

# 尤溪天然米楮林植物碳氮磷的 化学计量特征及其分配格局

常云妮<sup>1,2,①</sup>, 钟全林<sup>1,2,①</sup>, 程栋梁<sup>1,2</sup>, 徐朝斌<sup>1</sup>, 胡波<sup>1</sup>, 张治<sup>1</sup>

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007)

**摘要:** 以福建尤溪的天然米楮[*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata] 林乔木层、灌木层和草本层的 26 个主要优势种为研究对象, 分析了植物不同器官的 C、N 和 P 含量及其比值的差异及相关性, 并对不同器官 C、N 和 P 含量在不同层次间的分布特征进行了研究。结果显示: 同一器官中均为 C 平均含量最高、P 平均含量最低; 其中, 叶片中 C、N 和 P 含量分别为 344.95~486.15、6.26~19.50 和 0.18~0.62 mg·g<sup>-1</sup>, C/N、C/P 和 N/P 比分别为 22.52~61.21、696.64~2 589.72 和 11.38~58.94; 根系中的 C、N 和 P 含量分别为 277.95~458.30、1.41~12.73 和 0.13~0.44 mg·g<sup>-1</sup>, C/N、C/P 和 N/P 比分别为 34.63~296.17、731.45~3 372.69 和 8.81~34.41; 乔木层和灌木层植物枝条中 C、N 和 P 含量分别为 407.75~473.75、3.10~7.39 和 0.09~0.61 mg·g<sup>-1</sup>, C/N、C/P 和 N/P 比分别为 57.43~148.15、776.64~5 054.44 和 7.05~48.11; 乔木层植物树干中的 C、N 和 P 含量分别为 432.56~463.32、2.67~6.35 和 0.16~0.31 mg·g<sup>-1</sup>, C/N、C/P 和 N/P 比分别为 68.12~167.73、1 494.58~2 860.63 和 11.35~29.06。乔木层植物的不同器官按 C 含量由高至低依次排序为叶片、枝条、树干、根系, 按 N 和 P 含量由高至低依次排序为叶片、枝条、根系、树干; 灌木层植物的 C 含量在枝条中最高、根系中最低, N 和 P 含量在叶片中最高、枝条中最低; 而草本层植物地上部分的 C、N 和 P 含量均高于地下部分。除根系中的 N 含量与 P 含量呈极显著正相关外, 同一器官的 C、N 和 P 含量间均无显著相关性, 但与 C/N、C/P 和 N/P 比值间大多有极显著的相关性。不同器官的 C、N 和 P 含量也因植物所处层次的不同而异, 其中乔木层植物叶片中均最高、草本层植物叶片中均最低; 乔木层植物全株的 C 含量最高、N 含量最低, 草本层植物全株的 N 含量最高、C 含量最低, 各层植物全株的 P 含量比较接近。研究表明: 尤溪天然米楮林内植物叶片的 C、N 和 P 含量均偏低, P 缺乏很可能是限制该林分植物生产力的最重要元素。

**关键词:** 天然米楮林; 碳; 氮; 磷; 化学计量特征; 分配格局

中图分类号: Q946.91; S792.17 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)03-0001-10

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.03.01

**Stoichiometric characteristics of C, N, P and their distribution pattern in plants of *Castanopsis carlesii* natural forest in Youxi** CHANG Yunni<sup>1,2,①</sup>, ZHONG Quanlin<sup>1,2,①</sup>, CHENG Dongliang<sup>1,2</sup>, XU Chaobin<sup>1</sup>, HU Bo<sup>1</sup>, ZHANG Zhi<sup>1</sup> (1. College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(3): 1-10

**Abstract:** Taking twenty-six main dominant species in arbor, shrub and herb layers of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi of Fujian Province as research objects, variation and correlation of C, N and P contents and their ratios in different organs of plants were analyzed, and distribution characteristics of their contents in different organs among different layers were also studied. The results show that in the same organ, C average content is the highest while P average content is the lowest. In which, contents of C, N and P in leaf are 344.95-486.15, 6.26-19.50 and 0.18-0.62

收稿日期: 2013-02-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31170596; 31170374; 31370589; 30901151); 国家农业科技成果转化资金项目(2011GB2C400005); 中国科学院战略性先导科技项目(XDA05050205); 福建省科学技术厅重点项目(2010I0004)

作者简介: 常云妮(1988—), 女, 山西晋城人, 硕士研究生, 主要从事自然资源与环境的相关研究。

①通信作者 E-mail: qlzhong@126.com

mg · g<sup>-1</sup>, and ratios of C/N, C/P and N/P are 22.52–61.21, 696.64–2 589.72 and 11.38–58.94, respectively; contents of C, N and P in root are 277.95–458.30, 1.41–12.73 and 0.13–0.44 mg · g<sup>-1</sup>, and ratios of C/N, C/P and N/P are 34.63–296.17, 731.45–3 372.69 and 8.81–34.41, respectively; contents of C, N and P in branch of plants in arbor and shrub layers are 407.75–473.75, 3.10–7.39 and 0.09–0.61 mg · g<sup>-1</sup>, and ratios of C/N, C/P and N/P are 57.43–148.15, 776.64–5 054.44 and 7.05–48.11, respectively; and contents of C, N and P in trunk of plants in arbor layer are 432.56–463.32, 2.67–6.35 and 0.16–0.31 mg · g<sup>-1</sup>, and ratios of C/N, C/P and N/P are 68.12–167.73, 1 494.58–2 860.63 and 11.35–29.06, respectively. In different organs of arbor layer plants, the order of C content from high to low is leaf, branch, trunk, root, while that of N and P contents is leaf, branch, root, trunk. In shrub layer plants, C content is the highest in branch and the lowest in root, while N and P contents are the highest in leaf and the lowest in branch. In herb layer plants, contents of C, N and P in above-ground part are higher than those in under-ground part. Except having extremely significantly positive correlation between contents of N and P in root, correlations among contents of C, N and P in the same organ are insignificant, but most correlations between their contents and ratios of C/N, C/P and N/P are extremely significant. Contents of C, N and P in different organs are varied with different layers of plants, in which, those in leaf of plant in arbor layer are the highest, while those in herb layer are the lowest. And C content is the highest and N content is the lowest in whole plant of arbor layer, and N content is the highest and C content is the lowest in whole plant of herb layer, while P content in whole plant of different layers is close. It is suggested that contents of C, N and P in leaf of plants of *C. carlesii* natural forest in Youxi are lower and P deficiency is likely to be the most important element for limiting productivity of this forest.

