

王家妍, 魏国余, 韦铄星, 莫雅芳, 蒋焱. 9 个主要南方人工林树种叶片化学计量学特征研究 [J]. 广东农业科学, 2019, 46(5): 48-53.

## 9 个主要南方人工林树种叶片化学计量学特征研究

王家妍<sup>1</sup>, 魏国余<sup>1</sup>, 韦铄星<sup>2</sup>, 莫雅芳<sup>1</sup>, 蒋焱<sup>2</sup>

(1. 广西国有高峰林场, 广西 南宁 530002; 2. 广西壮族自治区林业科学研究院 / 国家林业局中南速生材繁育实验室 / 广西优良用材林资源培育重点实验室, 广西 南宁 530002)

**摘要:** 【目的】通过研究 9 个主要南方人工林树种叶片 N、P、K 化学计量学特征, 丰富主要人工林树种化学计量学基础数据, 为我国南方地区林木种植和管护提供决策依据。【方法】野外平均木叶片采集, 室内进行化学测定分析 N、P、K 含量。【结果】9 个树种叶片的 N、P、K 含量均值分别为 13.90、1.39、8.70 mg/g, 不同树种间的 N、P、K 含量存在极显著差异, 厚荚相思 N、P、K 含量高于其他树种, 9 个树种叶片的 N:P、N:K 和 K:P 变化范围为 7.79~17.79、1.15~2.16、0.07~0.25。不同树种 N 和 P 含量呈极显著正相关关系, 存在协同作用。不同生活型树种叶片 N 和 P 元素含量存在极显著差异, 表现为阔叶树种 N 和 P 含量明显大于针叶林。【结论】9 个主要南方人工林树种生长主要受到 N 元素限制, 在林分后期管理上应加强养分管理、增施氮肥。

**关键词:** 氮; 磷; 钾; 氮磷比; 化学计量学; 阔叶树种; 针叶树种

中图分类号: S718.3

文献标志码: A

文章编号: 1004-874X(2019)05-0048-06

## Study on Stoichiometric Characteristics of Leaves of Nine Major Plantation Species in Southern China

WANG Jiayan<sup>1</sup>, WEI Guoyu<sup>1</sup>, WEI Shuoxing<sup>2</sup>, MO Yafang<sup>1</sup>, JIANG Yi<sup>2</sup>

(1. Guangxi Gaofeng State Owned Forestry Farm, Nanning 530002, China; 2. Guangxi Forestry Research Institute / Key Laboratory of Central South Fast-growing Timber Cultivation, Forestry Ministry of China / Guangxi Key Laboratory of Superior Timber Trees Resource Cultivation, Nanning 530002, China)

**Abstract:** 【Objective】By studying the stoichiometric characteristics of nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) in the leaves of nine major plantation species in Southern China, the basic stoichiometric data of the main plantation species were enriched, which provided decision-making basis for forest planting and management in Southern China.

【Method】The leaves samples were collected from the average trees in the field, and then the contents of N, P and K were measured. 【Conclusion】The average contents of N, P and K of nine tree species were 13.90 mg/g, 1.39 mg/g and 8.70 mg/g, respectively. There were significant differences in the contents of N, P and K among different tree species, and the contents of N, P and K of *Acacia crassiparpa* were much higher than those of other species. The ratios of N:P, N:K and K:P in leaves of nine species ranged from 7.79 to 17.79, from 1.15 to 2.16, and from 0.07 to 0.25, respectively. There was an extremely significant positive correlation between the contents of N and P in different species, and there were synergistic effects. There were significant differences in the contents of N and P in leaves of different life-form tree species, and the contents of N and P in leaves of broad-leaved tree were significantly higher than those of coniferous tree. 【Conclusion】The growth of 9 tree species were mainly restricted by nitrogen element, which indicated that the nutrients management should be strengthened and the application of nitrogen fertilizer should be increased in the later stage of forest management.

【Conclusion】The growth of 9 tree species were mainly restricted by nitrogen element, which indicated that the nutrients management should be strengthened and the application of nitrogen fertilizer should be increased in the later stage of forest management.

**Key words:** nitrogen; phosphorus; potassium; ratio of nitrogen to phosphorous; chemometrics; broad-leaved tree; coniferous tree

收稿日期: 2019-01-31

基金项目: 广西林业科技项目(桂林科字〔2016〕第3号)

作者简介: 王家妍(1988—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为森林培育和林木育种, E-mail: 750904887@qq.com

通信作者: 蒋焱(1968—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为森林培育, E-mail: 1753488430@qq.com

【研究意义】生态化学计量学是研究生物体内各种元素平衡和能量平衡的基础学科<sup>[1]</sup>，它通过有机体的元素组成，强调有机体主要化学元素的平衡关系<sup>[2]</sup>，N、P、K是促进植物生长调节和生理代谢的主要元素<sup>[3]</sup>，影响植物生长发育，三者关系密切。植物叶片的各元素比值具有指示作用，能反映植物的养分利用效率，如N:P是影响群落结构和功能性的一个重要指标，也是判断植物和整个生态系统生产力限制性营养元素的指示剂<sup>[4]</sup>。植物叶片的化学计量特征是植物对环境适应的结果，常被作为评判植物营养策略和生态系统是否存在养分限制的一个重要指标，可作为土壤养分供给的指标，对于判断植物营养情况意义重大<sup>[5-6]</sup>。【前人研究进展】随着生态化学计量学理论的逐步完善和广泛应用，该理论受到越来越多学者的关注，目前，针对叶片化学计量学研究多集中在生态系统、植物器官、种群等方面<sup>[7]</sup>。Han等<sup>[8-9]</sup>利用大量陆生植物养分数据，研究植物元素在个体与环境之间的循环、转化利用、分布规律等，揭示植物元素和生态系统的耦合关系。Tian等<sup>[10-11]</sup>对全球3441种陆生植物叶片N、P化学计量学特征研究发现，全球植物叶片平均氮和磷含量分别为18.9 mg/g和1.2 mg/g，低纬度地区P含量低于高纬度地区，土壤有效性养分是影响叶片N与P比例的主要因素。刘兴诏等<sup>[12]</sup>研究指出P是制约亚热带森林系统中生物生长的重要因子。【本研究切入点】现阶段我国南方大力发展人工林种植，林业产业经济增长速度较快，南方林业发展是国家林业发展战略重要一环，但是南方林业发展存在森林质量不高、森林结构不合理、生态系统功能退化、林地流失严重等问题<sup>[13]</sup>。植物叶片的化学计量可用于判断植物营

