含量降低,叶片不同叶位的C、N、P含量差异减小。本研究发现,除马尾松外,其余4个树种不同叶位叶片N含量和P含量具有一定的相互促进作用,即上层叶、中层叶和下层叶N含量和P含量变化趋势一致。这是因为N可以合成蛋白质,有利于植物根系生长,故对植物吸收利用P有利。P可以促进植物蛋白质的合成,故有利于植物对N的吸收利用<sup>[8]</sup>。

#### 4.3 不同生活型植物C、N、P含量及化学计量特征

贵州月亮山5个优势乔木树种中麻栎和枫香为落叶树种,木荷、杉木和马尾松为常绿树种。本研究中,常绿树种C:C:N, C:P大于落叶树种, N,P含量小于落叶树种,且均达到显著水平,这与已有的研究结果基本一致<sup>[19-20]</sup>。落叶乔木分配更多的N,P给光合器官,具有较高的光合速率和养分利用效率,容易获取更多的光合产量,而常绿乔木叶片的大部分N,P分配到植物的结构部分,如分配较多的氮于非溶性蛋白以增强细胞壁韧性或增加叶肉细胞密度用来防御外界胁迫和病虫害<sup>[26]</sup>。叶片中的C:N, C:P能体现植物C同化能力,是植物营养利用效率的反映,具有重要的生态适应意义<sup>[18]</sup>。本研究常绿树种的C:N, C:P均高于落叶树种,表明常绿树种养分资源的利用效率高于落叶树种。本研究中木荷、杉木和马尾松3个常绿树种中,杉木和马尾松N:N:P均低于中国常绿林N(14.1 mg/g)、N:P(15.2)<sup>[11]</sup>, P含量均高于中国常绿林P含量(0.88 mg/g)<sup>[11]</sup>,而木荷的N,P, N:P含量特征均与杉木和马尾松相反。可能因为杉木和马尾松是针叶树种,而木荷是阔叶树种。Han等<sup>[20]</sup>研究表明,针叶林N:N:P小于阔叶林, P含量大于阔叶林。

#### 4.4 非喀斯特与喀斯特地区化学计量特征比较

贵州月亮山土壤一般质地较黏,呈酸性,普遍缺磷<sup>[23]</sup>。土壤C、N、P含量随着土壤剖面深度(0—30 cm)的增加其含量逐渐减小。本研究0—10 cm土层C含量(41.93 mg/g)、P含量(0.48 mg/g)远低于桂西北喀斯特森林<sup>[27]</sup>0—10 cm土壤C含量(72.9~112.4 mg/g)、P含量(1.2~1.7 mg/g)和贵州普定喀斯特森林<sup>[9]</sup>0—10 cm土壤C含量(102.24 mg/g)、P含量(0.54 mg/g), N含量(13.17 mg/g),远高于桂西北喀斯特森林<sup>[27]</sup>(5.7~7.2 mg/g)和贵州普定

喀斯特森林<sup>[9]</sup>(3.11 mg/g), 10—20 cm土层C、N、P含量与贵州普定喀斯特森林<sup>[9]</sup>相比亦有此规律。这表明贵州月亮山非喀斯特森林表层土壤(0—20 cm)较喀斯特森林高N含量,低C、P含量的特点。而20—30 cm土层C、N、P含量均高于贵州普定喀斯特森林<sup>[9]</sup>,表明贵州月亮山土壤随土层的加深,养分含量降低较少,这是因为月亮山是非喀斯特森林,土层较厚,土壤养分积累较多。本研究5个树种C含量均远高于桂西北喀斯特森林6个群落树种<sup>[27]</sup>C含量(426.6~438.8 mg/g), N、P含量均远低于桂西北喀斯特森林<sup>[27]</sup>N含量(18.7~23.0 mg/g)、P含量(1.1~1.4 mg/g),这表明贵州月亮山植物高C含量,低N、P含量的特点。月亮山非喀斯特森林土壤N含量高于喀斯特森林,土壤C含量低于喀斯特森林,而植物叶片N含量低于喀斯特森林, C含量高于喀斯特森林。究其原因,一方面与树种自身养分适应机制有关,另一方面有研究表明,对一个稳定的生态系统,营养输入和输出的比例一致<sup>[7]</sup>。月亮山土壤P含量较低,可能因此限制了植物对土壤N的吸收,导致植物叶片中N含量较低,但C含量与此研究不符,具体原因有待进一步研究。

## 5 结论

贵州月亮山区5个优势树种叶片C、N、P含量与全国、同一纬度喀斯特地区平均水平相比均呈高、低、低的规律;上、中、下层叶片的C、N、P含量及化学计量均不存在显著差异,表明叶位对叶片C、N、P含量未产生影响;该区常绿树种C:C:N, C:P大于落叶树种, N,P含量则相反;研究区(非喀斯特)森林群落0—20 cm土层C、N、P与喀斯特森林相比分别呈低、高、低的特征,而20—30 cm土层C、N、P含量均高于喀斯特森林。

