

# 闽北闽粤栲天然林主要树种幼树器官碳氮磷 化学计量特征分析

郑德祥<sup>1\*</sup>, 蔡杨新<sup>1</sup>, 杨玉洁<sup>1</sup>, 钟兆全<sup>2</sup>, 缪三华<sup>1</sup>, 吴文斌<sup>1</sup>

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 顺昌国有林场, 福建 顺昌 353200)

**摘要:** [目的] 选取4种主要优势树种幼树为研究对象, 分析其不同器官中C、N、P的生态化学计量特征, 为闽粤栲天然林的更新与保护提供理论参考。 [方法] 应用碳氮分析仪与 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  消煮法分别测定幼树的干、根、枝、叶中的C、N、P含量的质量分数, 在不同器官C、N、P含量差异分析的基础上, 通过化学计量比变化的对比分析研究幼树不同器官的C、N、P化学计量特征。 [结果] 闽北闽粤栲天然林主要优势树种幼树叶片中各元素的含量均高于其他器官, 而根与干中的营养元素含量较低; 不同器官的C:P远高于C:N与N:P, 其中, N:P最小且因树种不同而有所变化, 不同器官的C、N、P含量及化学计量特征均差异极显著。 [结论] 闽北闽粤栲天然林主要优势树种不同器官对C、N、P的选择与吸收存在差异, 其叶片C含量最高且高于全球尺度和全国尺度, 但N、P含量较低; 幼树不同器官的C:N、C:P高于平均水平, 而N:P>16; 闽粤栲天然林主要优势树种幼树对养分的利用效率与生长速率均较低, 幼树的生长更新主要受N、P元素含量的影响, 并可能受到P元素缺失的制约。

**关键词:** 天然林; 幼树; 器官; 营养元素; 化学计量; 闽粤栲

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)01-0154-06

## Stoichiometric Characteristics of C, N and P in the Dominant Species Sapling Organs of *Castanopsis fissa* Natural Forest in Northern Fujian

ZHENG De-xiang<sup>1</sup>, CAI Yang-xin<sup>1</sup>, YANG Yu-jie<sup>1</sup>, ZHONG Zhao-quan<sup>2</sup>,  
MIAO San-hua<sup>1</sup>, WU Wen-bin<sup>1</sup>

(1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;

2. State-owned Forest Farm of Shunchang, Shunchang 353200, Fujian, China)

**Abstract:** [Objective] Sample plots were set in *Castanopsis fissa* natural forest in Northern Fujian. The saplings of four dominant species were used to study the stoichiometric characteristics of C, N and P in different organs, so as to lay a theoretical basis for the regeneration and protection of *C. fissa* natural forest. [Method] The mass fractions of C, N and P in stem, root, branch and leaf of the sampling trees were determined with carbon-nitrogen analyzer and  $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$  heating digestion method. Based on variance analysis of C, N and P contents in different organs, the stoichiometric characteristics of C, N and P were studied with the comparison of the changing stoichiometric ratio. [Result] The contents of C, N and P in leaf were higher than in other organs, whereas those in root and stem were lower for the saplings of dominant species of *C. fissa* natural forest in Northern Fujian. Moreover, the C:P ratio in different organs was higher than the C:N ratio and N:P ratio. The N:P ratio was the minimum and varied among different tree species. There were highly significant differences in the contents and the stoichiometric characteristics

收稿日期: 2016-05-03

基金项目: 福建省教育厅资助项目(JA12112); 福建农林大学校重点项目建设专项(6112C035H)资助

作者简介: 郑德祥(1975—), 男, 福建仙游人, 博士, 副教授, 主要从事森林经理学研究. E-mail: fjzdx@126.com

\* 通讯作者.

of C, N and P in different organs of the tree species. [ **Conclusion** ] Compared with N and P, the C content was higher in different organs of the dominant tree species in *C. fissa* natural forest in Northern Fujian. The C:N ratio and C:P ratio were higher than the average level while the N:P ratio was higher than 16, indicating that the nutrient utilization efficiency and growth rate of the saplings of dominant species in *C. fissa* natural forest were suboptimal. The growth and the regeneration of the saplings were influenced by the content of N and P and restricted by the missing of P.