**Key words:** *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest; carbon; nitrogen; phosphorus; stoichiometric characteristics; distribution pattern

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是研究生态系统能量平衡和多种化学元素(主要是碳、氮和磷)平衡的科学,是分析多重化学元素的质量平衡与生态系统相互影响的一种理论<sup>[1-2]</sup>,是目前的研究热点之一<sup>[3]</sup>。碳是生命骨架元素<sup>[4]</sup>与结构性物质<sup>[5]</sup>,通过光合作用同化的碳是植物生理生化过程的能量来源;而氮和磷既是植物的基本营养元素和生长限制元素<sup>[6]</sup>,也是各种蛋白质和遗传物质的重要组成部分。因此,碳氮磷在植物生长发育过程中具有重要作用<sup>[7]</sup>,三者密切相关,不仅参与地球的化学元素循环,而且为植物的生长发育提供必须的营养元素<sup>[8]</sup>。如今,碳氮磷的生态化学计量学研究已成为全球变化、生态气候和农业领域的重要研究内容<sup>[4]</sup>。植物体内碳氮磷含量的分配特征在养分循环中具有重要作用,不同区域不同层次植物碳氮磷含量的分布特征对环境的响应不同<sup>[9]</sup>。目前,国内对该方面的研究多集中于大尺度范围内<sup>[10-11]</sup>及群落演替序列<sup>[12-13]</sup>上的分布特征,且研究部位大多侧重在叶片,而对于某一区域特别是某一区域不同群落层次的植物碳氮磷生态化学计量学特征及养分分配格局的研究则相对匮乏。

米栲[*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata]为壳斗科(Fagaceae)栲属(*Castanopsis* Spach)常绿乔木树

种,具有耐阴、耐干旱和耐贫瘠的特点,喜深厚且湿润的中性和酸性土,适应能力强,主产于长江以南各省区,是亚热带典型地带性植被的建群种,广泛分布于中亚热带海拔1 300 m以下的山地丘陵;其木材坚硬、纹理致密、耐磨且韧性好,是家具、农具、造船和建筑的优良用材,具有很高的经济价值<sup>[14-15]</sup>。目前,对于米栲林的研究主要集中在育苗技术<sup>[16]</sup>、物种多样性<sup>[17]</sup>、生物量空间结构特征<sup>[18]</sup>、细根死亡动态及其寿命影响因素分析<sup>[19-20]</sup>以及群落特征<sup>[21-22]</sup>等方面,缺乏对其碳氮磷生态化学计量学特征及养分分配方面的研究。

作者以分布于福建省尤溪县的天然米栲近熟林群落为研究对象,对群落内不同层次主要植物种类不同器官的碳氮磷含量及其比值进行了研究,并对群落内植物不同器官碳氮磷含量间的相关性及不同层次植物的C、N和P含量进行了分析,以期揭示该植物群落的碳氮磷生态化学计量学特征及其分配规律,为进一步探讨中国湿润亚热带区域常绿阔叶林植物群落的碳氮磷生态化学计量学特征及养分循环机制提供基础数据,也为常绿阔叶林的高效经营以及天然常绿阔叶林生态功能与健康安全的维护等提供科学依据。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于福建省三明市尤溪县,境内森林资源丰富,全县林地面积为  $25.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,森林覆盖率达 74.2%。该区域属中亚热带季风性湿润气候;年极端最低气温  $-8.0 \text{ }^\circ\text{C}$ ,极端最高气温  $40.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ,年均气温  $19.2 \text{ }^\circ\text{C}$ ;年均空气相对湿度 83%;夏季暖热、冬季温凉,春夏多雨且降水丰富,年降水量  $1\ 400 \sim 1\ 800 \text{ mm}$ 。区域内地貌以中低山地为主,海拔多在  $500 \sim 800 \text{ m}$ ,土壤多为黄红壤。

研究样地位于尤溪县城关工区后山坪一带面积较大且保存较好的天然米楮群落内,地理坐标为北纬  $26^\circ 06' 17'' \sim 26^\circ 06' 20''$ 、东经  $118^\circ 04' 17'' \sim 118^\circ 04' 48''$ ,海拔  $400 \sim 650 \text{ m}$ ,坡度  $23^\circ \sim 25^\circ$ 。样地内乔木层植物的胸径为  $2.1 \sim 60.8 \text{ cm}$ ,主要优势种有米楮、舟山新木姜子 [*Neolitsea sericea* (Blume) Koidz.]、木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.)、木姜叶冬青 (*Ilex litesaefolia* Hu et Tang) 和山杜英 [*Elaeocarpus sylvestris* (Lour.) Poir.],重要值分别为 146.67、34.66、27.08、22.44 和 13.17。林下  $0 \sim 10$ 、 $10 \sim 20$ 、 $20 \sim 30$  和  $30 \sim 50 \text{ cm}$  土层土壤的有机碳含量分别为 39.71、23.97、12.40 和  $7.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全 N 含量分别为 2.91、1.95、1.25 和  $0.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,全 P 含量分别为 0.166、0.122、0.119 和  $0.116 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地调查及样品采集方法 在 2011 年 11 月份,采用典型样地法设置 3 个面积  $20 \text{ m} \times 50 \text{ m}$  的调查样地,样地间距大于  $100 \text{ m}$ ,每个样地又分为 10 个面积  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$  的样方(即乔木层样方),对各样方内乔木层中胸径  $2 \text{ cm}$  以上的树种进行逐一鉴定并记录,测定每木胸径和树高。对乔木层样方内的 5 个主要优势树种进行采样,每个树种选择长势中等的样株 3 株,分别按叶片、枝条、树干和根系取样。其中,在每棵样株东、南、西、北 4 个方向分上、中、下 3 个部位分别取等量叶片和枝条样品,分别混合后作为待测样品;在每棵样株树干的上、中、下 3 个部位各取厚  $3 \sim 5 \text{ cm}$  的树干圆盘作为待测样品;选取每棵样株上直径  $2 \sim 5 \text{ cm}$  的根系作为待测样品。将 3 个样株同一部位的待测样品混合均匀,共 20 个样品。

在乔木层样方内设 3 个面积  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  的灌木层

样方,记录灌木层样方中胸径小于  $2 \text{ cm}$ 、树高大于  $50 \text{ cm}$  的灌木种类、数量、基径和树高。选取 17 个主要灌木层优势树种分别按照叶片、枝条(含茎干)和根系进行取样;每个树种所有植株均为样株,同一树种的同一部位样品混合均匀,共 51 个样品。

在灌木层样方内设 1 个面积  $1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的草本层样方,记录样方内所有草本植物的种类、数量、高度、基径和盖度。选取 4 个主要草本层优势种分别按照地上和地下部分取样,每一种类所有植株均为样株,同一种类的同一部位样品混合均匀,共 8 个样品。