#### 参考文献:

- [1] 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, 8(8): 937-947.
- [2] Michaels A F. The ratios of life[J]. Science, 2003, 300: 906-907.
- [3] 曾德慧,陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [4] Agren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in nature communities[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39: 153-170.
- [5] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. Ecology Letters, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [6] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, et al. Nutritional

- constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [7] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 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[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [8] 蔡艳, 张毅, 刘辉, 等. 峨眉山常绿阔叶林常绿和落叶物种叶片 C, N, P 研究[J]. *浙江林业科技*, 2009, 29(3): 9-13.
- [9] 旷远文, 温达志, 闫俊华, 等. 贵州普定喀斯特森林 3 种优势树种叶片元素含量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2010, 16(2): 158-163.
- [10] 罗绪强, 张桂玲, 杜雪莲, 等. 茂兰喀斯特森林常见钙生植物叶片元素含量及其化学计量学特征[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(7): 1121-1129.
- [11] 胡忠良, 潘根兴, 李恋卿, 等. 贵州喀斯特山区不同植被下土壤 C, N, P 含量和空间异质性[J]. *生态学报*, 2009, 29(8): 4187-4195.
- [12] 张百平, 聂朝俊, 朱军, 等. 贵州省森林资源动态变化[J]. *地理研究*, 2003, 22(6): 725-732.
- [13] 杨泉, 袁茂琴, 冯邦贤. 榕江月亮山珍稀植物马蹄参群落结构及资源研究[J]. *资源与利用*, 2013, 32(12): 55-59.
- [14] 穆彪, 张宗兰, 聂明章. 月亮山林区气候概况[J]. *贵州农学院学报*, 1994, 13(3): 6-10.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] Elser J J, Stemer R W, Gorokhova E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2000, 3(6): 540-550.
- [17] 刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 等. 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[J]. *生态学报*, 2010, 30(23): 6581-6590.
- [18] 黄建军, 王希华. 浙江天童 32 种常绿阔叶树叶片的营养及结构特征[J]. *华东师范大学学报: 自然科学版*, 2003(1): 92-97.
- [19] 郑淑霞, 上官周平. 黄土高原地区植物叶片养分组成的空间分布格局[J]. *自然科学进展*, 2006, 16(8): 965-973.
- [20] Han W X, Fang J Y, Guo D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377-385.
- [21] 陈步峰, 陈勇, 尹光天, 等. 珠江三角洲城市森林植被生态系统水质效应研究[J]. *林业科学研究*, 2004, 17(4): 453-460.
- [22] Aerts R, Chapin III F S. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30(2): 1-67.
- [23] 张和平, 朱灿梅, 杨东升. 月亮山山区梯田及其生态文化研究[J]. *中国水土保持*, 2011(5): 49-50.
- [24] 徐朝斌, 钟全林, 程栋梁, 等. 基于地理种源的刨花楠木比叶面积与叶片化学计量学关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(19): 6507-6515.
- [25] Chen F S, Niklas K J, Zeng D H. Important foliar traits depend on species-grouping: Analysis of a remnant temperate forest at the Keerqin Sandy Lands[J]. *China. Plant and Soil*, 2011, 340: 337-345.
- [26] 刘微. 天童主要落叶和常绿树种叶片 N, P 化学计量学及分配特征研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2014.
- [27] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 等. 桂西北喀斯特森林植物—凋落物—土壤生态化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(7): 682-693.



(上接第 181 页)

- [12] 曹汉强, 朱光喜, 李旭涛, 等. 多重分形及其在地形特征分析中的应用[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(12): 1182-1185.
- [13] 李锰, 朱令人, 林海英. 不同类型地貌的各向异性分形与多重分形特征研究[J]. *地球学报*, 2003, 24(3): 237-242.
- [14] 鲁克新, 王民, 李占斌, 等. 岔巴沟流域三维地貌多重分形特征量化[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(18): 248-254.
- [15] 王民. 基于 GIS 的流域地貌多重分形特征与侵蚀产沙关系研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2009.
- [16] 王民, 崔灵周, 胡彩虹, 等. 基于投影覆盖法的小流域模型地貌分形特征[J]. *水电能源科学*, 2012, 30(6): 74-77.
- [17] Chhabra A, Jensen R V. Direct determination of the  $f(\alpha)$  singularity spectrum [J]. *Physical Review Letters*, 1989, 62(12): 1327-1330.
- [18] Chhabra A, Jensen R V. Direct determination of the  $f(a)$  singularity spectrum [J]. *Phys Review Letters*, 1989, 62(2): 1327-1330.