**Keywords:** natural forest; young tree; organ; nutrient element; stoichiometric; *Castanopsis fissa*

生态化学计量学是一门结合生物学、化学和物理学基本原理的综合学科<sup>[1]</sup>,该理论认为元素是构成有机体的主要成分,并对有机体的许多行为进行有序调控<sup>[2-3]</sup>。2000年 Elser 等<sup>[4]</sup>明确提出生态化学计量学的概念,2002年,Sterner 和 Elser 出版专著《Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere》,成为生态化学计量学领域的第一部巨作,标志着生态化学计量学理论的确立与形成。在国外,生态化学计量学的研究十分活跃<sup>[5-7]</sup>,国内对其研究起步则相对较晚,但已成为生态研究的热点问题之一。生态化学计量学研究从最初的水生生物生态系统逐渐扩展到对陆地植物生态系统的研究,近十余年来,诸多植物的生态化学计量特征研究见于报道,其中,又以森林生态系统和草原生态系统的研究成果居多。施家月等<sup>[8]</sup>对天童山 39 种常见植物幼树各器官的氮磷养分特征进行了研究,发现不同器官吸收 N 和 P 存在正相关关系。常云妮等<sup>[9]</sup>在尤溪县的天然米槠林中分别对乔木层、灌木层和草本层的 26 个优势种的碳氮磷化学计量特征进行了研究,结果表明,尤溪县天然米槠(*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata) 林内植物叶片 C、N、P 含量均偏低,P 是限制该林分植物生产力最重要的元素。陈亚南等<sup>[10]</sup>结合纬度和坡向 2 个相关因素,对陕西黄土高原刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.) 枯落叶的 C、N、P 生态化学计量特征进行研究,表明陕西黄土高原刺槐林的生长主要受氮素限制。这些研究集中体现了植物体对土壤 C、N、P 元素的吸收与转化及土壤 C、N、P 对植物生长发育具有的重要作用。幼树阶段是植物生活史中对环境最敏感的时期,幼树体内的养分含量在一定程度上反映了所处环境的养分条件<sup>[8]</sup>。栗忠飞等<sup>[11]</sup>、石贤萌等<sup>[12]</sup>分别对西双版纳热带雨林及哀牢山的幼树生态化学计量特征进行研究,发现幼树叶中 C、N、P 的生态化学计量比对海拔变化的响应较为显著,环境中 N 元素的变化影响幼苗对 P 元素的吸收,且不

同物种对外源 N 添加具有差异性利用策略。幼苗根和茎中的 N 内稳性比叶片的更高,叶片对 N 沉降的响应更敏感。幼树体内的 C、N、P 养分含量变化直接影响其生长发育,改变幼树的生长发育速率,最终决定其在群落中的更新及生态适应策略。

闽粤栲(*Castanopsis fissa* (Champ. ex Benth.) Rehd. et Wils.) 为壳斗科(Fagaceae)栲属(*Castanopsis* Spach)常绿乔木,中性偏阳的深根性树种,是营造水土保持林、水源涵养林、薪炭林及用材林的优良树种,也是南方集体林区最常见的主要阔叶树种之一。苏凌燕等<sup>[9]</sup>对闽粤栲林隙特征及干扰状态进行了研究,蓝文升等<sup>[12]</sup>对闽粤栲的空间结构、种群分布格局进行了研究,管大跃等<sup>[14]</sup>研究了闽粤栲天然林的生物量并构建了生物量预测模型,但对闽粤栲幼树幼苗更新及其生态化学计量研究未见报道。本研究以闽粤栲天然林中 4 种优势树种幼树为对象,对幼树各器官的养分含量进行研究,揭示闽粤栲天然林幼树 C、N、P 的生态化学计量特征,从而为闽粤栲天然林的更新与保护提供理论参考。

## 1 研究区概况

研究区位于福建省中部偏北的南平市顺昌县(26°38'~27°12' N, 117°29'~118°14' E),海拔 1 384 m。该区地处武夷山脉北段东南侧,属中亚热带海洋性季风气候,同时又受大陆性气候的影响,冬季多为西北风,夏季多为东南风。该区域年平均气温 19.1℃,年均降水量 1 738 mm,无霜期 605 d。调查区位于高阳采育场闽粤栲天然林林分中,区域面积约 2.87 hm<sup>2</sup>。该林分林龄 53 a,均由阔叶树种组成,郁闭度 0.7,林分中树种平均胸径 25.1 cm,平均树高 15.4 m。样地中的乔木层树种主要有闽粤栲、木荷(*Schima superba* Gardn. et Champ.)、米槠、中华杜英(*Elaeocarpus chinensis* (Gardn. et Champ.) Hook. f. ex Benth.)、丝栗栲(*Castanopsis fargesii* Franch.)、青冈栎(*Cyclobalanopsis glauca* (Thunb.) Oerst.)等。