所有样品置于自封袋里运回实验室,装入纸袋后放入烘箱,在  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下杀青 30 min 后于  $85 \text{ }^\circ\text{C}$  条件下干燥至恒质量,冷却后研磨并过  $1 \text{ mm}$  筛,用于元素含量测定。

1.2.2 元素含量测定方法 参照文献[23]采用 CHNOS 元素分析仪(Elemental Analyzer Vario EL III)进行 C 和 N 含量测定;样品经  $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$  消煮后参照文献[24]采用钼锑抗比色法测定 P 含量。各样品均重复测定 3 次。

### 1.3 数据处理与分析

采用 Excel 2003 软件和 SPSS 17.0 统计分析软件对所有样品的 C、N 和 P 含量及其比值进行计算及统计分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 米楮林优势种碳氮磷的化学计量特征分析

尤溪天然米楮林乔木层、灌木层和草本层主要优势种不同器官中 C、N 和 P 含量及其比值分别见表 1、表 2 和表 3。

2.1.1 碳氮磷含量分析 由测定结果(表 1、表 2 和表 3)可以看出:尤溪天然米楮林不同层次优势种间的 C、N 和 P 含量均有一定差异。总体上看,在乔木层优势种中,叶片中的 C、N 和 P 含量最高,枝条和树干居中,根系中 C、N 和 P 含量最低,其中叶片和根系中的 C、N 和 P 含量差异较大,而枝条和树干的 C、N 和 P 含量差异则相对较小。在灌木层优势种中,叶片中的 C、N 和 P 含量也最高,根系中 C、N 和 P 含量最低;而在草本层优势种中,地上部分的 C、N 和 P 含量总体上高于地下部分。

乔木层、灌木层及草本层 26 个优势种的叶片 C 含量为  $344.95 \sim 486.15 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其中,木姜叶冬青

表 1 尤溪天然米槠林乔木层主要优势种不同器官 C、N 和 P 的生态化学计量特征

Table 1 Ecological stoichiometric characteristics of C, N and P in different organs of main dominant species in arbor layer of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi

种类 Species	器官 Organ	含量/mg · g <sup>-1</sup> Content			比值 Ratio		
		C	N	P	C/N	C/P	N/P
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	叶片 Leaf	470.15	14.15	0.48	33.23	979.48	29.48
	枝条 Branch	466.10	6.35	0.29	73.40	1 607.24	21.90
	树干 Trunk	457.70	4.65	0.16	98.43	2 860.63	29.06
	根系 Root	433.30	3.67	0.18	118.07	2 407.22	20.39
木荷 <i>Schima superba</i>	叶片 Leaf	481.85	15.27	0.29	31.56	1 661.55	52.66
	枝条 Branch	459.25	3.10	0.28	148.15	1 640.18	11.07
	树干 Trunk	447.85	2.67	0.22	167.73	2 035.68	12.14
	根系 Root	408.80	3.00	0.21	136.27	1 946.67	14.29
舟山新木姜子 <i>Neolitsea sericea</i>	叶片 Leaf	476.75	14.58	0.62	32.70	768.95	23.52
	枝条 Branch	468.85	6.08	0.32	77.11	1 465.16	19.00
	树干 Trunk	452.55	4.62	0.22	97.95	2 057.05	21.00
	根系 Root	445.80	6.02	0.19	74.05	2 346.32	31.68
木姜叶冬青 <i>Ilex litesaefolia</i>	叶片 Leaf	486.15	10.30	0.41	47.20	1 185.73	25.12
	枝条 Branch	473.75	4.30	0.61	110.17	776.64	7.05
	树干 Trunk	463.32	3.52	0.31	131.63	1 494.58	11.35
	根系 Root	455.30	4.35	0.41	104.67	1 110.49	10.61
山杜英 <i>Elaeocarpus sylvestris</i>	叶片 Leaf	439.20	19.50	0.60	22.52	732.00	32.50
	枝条 Branch	451.75	7.39	0.29	61.13	1 557.76	25.48
	树干 Trunk	432.56	6.35	0.27	68.12	1 602.07	23.52
	根系 Root	412.65	6.07	0.35	67.98	1 179.00	17.34

表 2 尤溪天然米槠林灌木层主要优势种不同器官 C、N 和 P 的生态化学计量特征

Table 2 Ecological stoichiometric characteristics of C, N and P in different organs of main dominant species in shrub layer of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi

种类 Species	器官 Organ	含量/mg · g <sup>-1</sup> Content			比值 Ratio		
		C	N	P	C/N	C/P	N/P
铁山矾 <i>Symplocos pseudobarberina</i>	叶片 Leaf	344.95	11.91	0.39	28.97	884.49	30.54
	枝条 Branch	442.30	4.04	0.28	109.48	1 579.64	14.43
	根系 Root	360.65	5.96	0.32	60.51	1 127.03	18.63
矩叶鼠刺 <i>Itea oblonga</i>	叶片 Leaf	454.25	13.28	0.59	34.21	769.92	22.51
	枝条 Branch	460.35	7.28	0.55	63.23	837.00	13.24
	根系 Root	419.50	4.81	0.44	87.21	953.41	10.93
赤楠 <i>Syzygium buxifolium</i>	叶片 Leaf	473.30	10.81	0.42	43.79	1 126.91	25.74
	枝条 Branch	453.50	4.55	0.27	99.67	1 679.63	16.85
	根系 Root	431.10	5.72	0.27	75.37	1 596.67	21.19
广东冬青 <i>Ilex kwangtungensis</i>	叶片 Leaf	483.65	12.82	0.45	37.73	1 074.78	28.49
	枝条 Branch	461.00	3.96	0.27	116.56	1 707.41	14.65
	根系 Root	438.45	3.78	0.13	115.99	3 372.69	29.08
密花树 <i>Myrsine seguinii</i>	叶片 Leaf	459.75	9.41	0.57	48.86	806.58	16.51
	枝条 Branch	463.25	4.81	0.18	96.31	2 573.61	26.72
	根系 Root	429.45	4.35	0.13	98.72	3 303.46	33.46
舟山新木姜子 <i>Neolitsea sericea</i>	叶片 Leaf	476.05	12.63	0.41	37.70	1 161.10	30.81
	枝条 Branch	454.90	4.33	0.09	105.06	5 054.44	48.11
	根系 Root	414.25	11.20	0.33	36.99	1 255.30	33.94

续表2 Table 2 (Continued)

种类 Species	器官 Organ	含量/mg · g <sup>-1</sup> Content			比值 Ratio		
		C	N	P	C/N	C/P	N/P
白檀 <i>Symplocos paniculata</i>	叶片 Leaf	380.85	12.61	0.34	30.20	1 120.15	37.09
	枝条 Branch	407.75	7.10	0.31	57.43	1 315.32	22.90
	根系 Root	359.25	7.73	0.33	46.47	1 088.64	23.42
木荷 <i>Schima superba</i>	叶片 Leaf	469.40	12.64	0.38	37.14	1 235.26	33.26
	枝条 Branch	436.65	6.11	0.23	71.46	1 898.48	26.57
	根系 Root	355.00	5.45	0.31	65.14	1 145.16	17.58
薄叶山矾 <i>Symplocos anomala</i>	叶片 Leaf	366.15	12.47	0.32	29.36	1 144.22	38.97
	枝条 Branch	442.85	5.70	0.21	77.69	2 108.81	27.14
	根系 Root	406.45	7.28	0.40	55.83	1 016.13	18.20
硬叶冬青 <i>Ilex ficifolia</i>	叶片 Leaf	466.40	9.26	0.30	50.37	1 554.67	30.87
	枝条 Branch	462.70	4.02	0.21	115.10	2 203.33	19.14
	根系 Root	450.15	4.08	0.18	110.33	2 500.83	22.67
柃木 <i>Eurya japonica</i>	叶片 Leaf	414.65	10.36	0.34	40.02	1 219.56	30.47
	枝条 Branch	457.00	5.45	0.22	83.85	2 077.27	24.77
	根系 Root	448.80	3.49	0.14	128.60	3 205.71	24.93
毛冬青 <i>Ilex pubescens</i>	叶片 Leaf	429.75	12.92	0.41	33.28	1 048.17	31.50
	枝条 Branch	464.00	4.43	0.20	104.74	2 320.00	22.15
	根系 Root	417.60	1.41	0.16	296.17	2 610.00	8.81
黄丹木姜子 <i>Litsea elongata</i>	叶片 Leaf	477.70	13.94	0.42	34.27	1 137.38	33.19
	枝条 Branch	465.05	6.51	0.26	71.44	1 788.65	25.04
	根系 Root	440.80	12.73	0.37	34.63	1 191.35	34.41
黄杨冬青 <i>Ilex buxoides</i>	叶片 Leaf	483.60	10.96	0.35	44.12	1 381.71	31.31
	枝条 Branch	469.20	5.28	0.21	88.86	2 234.29	25.14
	根系 Root	458.30	4.33	0.16	105.97	2 864.38	27.03
格药柃 <i>Eurya muricata</i>	叶片 Leaf	407.20	11.03	0.38	36.92	1 071.71	29.03
	枝条 Branch	448.30	5.40	0.26	83.02	1 724.23	20.77
	根系 Root	435.80	5.11	0.21	85.28	2 075.24	24.33
光叶山矾 <i>Symplocos lancifolia</i>	叶片 Leaf	391.15	13.84	0.42	28.26	931.31	32.95
	枝条 Branch	427.00	6.20	0.25	68.87	1 708.00	24.80
	根系 Root	415.20	4.16	0.17	99.81	2 442.35	24.47
绒毛润楠 <i>Machilus velutina</i>	叶片 Leaf	484.20	12.29	0.45	39.40	1 076.00	27.31
	枝条 Branch	464.10	6.08	0.29	76.33	1 600.34	20.97
	根系 Root	437.45	4.25	0.22	102.93	1 988.41	19.32

叶片中 C 含量最高 (486.15 mg · g<sup>-1</sup>); 绒毛润楠 (*Machilus velutina* Champ. ex Benth.)、广东冬青 (*Ilex kwangtungensis* Merr.) 和黄杨冬青 (*Ilex buxoides* S. Y. Hu) 叶片中 C 含量也较高, 分别为 484.20、483.65 和 483.60 mg · g<sup>-1</sup>; 铁山矾 (*Symplocos pseudobarberina* Gontsch.) 叶片中的 C 含量最低, 为 344.95 mg · g<sup>-1</sup>。26 个优势种叶片的 N 含量为 6.26 ~ 19.50 mg · g<sup>-1</sup>; 其中, 山杜英叶片中的 N 含量最高 (19.50 mg · g<sup>-1</sup>), 木荷和舟山新木姜子叶片中 N 含量也较高 (分别为 15.27 和 14.58 mg · g<sup>-1</sup>), 三穗藁草 (*Carex tristachya*

Thunb.) 地上部分 (即叶片) 中的 N 含量最低 (6.26 mg · g<sup>-1</sup>)。26 个优势种叶片 P 含量为 0.18 ~ 0.62 mg · g<sup>-1</sup>; 其中, 舟山新木姜子叶片 P 含量最高 (0.62 mg · g<sup>-1</sup>), 山杜英叶片 P 含量也较高 (0.60 mg · g<sup>-1</sup>), 紫金牛 [*Ardisia japonica* (Thunb.) Blume] 地上部分 (即叶片) 中 P 含量最低 (0.18 mg · g<sup>-1</sup>)。经计算, 尤溪天然米楮林主要优势种叶片中 C、N 和 P 含量的最高值分别是最低值的 1.41、3.12 和 3.44 倍, 说明叶片中 P 含量差异最大、C 含量差异最小。这一结果充分表明不同植物对 C、N 和 P 的吸收具有选择性。

表 3 尤溪天然米楮林草本层主要优势种不同部位 C、N 和 P 的生态化学计量特征

Table 3 Ecological stoichiometric characteristics of C, N and P in different parts of main dominant species in herb layer of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi

种类 Species	部位 Part	含量/mg · g <sup>-1</sup> Content			比值 Ratio		
		C	N	P	C/N	C/P	N/P
三穗薹草 <i>Carex tristachya</i>	地上部分 Above-ground part	383.15	6.26	0.55	61.21	696.64	11.38
	地下部分 Under-ground part	277.95	7.91	0.38	35.14	731.45	20.82
狗脊蕨 <i>Woodwardia japonica</i>	地上部分 Above-ground part	386.75	10.72	0.22	36.08	1 757.96	48.73
	地下部分 Under-ground part	342.40	5.72	0.26	59.86	1 316.92	22.00
紫金牛 <i>Ardisia japonica</i>	地上部分 Above-ground part	466.15	10.61	0.18	43.94	2 589.72	58.94
	地下部分 Under-ground part	405.40	7.63	0.26	53.13	1 559.23	29.35
芒萁 <i>Dicranopteris dichotoma</i>	地上部分 Above-ground part	436.20	13.30	0.32	32.80	1 363.13	41.56
	地下部分 Under-ground part	382.90	5.29	0.19	72.38	2 015.26	27.84