## 2 研究方法

### 2.1 野外调查及取样

于2014年7月,在顺昌县国有林场下属的高阳采育场经营区内,选择保护良好的闽粤栲天然林林分进行调查。在阴坡和阳坡的林分中分别设立1块50 m × 50 m的标准地。参考李俊清编著的《森林生态学》<sup>[16]</sup>中对森林植物群落垂直结构的划分标准,将林分分为乔木层、灌木层和草本层3个林层,分别对不同林层调查与记载各树种的种类、胸径(胸径小于5 cm的测量地径)、树高等因子。以林下选择样地上分布最多的闽粤栲、木荷、米槠和中华杜英4种林分优势树种幼树为研究对象,其幼树的概况见表1。4树种按幼树平均状况选取3株生长良好的幼树进行叶、枝、干、根取样,采集植株顶层成熟、健康叶片,当年新生枝条,高度位于植株1.3 m处的干及幼树植株的完整主根<sup>[17]</sup>为试验测定样本。

表1 样地中4种优势树种幼树概况

Table 1 Average profiles of the four dominant young tree species in the sample plots

树种 Tree species	株数/株 Number of trees/strain	平均树高/m Average height/m	平均地径/cm Average ground diameter/cm
闽粤栲 <i>Castanopsis fissa</i>	438	1.26	0.78
木荷 <i>Schima superba</i>	142	1.46	1.28
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	191	2.25	1.51
中华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	30	2.82	3.66

### 2.2 样品处理及测定

对采集的样品进行整理分类,包装好带回实验室,75 °C烘干粉碎后封袋保存并做好标记,各样品重复测定3组,1组空白为对照,植物C、N质量分数采用碳氮分析仪测定;P质量分数采用HNO<sub>3</sub>-HClO<sub>4</sub>消煮测定<sup>[18]</sup>。根据测定结果分析其C、N、P含量及化学计量特征。

## 3 结果与分析

### 3.1 主要优势树种幼树不同器官C、N、P含量

本研究分别测定闽北闽粤栲天然林林分中4种主要优势树种幼树不同器官的C、N、P含量,进而分析幼树各器官营养元素含量的差异性。测定结果(表2)表明:4种优势树种幼树叶片中各元素的含量均比其他器官的高,其中,叶片中的C含量最大,4种优势树种幼树不同器官的C含量变化均表现为叶>枝>干>根,N、P含量变化均表现为叶>枝>根

>干。对不同器官各元素含量进行方差分析,结果(表3)表明:不同器官间各元素含量差异极显著( $P < 0.01$ )。

表2 4种优势树种幼树不同器官的C、N、P含量

Table 2 Content of C, N and P in different organs of the four dominant young tree species

树种 Tree species	器官 Organ	C N P (mg · g <sup>-1</sup> )		
闽粤栲 <i>Castanopsis fissa</i>	干 Trunk	457	6.85	0.15
	根 Root	454	8.76	0.21
	枝 Branch	464	10.50	0.36
	叶 Leaf	480	18.50	0.55
木荷 <i>Schima superba</i>	干 Trunk	465	4.79	0.09
	根 Root	456	5.39	0.14
	枝 Branch	468	6.92	0.28
	叶 Leaf	476	14.80	0.35
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	干 Trunk	454	5.73	0.11
	根 Root	454	6.41	0.16
	枝 Branch	469	7.96	0.35
	叶 Leaf	479	15.80	0.44
中华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	干 Trunk	468	7.11	0.08
	根 Root	460	8.30	0.27
	枝 Branch	482	13.00	0.36
	叶 Leaf	498	15.70	0.51

表3 4种优势树种幼树不同器官C、N、P含量单因素方差分析结果

Table 3 One-way ANOVA analysis results of the C, N and P content in different organs of the four dominant young tree species