26 个优势种根系 C、N 和 P 含量分别为 277.95 ~ 458.30、1.41 ~ 12.73 和 0.13 ~ 0.44 mg · g<sup>-1</sup>, 最高值分别是最低值的 1.65、9.03 和 3.38 倍, 说明不同种类根系中 N 含量差异最大、C 含量差异最小。

在供试的 22 个木本优势种中, 枝条的 C、N 和 P 含量分别为 407.75 ~ 473.75、3.10 ~ 7.39 和 0.09 ~ 0.61 mg · g<sup>-1</sup>, 最高值分别是最低值的 1.16、2.38 和 6.78 倍, 可见枝条中 C、N 和 P 含量的差异特征与叶片相同, 即 P 含量差异最大、C 含量差异最小。

乔木层优势种树干的 C、N 和 P 含量分别为 432.56 ~ 463.32、2.67 ~ 6.35 和 0.16 ~ 0.31 mg · g<sup>-1</sup>, 最高值分别是最低值的 1.07、2.38 和 1.94 倍, 可见乔木层优势种树干中 C、N 和 P 含量的差异特征与根系相同, 即 N 含量差异最大、C 含量差异最小。

2.1.2 碳氮磷化学计量比分析 尤溪天然米楮林乔木层、灌木层和草本层主要优势种间的 C/N、C/P 和 N/P 比值均有一定差异。其中, 乔木层主要优势种叶片、根系和枝条的 C/N、C/P 和 N/P 比值差异较大, 而树干的 C/N、C/P 和 N/P 比值差异则相对较小; 灌木层优势种叶片、根系和枝条的 C/N、C/P 和 N/P 比值差异均较大; 草本层优势种地上部分和地下部分的 C/N、C/P 和 N/P 比值也均有较大差异。

26 个优势种叶片的 C/N 比值为 22.52 ~ 61.21, 以三穗薹草地上部分(即叶片)最高(61.21), 山杜英叶片最低(22.52)。叶片的 C/P 和 N/P 比值的范围分别为 696.64 ~ 2 589.72 和 11.38 ~ 58.94, 紫金牛地上部分(即叶片)的 C/P 和 N/P 比值均最高, 三穗薹草地上部分(即叶片)的 C/P 和 N/P 比值均最低。经计算, 26 个优势种叶片的 C/N、C/P 和 N/P 比值的最高值分别为最低值的 2.72、3.72 和 5.18 倍,

说明不同种类叶片间的 N/P 比值差异相对较大、C/N 比值差异则相对较小。

供试 26 个优势种根系的 C/N、C/P 和 N/P 比值分别为 34.63 ~ 296.17、731.45 ~ 3 372.69 和 8.81 ~ 34.41, 最高值分别为最低值的 8.55、4.61 和 3.91 倍, 以 C/N 比值差异最大、N/P 比值差异最小。

乔木层及灌木层优势种枝条的 C/N、C/P 和 N/P 比值分别为 57.43 ~ 148.15、776.64 ~ 5 054.44 和 7.05 ~ 48.11, 最高值分别是最低值的 2.58、6.51 和 6.82 倍, 其差异特征与叶片相同, 即 N/P 比值差异最大、C/N 比值差异最小。

乔木层优势种树干的 C/N、C/P 和 N/P 比值分别为 68.12 ~ 167.73、1 494.58 ~ 2 860.63 和 11.35 ~ 29.06, 最高值分别为最低值的 2.46、1.91 和 2.56 倍, 以 N/P 比值差异最大、C/P 比值差异最小。

2.1.3 碳氮磷含量分布特征 元素含量反映了植物在一定生境条件下从土壤中吸收和蓄积矿质养分的能力。由于不同器官的生理机能不同, 不同营养元素在植物体内的功能也不同, 因此, 各营养元素在植物不同器官及不同营养元素在同一器官中的分布特征均有差异<sup>[25-26]</sup>。测定结果(表 1、表 2 和表 3)表明: 尤溪天然米楮林不同层次 26 个优势种同一器官中的 C 含量均最高、P 含量均最低。不同器官间 C、N 和 P 含量有明显差异, 其中, 乔木层优势种各器官按 C 平均含量由高到低依次排序为叶片、枝条、树干、根系, 按 N 和 P 平均含量由高到低依次排序为叶片、枝条、根系、树干; 灌木层优势种各器官按 C 平均含量由高到低依次排序为枝条、叶片、根系, 按 N 和 P 平均含量由高到低依次排序为叶片、根系、枝条; 草本层优势种地上部分 C、N 和 P 平均含量均高于地下部分。

## 2.2 米楮林优势种不同器官 C、N 和 P 含量与其比值间的相关性分析

尤溪天然米楮林乔木层、灌木层和草本层主要优势种不同器官中 C、N 和 P 含量与其比值间的相关性分析结果见表 4、表 5 和表 6。分析结果表明:除根系中 N 含量与 P 含量间存在极显著 ( $P<0.01$ ) 的正相关

表 4 尤溪天然米楮林主要优势种叶片中 C、N 和 P 含量与其比值间的相关分析结果<sup>1)</sup>

Table 4 Analysis result of correlation among C, N and P contents and their ratios in leaf of main dominant species of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi<sup>1)</sup>

y	x	相关方程 Correlation equation	R <sup>2</sup>
N content	C content	$y=0.01x+8.08$	0.028
P content	C content	$y=(0.04\times 10^{-2})x+0.22$	0.027
C/N ratio	C content	$y=0.04x+17.73$	0.054
C/P ratio	C content	$y=1.65x+444.09$	0.032
N/P ratio	C content	$y=-0.01x+36.91$	0.002
P content	N content	$y=0.01x+0.27$	0.059
C/N ratio	N content	$y=-2.93x+73.38$	0.747 **
C/P ratio	N content	$y=-29.30x+1\ 530.50$	0.033
N/P ratio	N content	$y=1.18x+17.63$	0.082
C/N ratio	P content	$y=-0.66x+37.80$	0.000
C/P ratio	P content	$y=-3\ 026.10x+2\ 407.20$	0.730 **
N/P ratio	P content	$y=-72.26x+61.58$	0.636 **
C/P ratio	C/N ratio	$y=6.81x+916.78$	0.020
N/P ratio	C/N ratio	$y=-0.48x+50.28$	0.158 *
N/P ratio	C/P ratio	$y=0.02x+7.24$	0.687 **

<sup>1)</sup> \*\* :  $P<0.01$ ; \* :  $P<0.05$ .

表 5 尤溪天然米楮林主要优势种枝条中 C、N 和 P 含量与其比值间的相关分析结果<sup>1)</sup>

Table 5 Analysis result of correlation among C, N and P contents and their ratios in branch of main dominant species of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi<sup>1)</sup>

y	x	相关方程 Correlation equation	R <sup>2</sup>
N content	C content	$y=-0.03x+19.56$	0.164
P content	C content	$y=(0.02\times 10^{-2})x+0.19$	0.001
C/N ratio	C content	$y=0.65x-203.99$	0.171
C/P ratio	C content	$y=7.56x-1\ 487.70$	0.020
N/P ratio	C content	$y=-0.08x+56.34$	0.021
P content	N content	$y=0.02x+0.14$	0.089
C/N ratio	N content	$y=-19.54x+193.74$	0.933 **
C/P ratio	N content	$y=-207.56x+3\ 027.60$	0.091
N/P ratio	N content	$y=1.51x+14.00$	0.049
C/N ratio	P content	$y=-42.88x+102.19$	0.028
C/P ratio	P content	$y=-6\ 772.90x+3\ 713.40$	0.603 **
N/P ratio	P content	$y=-60.54x+37.81$	0.496 **
C/P ratio	C/N ratio	$y=7.02x+1\ 297.60$	0.042
N/P ratio	C/N ratio	$y=-0.11x+31.77$	0.104
N/P ratio	C/P ratio	$y=0.01x+5.76$	0.718 **

<sup>1)</sup> \*\* :  $P<0.01$ .

表 6 尤溪天然米楮林主要优势种根系中 C、N 和 P 含量与其比值间的相关分析结果<sup>1)</sup>

Table 6 Analysis result of correlation among C, N and P contents and their ratios in root of main dominant species of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi<sup>1)</sup>

y	x	相关方程 Correlation equation	R <sup>2</sup>
N content	C content	$y=-0.01x+11.63$	0.065
P content	C content	$y=-(0.09\times 10^{-2})x+0.61$	0.140
C/N ratio	C content	$y=0.44x-89.45$	0.128
C/P ratio	C content	$y=10.67x-2\ 524.30$	0.318 **
N/P ratio	C content	$y=0.03x+12.28$	0.022
P content	N content	$y=0.02x+0.13$	0.335 **
C/N ratio	N content	$y=-15.90x+178.48$	0.566 **
C/P ratio	N content	$y=-192.71x+2\ 938.00$	0.345 **
N/P ratio	N content	$y=1.51x+14.09$	0.267 **
C/N ratio	P content	$y=-277.90x+161.13$	0.270 **
C/P ratio	P content	$y=-7\ 708.60x+3\ 846.00$	0.863 **
N/P ratio	P content	$y=-24.71x+28.93$	0.111
C/P ratio	C/N ratio	$y=8.71x+1\ 079.70$	0.315 **
N/P ratio	C/N ratio	$y=-0.06x+28.24$	0.209 *
N/P ratio	C/P ratio	$y=(0.03\times 10^{-1})x+17.21$	0.104

<sup>1)</sup> \*\* :  $P<0.01$ ; \* :  $P<0.05$ .

关系外,同一器官的 C、N 和 P 含量间均无显著的相关性 ( $P>0.05$ ); 但同一器官的 C、N 和 P 含量却与 C/N、C/P 和 N/P 比值大多具有极显著的相关性,且 C/N、C/P 和 N/P 比值间也多具有显著或极显著的相关性。其中,叶片中的 N 含量与 C/N 比、P 含量与 C/P 比和 N/P 比、C/N 比与 N/P 比间分别存在极显著或显著的负相关关系,C/P 比与 N/P 比间存在极显著的正相关关系;枝条中的 C/P 比与 N/P 比间有极显著的正相关关系,而枝条中的 N 含量与 C/N 比、P 含量与 C/P 比和 N/P 比间分别均有极显著的负相关关系;根系中的 C 含量与 C/P 比、N 含量与 P 含量和 N/P 比以及 C/N 比与 C/P 比间分别具有极显著的正相关关系,根系中的 N 含量与 C/N 比和 C/P 比、P 含量与 C/P 比和 C/N 比、C/N 比与 N/P 比间分别具有极显著的负相关关系。

## 2.3 米楮林不同层次优势种不同器官的碳氮磷化学计量特征

通常,在森林植物群落不同垂直结构层次中,不同生活型植物对土壤养分的富集能力有一定差异<sup>[24]</sup>。尤溪天然米楮林乔木层、灌木层和草本层优势种不同器官中 C、N 和 P 含量的差异见表 7。分析结果表明:尤溪天然米楮林优势种的 C、N 和 P 含量因所处层次及器官不同而异。其中,不同层次叶片中的 C、N 和 P 含量均以乔木层种类为最高、草本层种

类为最低,但仅乔木层与草本层叶片 N 含量有显著差异( $P < 0.05$ )。在不同层次种类的枝干中,乔木层种类的 C 和 P 含量均大于灌木层种类,而乔木层种类的 N 含量则小于灌木层,二者间的 C、N 和 P 含量差异均不显著;在不同层次种类的根系中,乔木层种类的 C 含量最高、草本层最低,草本层种类的 N 含量最高、乔木层种类最低,但不同层次间植物根系中的 P 含量则

非常接近,并且除草本层植物根系中的 C 含量与其他 2 个层次植物有显著差异外,各层次植物根系中的 C、N 和 P 含量均无显著差异。从整株的 C、N 和 P 含量来看,乔木层植物的 C 含量最高、N 含量最低,草本层植物的 N 含量最高、C 含量最低,各层次植物全株 P 含量比较接近;显著性分析结果表明仅草本层与乔木层和灌木层全株 C 含量有显著差异。

表 7 尤溪天然米楮林不同层次主要优势种不同器官及全株 C、N 和 P 含量的比较 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 7 Comparison of C, N and P contents in different organs and whole plant of main dominant species in different layers of *Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata natural forest in Youxi ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

器官 Organ	层次 Layer	含量/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Content		
		C	N	P
叶片 Leaf	乔木层 Arbor layer	470.82±18.66a	14.76±3.28a	0.48±0.14a
	灌木层 Shrub layer	439.00±46.04a	11.95±1.42ab	0.41±0.08a
	草本层 Herb layer	418.06±40.17a	10.22±2.92b	0.32±0.17a
枝干 Branch and trunk	乔木层 Arbor layer	457.40±10.03a	4.90±1.54a	0.30±0.10a
	灌木层 Shrub layer	451.80±16.19a	5.37±1.07a	0.25±0.10a
根系 Root	乔木层 Arbor layer	431.17±20.28a	4.62±1.38a	0.27±0.10a
	灌木层 Shrub layer	418.72±32.02a	5.64±2.80a	0.25±0.10a
	草本层 Herb layer	352.16±55.92b	6.64±1.32a	0.27±0.08a
整株 Whole plant	乔木层 Arbor layer	454.18±13.42a	7.30±1.67a	0.34±0.07a
	灌木层 Shrub layer	436.49±27.34a	7.65±1.36a	0.30±0.07a
	草本层 Herb layer	385.11±46.77b	8.43±1.01a	0.30±0.11a

<sup>1)</sup> 同列中不同的小写字母表示不同层次间同一器官的元素含量有显著差异 ( $P < 0.05$ ) Different small letters in the same column indicate the significant difference in the same organ among different layers ( $P < 0.05$ ).