树种 Tree species	P 值 P-value		
	C	N	P
闽粤栲 <i>Castanopsis fissa</i>	<0.001	<0.001	<0.001
木荷 <i>Schima superba</i>	<0.001	<0.001	<0.001
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	<0.001	0.003	<0.001
中华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	<0.001	<0.001	<0.001

### 3.2 4种优势树种幼树不同器官C、N、P的生态化学计量特征

为更好地说明闽粤栲天然林主要优势树种幼树的养分利用情况,进一步对幼树不同器官中的C、N、P的生态化学计量比进行分析,4种优势树种幼树不同器官C、N、P的生态化学计量特征(表4)表明:4种优势树种不同器官中的C:P远高于C:N与N:P,C:P由高到低依次为干>根>枝>叶,其次为C:N,其排序与C:P类似,N:P最小且在不同树种中的排序有所变化,闽粤栲与米槠的N:P由高到低依次为干>根>叶>枝,木荷的为干>叶>根>枝,中华杜英的为干>枝>根>叶。

表4 4种优势树种幼树不同器官C、N、P的生态化学计量特征

Table 4 Stoichiometry characteristics of C, N and P in different organs of the four dominant young tree species

树种 Tree species	器官 Organ	C:N	C:P	N:P
闽粤栲 <i>Castanopsis fissa</i>	干 Trunk	66.7	3 071	46.0
	根 Root	51.9	2 175	42.0
	枝 Branch	44.1	1 295	29.4
	叶 Leaf	25.8	873	33.8
木荷 <i>Schima superba</i>	干 Trunk	97.0	5 015	51.7
	根 Root	84.6	3 348	39.6
	枝 Branch	67.6	1 653	24.5
	叶 Leaf	32.1	1 341	41.8
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	干 Trunk	79.3	3 987	50.3
	根 Root	70.9	2 815	39.7
	枝 Branch	59.0	1 352	23.0
	叶 Leaf	30.2	1 090	36.1
中华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	干 Trunk	65.9	5 763	87.4
	根 Root	55.5	1 716	30.9
	枝 Branch	37.1	1 337	36.0
	叶 Leaf	31.7	975	30.7

4种幼树树干的C:N、C:P、N:P平均值分别为65.9~97.0、3 071~5 763、46.0~87.4,最高值分别是最低值的1.47、1.88、1.90倍,表明不同优势树种幼树树干中,C:P与N:P的比值基本接近,C:N比值相差最小,根中C:N、C:P、N:P的平均值最大值是最小值的1.63、1.95、1.36倍;叶片的C:N、C:P、N:P平均值最大值是最小值的1.24、1.54、1.36倍,C:P的比值差异较大,C:N比值相差最小;枝中的C:N、C:P、N:P的平均值最大值是最小值的1.82、1.28、1.57倍。C:N的比值差异最大,C:P的比值相差最小。运用单因素方差分析对4种优势树种幼树不同器官的生态化学计量特征进行分析比较,结果(表5)表明:不同元素的化学计量特征在不同器官中差异极显著( $P < 0.01$ )。4种幼树不同器官对C、N和P的吸收与利用存在差异,其生长更新亦将受到影响。

表5 4种优势树种幼树不同器官C、N、P生态化学计量比单因素方差分析结果

Table 5 One-way ANOVA analysis results of the stoichiometry ratio of C, N and P in different organs of the four dominant tree species

树种 Tree species	P值 P-value		
	C:N	C:P	N:P
闽粤栲 <i>Castanopsis fissa</i>	<0.001	0.006	<0.001
木荷 <i>Schima superba</i>	<0.001	<0.001	<0.001
米槠 <i>Castanopsis carlesii</i>	<0.001	0.002	<0.001
中华杜英 <i>Elaeocarpus chinensis</i>	<0.001	<0.001	<0.001