### 3 讨论和结论

叶片是植物进行光合作用的最重要场所,其营养元素含量特征最具有代表性并能反映植物群落的生境条件。本研究结果表明:尤溪天然米楮林主要优势种叶片的 C 平均含量( $441.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )低于全球 492 种陆生植物及北京及其周边地区 358 种植物叶片的 C 平均含量(分别为 464 和  $451 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[27-28]</sup>,说明该米楮林中植物叶片的有机质含量和 C 储量均较低。植物体内的 N 含量水平直接决定植物光合能力的大小,N 含量越高表明叶片的光合能力越强<sup>[29]</sup>。尤溪天然米楮林 26 种主要优势种叶片的 N 平均含量为  $12.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,低于全球尺度内植物叶片的 N 平均含量( $18.34$  和  $17.66 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[30-31]</sup>,也低于全国范围内植物叶片( $18.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[32]</sup>、中国东部南北样带 654 种植物叶片( $17.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[10]</sup>以及北京及其周边地区 358 种植物叶片( $26.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[28]</sup>的 N 含量

水平,说明在该林分中植物叶片的 N 含量较低,可能与该区域降水量高有关;由于可被植物吸收的 N 多为可溶性氨态氮,降水通过淋溶使土壤中氮水平降低,导致可供植物吸收的有效氮减少,间接导致植物叶片 N 含量降低<sup>[32]</sup>。该米楮林中主要优势种叶片的 P 平均含量为  $0.04 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,明显低于全球尺度内植物的 P 平均含量( $1.42$  和  $1.58 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[30-31,33]</sup>,也低于全国尺度( $1.21 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[32]</sup>、中国东部南北样带 654 种植物( $1.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[10]</sup>以及北京及其周边地区 358 种植物叶片( $2.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[28]</sup>的 P 含量水平。Aerts 等<sup>[34]</sup>认为植物叶片中的 P 含量与土壤 P 含量密切相关,该米楮林内植物叶片 P 含量较低也可能与该区域高温多雨及淋溶作用使土壤中可溶性 P 大量损失、导致地表土壤 P 含量偏低有关。

植物体内 C、N 和 P 化学计量比体现了生态系统中 C 积累动态及 N 和 P 养分限制格局<sup>[29]</sup>。植物叶片中的 C/N 比和 C/P 比反映的是植物叶片对 C 与 N、P 的相对协调能力,预示着植物在吸收营养过程中对 C

的同化能力<sup>[35]</sup>,在一定程度上反映了植物的养分利用效率,具有重要的生态适应意义。在尤溪米楮林中主要优势种的 C/N 比和 C/P 比均明显大于全球尺度内植物的 C/N 比和 C/P 比(分别为 22.5 和 232)<sup>[27]</sup>,说明该林分中植物的养分利用效率相对较高。植物体内的 N/P 比可以体现 N 和 P 供给状况的相对有效性<sup>[36]</sup>,是描述群落内 N 和 P 相对限制的指标,可用于判断环境对植物生长的养分供应状况和植物的生长速率。Güsewell<sup>[37]</sup>认为:若 N/P 比小于 10,增加 N 肥施用量可提高植物的生物量;若 N/P 比大于 20,增加 P 肥施用量可提高植物的生物量;若 N/P 比为 10~20,增加 N 和 P 的施肥量并不能明显提高植物的生物量。尤溪米楮林中主要优势种的 N/P 比高而 P 含量低,表明该林分中植物生产力受 P 限制较大<sup>[38-39]</sup>。

通常,植物对于营养元素的吸收按一定比例进行,叶片内的营养元素间应存在显著的线性关系,即具有动态平衡关系。Sterner 等<sup>[1]</sup>认为:叶片 C 含量与 N 和 P 含量间存在显著的负相关,而 N 含量与 P 含量间则存在显著的正相关。这是高等陆生植物体内 C、N 和 P 含量的普遍规律之一<sup>[38]</sup>。尤溪米楮林内主要优势种的 C、N 和 P 含量间的相关性较差,基本没有统计学意义,说明该林分内的小生境中可能存在某一元素供应过量或不足的现象,从而影响了植物体内 C、N 和 P 含量的平衡;由于该林分中主要优势种的 P 含量极低,因而推测 P 可能是限制该林分植物生产力的重要元素。此外,该林分中 C、N 和 P 含量相关性不显著的原因也可能与同一种类不同株龄个体间的养分含量差异有关,具体原因有待进一步研究。

植物体内的养分含量反映了植物在一定生境中从土壤中吸取和贮存营养物质的能力<sup>[40]</sup>,这一能力受多种因素的影响,如物种、生长发育阶段、气候和土壤等等<sup>[31,41]</sup>。植物体内的营养元素含量因元素种类和器官不同而异<sup>[25]</sup>,但是不同种类各养分含量存在普遍性规律<sup>[42]</sup>。尤溪米楮林中主要优势种体内均为 C 含量最高、N 含量次之、P 含量最低,与文献报道的结果<sup>[10,43]</sup>一致。该林分中植物 C、N 和 P 含量在不同器官中的分布规律与热带及亚热带植物的普遍规律<sup>[25,44-45]</sup>相似,即:叶片中最高、枝干中较低。

在尤溪米楮林中乔木层、灌木层和草本层主要优势种的 C、N 和 P 含量略有差异,说明不同生活型种类对同一生境的适应能力不同,养分适应策略也有一定差异。植物体内的 C、N 和 P 含量随植物所处层次

不同而异,其中,乔木层植物叶片中最高、草本层植物叶片中最低。陈灵芝等<sup>[46]</sup>认为:寿命短、生长快速的植物体内养分含量高于寿命长、生长速度慢的种类,植物叶片中的养分含量在垂直结构上呈现由下而上递增的趋势,即草本层植物最高、乔木层植物最低、灌木层植物居中。本研究结果恰好与其相反,但与莫江明等<sup>[9]</sup>和林植芳等<sup>[47]</sup>的研究结果一致。说明影响植物体内养分含量的因素比较复杂,既与植物的生存策略有关,也与植物所处的生境条件紧密相关<sup>[27]</sup>。另外,笔者认为不同区域不同发育阶段的米楮林中植物的 C、N 和 P 含量也可能存在差异,有待进一步研究证实。

#### 参考文献:

- [1] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [2] 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.
- [3] 程滨,赵永军,张文广,等. 生态化学计量学研究进展[J]. 生态学报, 2010, 30(6): 1628-1637.
- [4] 邓斌. 高寒草地不同演替阶段植被变化和土壤碳氮磷的生态化学计量研究[D]. 兰州:兰州大学草地农业科技学院, 2012.
- [5] ÅGREN G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities [J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2008, 39: 153-170.
- [6] 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: 1135-1142.
- [7] 张秋芳,刘波,史怀,等. 氮磷钾肥对地道药材建泽泻生长与品质的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2006, 15(3): 39-42.
- [8] 马永跃,王维奇. 闽江河口区稻田土壤和植物的 C、N、P 含量及其生态化学计量比[J]. 亚热带农业研究, 2011, 7(3): 182-187.
- [9] 莫江明,张德强,黄忠良,等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(3): 198-206.
- [10] 任书杰,于贵瑞,陶波,等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究[J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [11] 任书杰,于贵瑞,姜春明,等. 中国东部南北样带森林生态系统 102 个优势种叶片碳氮磷化学计量学统计特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(3): 581-586.
- [12] 高三平. 天童常绿阔叶林不同演替阶段 N、P 化学计量学研究[D]. 上海:华东师范大学资源与环境科学学院, 2008.
- [13] 银晓瑞,梁存柱,王立新,等. 内蒙古典型草原不同恢复演替

- 阶段植物养分化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 39-47.
- [14] 张崇涛. 人促米楮林与米楮天然林、人工林的生物多样性比较研究[J]. 现代农业科学, 2009, 16(8): 58-63.
- [15] 闫淑君, 洪伟, 吴承祜, 等. 武夷山天然米楮林优势种群结构与分布格局[J]. 热带亚热带植物学报, 2002, 10(1): 15-21.
- [16] 林向平. 米楮容器育苗技术初探[J]. 现代园艺, 2012(22): 51.
- [17] 宋晓英, 牛树奎, 彭彪, 等. 福建三明不同更新方式的米楮林物种多样性研究[J]. 亚热带植物科学, 2006, 35(2): 31-34.
- [18] 康建生. 米楮生物量空间结构特征的研究[J]. 江西林业科技, 2011(3): 33-35.
- [19] 黄锦学, 凌华, 杨智杰, 等. 中亚热带细柄阿丁枫和米楮群落细根的生产和死亡动态[J]. 生态学报, 2012, 32(14): 4472-4480.
- [20] 黄锦学, 凌华, 杨智杰, 等. 细柄阿丁枫和米楮细根寿命影响因素[J]. 生态学报, 2012, 32(6): 1932-1942.
- [21] 苏炳霖, 何东进, 洪伟, 等. 武夷山风景名胜区天然林乔木层主要种群的种间联结性研究[J]. 植物资源与环境学报, 2007, 16(3): 40-45.
- [22] 陈小荣, 周荣飞, 叶珍林, 等. 浙江庆元楮栲林的群落学特征[J]. 植物资源与环境学报, 2004, 13(4): 39-43.
- [23] 李明月, 王健, 王振兴, 等. 模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与C、N、P分配格局[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1569-1577.
- [24] 史瑞和. 土壤农化分析[M]. 2版. 北京: 农业出版社, 1992.
- [25] 何斌, 秦武明, 余浩光, 等. 不同年龄阶段马占相思(*Acacia mangium*)人工林营养元素的生物循环[J]. 生态学报, 2007, 27(12): 5158-5167.
- [26] 张希彪, 上官周平. 黄土丘陵区油松人工林与天然林养分分布和生物循环比较[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 373-382.
- [27] ELSER J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3: 540-550.
- [28] 韩文轩, 吴漪, 汤璐瑛, 等. 北京及周边地区植物叶的碳氮磷元素计量特征[J]. 北京大学学报: 自然科学版, 2009, 45(5): 855-860.
- [29] 栗忠飞, 郭盘江, 刘文胜, 等. 哀牢山常绿阔叶林幼树C、N、P生态化学计量特征[J]. 东北林业大学学报, 2013, 41(4): 22-26.
- [30] ELSER J J, FAGAN W F, DENNO R F, et al. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. Nature, 2000, 408: 578-580.
- [31] REICH P B, OLEKSYN J. Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101: 11001-11006.
- [32] 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: 377-385.
- [33] HEDIN L O. Global organization of terrestrial plant-nutrient interactions[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2004, 101: 10849-10850.
- [34] AERTS R, CHAPIN F S III. The mineral nutrition of wild plants revisited: A re-evaluation of processes and patterns[M]// FITTER A, RAFFAELLI D G. Advances in Ecological Research; Vol. 30. London: Academic Press, 2000: 1-67.
- [35] 羊留冬, 杨燕, 王根绪, 等. 短期增温对贡嘎山峨眉冷杉幼苗生长及其CNP化学计量学特征的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(13): 3668-3676.
- [36] 邬畏, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 296-302.
- [37] GÜSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J]. New Phytologist, 2004, 164: 243-266.
- [38] 阎凯, 付登高, 何峰, 等. 滇池流域富磷区不同土壤磷水平下植物叶片的养分化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2011, 35(4): 353-361.
- [39] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 等. 珠江三角洲3种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 58-63.
- [40] 苗毓鑫, 王顺利, 王荣新, 等. 甘肃省森林优势树种营养元素积累及其生态服务价值研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2012, 47(6): 108-113.
- [41] TOWNSEND A R, CLEVELAND C C, ASNER G P, et al. Controls over foliar N:P ratios in tropical rain forests[J]. Ecology, 2007, 88(1): 107-118.
- [42] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 兴安落叶松(*Larix gmelinii* Rupr.)叶片养分的空间分布格局[J]. 生态学报, 2009, 29(4): 1899-1906.
- [43] 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.
- [44] 韦善华, 何斌, 魏国余, 等. 速生阶段灰木莲人工林营养元素积累及其分配格局[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(12): 36-39.
- [45] 文仕知, 黄采艺, 杨丽丽, 等. 桉木人工林营养元素的季节动态、空间分布与生物循环研究[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 96-101.
- [46] 陈灵芝, 黄建辉, 严昌荣, 等. 中国森林生态系统养分循环[M]. 北京: 气象出版社, 1997: 214.
- [47] 林植芳, 李双顺, 孙谷畴, 等. 鼎湖山亚热带地区植物的叶片矿质元素[J]. 生态学报, 1989, 9(4): 320-323.

(责任编辑: 佟金凤)