## 4 讨论

由于叶片是植物光合作用与代谢的主要场所,植物发育过程中将大量养分传递给叶片以满足植物生长的需要,幼树叶片中各营养元素含量最高,而幼树树干是高度木质化的器官,幼树根系分布尚浅,对吸收养分能力较弱。故而干和根中的营养元素含量较少,而枝作为联接树干和叶的主要营养传输器官,营养元素含量介于二者之间,因此,闽北闽粤栲天然林4种主要优势树种幼树叶片的C、N、P元素含量最大,其次为枝,而后为干或根,该结果验证了Krieger等<sup>[19]</sup>的理论,认为木质部的养分大部分被运输至更需要的部位,植物的干和根的养分含量较低,也表明各优势树种幼树不同器官对C、N和P的吸收具有选择性与差异性,其结论也与常云妮等<sup>[9]</sup>对尤溪县米槠林内植物化学计量研究结果基本一致。在闽北闽粤栲天然林4种主要优势树种幼树不同器官中,叶片的C含量最高,平均为 $483.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,大于全球492种陆生植物的平均C含量( $464 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[4]</sup>,也高于邻近地区同为壳斗科栲属的天然米槠林叶片的平均C含量( $441.9 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>;闽北闽粤栲天然林4种主要优势树种幼树叶片的N平均含量( $16.2 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )低于全球N含量水平( $18.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[20]</sup>和全国753种植物叶片的N含量( $18.63 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[21]</sup>,略低于中国东部南北样带654种植物叶片的N含量( $17.55 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[22]</sup>。闽粤栲天然林4种主要优势树种幼树叶片的P含量为 $0.46 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ ,明显低于全球水平及全国和中国东部南北样带的叶片P含量( $1.42$ 、 $1.21$ 、 $1.28 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ )<sup>[20-22]</sup>。闽北闽粤栲天然林4种主要优势树种幼树叶片的N、P含量较低,其原因可能是由于该区域高温多雨和降水淋溶作用导致土壤中的N、P含量不足,间接导致了叶片中的N、P含量降低,幼树不同器官对各营养元素的选择与吸收存在差异,这将直接影响4种优势树种幼树的新陈代谢与更新。

幼树不同器官中的C、N、P化学计量比变化影响幼树生长速率,进而影响幼树的更新及生态适应策略<sup>[17]</sup>。闽粤栲天然林4种主要优势树种的C、N、P计量比在不同器官中的变化差异显著,由于较高的C含量及较低的N、P含量,导致不同器官的C:N、C:P均大于全球尺度内植物的C:N和C:P(22.5和232)<sup>[23]</sup>,较高的C:N与C:P反映了幼树对营养的利用效率较低,植物体内可能由于N元素或P元素的

缺失导致植物生长速率降低;而植物体内 N:P 化学计量特征反映 N 和 P 2 种营养元素的供应状况和相对有效性<sup>[24]</sup>,当植物 N:P < 14 时,植物生长主要受 N 限制;当 N:P > 16 时,植物生长主要受 P 限制;当 14 < N:P < 16,时,同时受 N 和 P 限制或二者均不缺少<sup>[25]</sup>。闽粤栲天然林 4 种主要优势树种幼树不同器官的 N:P 均显著高于 16,同时不同器官中的 P 含量均较低,因此,其幼树生长更新可能受 P 元素缺失的制约。

影响植物 N:P 化学计量特征的因素复杂且综合。在童山常绿阔叶林中,不同物种间的 N:P 差异较大,但在各种植物的演替过程中,N:P 总体变化特征基本一致<sup>[26]</sup>。中亚热带杉木人工林中,不同生活型植物的 N:P 差异不显著<sup>[27]</sup>。因此,影响植物生态化学计量比的因素复杂多样,不同植物、不同群落的养分限制性受多种因素控制。西双版纳热带雨林幼树叶片中的生态化学计量比对海拔变化的响应显著<sup>[11]</sup>,亚热带中幼林针阔混交林生态化学计量特征与其土壤存在一定关系<sup>[28]</sup>,温度对贡嘎山峨眉冷杉幼苗化学计量特征的影响差异显著<sup>[29]</sup>。这些研究集中体现了植物的生态化学计量特征与其所处海拔、土壤和温度等因素存在一定关系,闽北闽粤栲天然林 4 种优势树种幼树不同器官 C、N 和 P 化学计量特征的差异是否与这些因素有关还有待进一步研究。

## 5 结论

(1) 闽北闽粤栲天然林中 4 种优势树种幼树不同器官间各元素含量差异显著,其中, C 含量最大,表现为叶 > 枝 > 干 > 根,而 N、P 含量表现为叶 > 枝 > 根 > 干。

(2) 闽北闽粤栲天然林 4 种优势树种幼树不同器官中 C:P 远高于 C:N 与 N:P,其次为 C:N, N:P 最小,其化学计量特征在不同器官中差异极显著,幼树对养分的利用效率较低。

(3) 闽北闽粤栲天然林 4 种优势树种幼树不同器官中的 P 含量均较低,且 N:P 均显著高于 16,其幼树生长更新主要受 N、P 元素含量的影响,并可能受 P 元素缺失的制约。

## 参考文献:

[1] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.  
[2] Schimel D S. All life is chemical[J]. BioScience, 2003, 53(5): 521

-524.  
[3] Michaels A F. The ratios of life. Science[J]. Science, 2003, 300(5621): 906-907.  
[4] 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.  
[5] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial Redfield-type ratios[J]. Ecology, 2004, 85(9): 2390-2401.  
[6] Schade J D, Espeleta J F, Klausmeier C A, et al. A conceptual framework for ecosystem stoichiometry: balancing resource supply and demand[J]. Oikos, 2005, 109(1): 40-51.  
[7] Hall S R, Leibold M A, Lytle D A, et al. Inedible producers in food webs: Controls on stoichiometric food quality and composition of grazers[J]. American Naturalist, 2006, 167(5): 628-637.  
[8] 施家月, 王希华, 闫恩荣, 等. 浙江童山常见植物幼树器官的氮磷养分特征[J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 2006, 2006(2): 121-129.  
[9] 常云妮, 钟全林, 程栋梁, 等. 尤溪天然米栎林植物碳氮磷的化学计量特征及其分配格局[J]. 植物资源与环境学报, 2013, 22(3): 1-10.  
[10] 陈亚南, 马露莎, 张向茹, 等. 陕西黄土高原刺槐枯落叶生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2014, 34(15): 4412-4422  
[11] 栗忠飞, 刘文胜, 张彬, 等. 西双版纳热带雨林幼树 C、N、P 的生态化学计量比对海拔变化的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(5): 80-85.  
[12] 石贤萌, 纪金华, 宋亮, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林两种优势幼苗 C、N、P 化学计量特征及其对 N 沉降增加的响应[J]. 植物生态学报, 2015, 39(10): 962-970.  
[13] 苏凌燕, 郑德祥, 钟兆全, 等. 闽北闽粤栲天然林林隙特征及干扰状况[J]. 森林与环境学报, 2015, 35(2): 125-130.  
[14] 蓝文升, 钟兆全, 郑德祥, 等. 闽北天然闽粤栲林分空间结构研究[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2014, 15(3): 398-403.  
[15] 管大跃, 黄国泉. 闽粤栲天然林生物量及预测模型研究[J]. 福建林业科技, 2000, 27(2): 34-36.  
[16] 李俊清. 森林生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 224-226.  
[17] 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.  
[18] 董鸣. 陆地生物群落调查观测与分析[M]. 北京: 中国标准出版社, 1997: 154-155.  
[19] Krieger H, Schaefer H, Peng L. Growth dynamics of a planted *Eucalyptus exseria* (F. Muell) stand in south China: adaptation of generic a simulation model[M]. Kassel: Kassel University Press, 1990: 10-15.  
[20] 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(30): 11001-11006.  
[21] Han W, Fang J, Guo D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. New

- Phytologist, 2005, 168(2):377-385.
- [22] 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.
- [23] Elser J J, Sterner R W, Gorokhova E, *et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters, 2000, 3(6):540-550.
- [24] 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.
- [25] Tessier J T, Raynal D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. Journal of Applied Ecology, 2003, 40(3):523-534.
- [26] 阎恩荣,王希华,周武. 天童常绿阔叶林演替系列植物群落
- 的 N:P 化学计量特征[J]. 植物生态学报,2008,32(1):13-22.
- [27] 王恩熙,谢锦升,杨柳明,等. 中亚热带杉木人工老龄林林下植被叶片碳氮磷化学计量特征[J]. 亚热带资源与环境学报,2015,10(4):31-37.
- [28] 周丽,张卫强,唐洪辉,等. 南亚热带中幼龄针阔混交林生态化学计量特征[J]. 生态环境学报,2014,23(11):1732-1738.
- [29] 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.

(责任编辑:徐玉秀)