养情况，对于提高森林生产力意义重大，而现阶段对南方地区人工林树种化学计量学研究和应用比较缺乏。【拟解决的关键问题】本研究以我国南方地区9种主要人工林树种为试验对象，研究各个树种叶片N、P、K化学计量学特征，探索不同生活型树种之间化学计量学差异，旨在丰富生态化学计量学基础数据，并为林木种植和管护提供决策依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于广西国有高峰林场界牌分场，地处南宁盆地的北缘，地理位置为108° 08' ~108° 53' E、22° 49' ~23° 15' N；南亚热带季风气候，年平均温度21.8℃，≥10℃活动积温7500℃，年平均降雨量1200~1500mm；丘陵和山地地貌，平均海拔100~220m，成土母岩为砂岩，土壤类型为赤红壤，质地中壤<sup>[14]</sup>，土壤厚度为100~110cm。

### 1.2 试验方法

**1.2.1 样品采集** 样品采集于2018年6~7月植物生长旺盛期进行。在每个树种林分中随机设置3个20m×20m标准调查样方，调查每木检尺和林分基本情况，林分基本情况详见表1。根据调查结果，在每个树种林分内选取3株平均木，用高枝剪采集生长成熟、未被破坏的完整树叶（除去叶柄）。采样时注意剔除不同方位和高度对树叶生长的影响，将平均木树冠分为上、中、下3个层次，各个层次采集树冠外侧东、南、西、北4个方向等量的健康成熟叶片，3株平均木采集样品混合均匀，带回实验室进行样品测定。

表1 林分基本情况  
Table 1 Basic information of forest stand

生活型 Life-form	树种 Species	林龄 Forest age	平均胸径	平均树高	密度 Density (plant/hm <sup>2</sup> )	郁闭度 Canopy density
			Average diameter at breast height (DBH, cm)	Average tree height (m)		
阔叶树种 Broad-leaved tree	厚荚相思 ( <i>Acacia crassicaarpa</i> Benth.)	16	21.5	22.2	300	0.8
	火力楠 ( <i>Michelia macclurei</i> )	15	16.7	15.8	1200	0.9
	红锥 ( <i>Castanopsis hystrix</i> )	16	21.4	14.6	400	0.8
	巨尾桉 ( <i>Eucalyptus grandis</i> × <i>urophylla</i> )	16	19.0	25.5	1200	0.8
	大叶栎 ( <i>Quercus griffithii</i> )	15	18.2	19.4	400	0.8
	米老排 ( <i>Mytilaria laosensis</i> )	16	13.8	14.2	800	0.8
针叶树种 Coniferous tree	湿地松 ( <i>Pinus elliottii</i> )	16	21.3	15.3	700	0.8
	杉木 ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )	16	20.3	17.0	900	0.8
	马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> )	15	18.6	13.9	800	0.8

**1.2.2 样品处理及测定** 样品带回实验室后,放入烘箱 105 °C 杀青 15 min, 恒温 85 °C 烘干至恒重, 粉碎后过 0.5 mm 筛后装瓶保存。样品采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-HClO<sub>4</sub> 消煮后, N 含量采用凯氏定氮法测定, P 含量采用钼锑抗比色法测定, K 含量采用火焰光度计法测定 [15]。

**1.2.3 数据处理** N、P、K 含量为质量含量, 各化学计量比为质量比。数据采用 Excel、SPSS19.0 软件进行处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 9 个树种叶片 N、P、K 化学计量学特征比较

9 个树种叶片 N、P、K 含量和化学计量学特征见表 2。由表 2 可知, 9 个主要南方人工林树种叶片 N 含量变化范围为 9.75~23.22 mg/g, 平均为 13.90 ± 3.79 mg/g; P 含量变化范围为 0.61~2.33

mg/g, 平均为 1.39 ± 0.44 mg/g; K 含量变化范围为 4.41~12.86 mg/g, 平均为 8.70 ± 2.49 mg/g。叶片 N : P 化学计量学比值变化范围分别为 7.79~17.79, 平均为 10.49 ± 2.76; N : K 变化范围为 1.15~2.16, 平均为 1.69 ± 0.05; K : P 变化范围为 0.07~0.25, 平均为 0.17 ± 0.06。

单因素方差分析结果表明, 不同树种之间 N、P、K 含量差异极显著。厚荚相思、红锥和米老排的 N 含量显著高于马尾松、湿地松和杉木; 厚荚相思 P 含量显著高于其他树种; 厚荚相思、火力楠的 K 含量显著高于大叶桉。不同树种之间的 N : P 和 K : P 差异极显著, N : K 差异显著。湿地松 N : P 显著高于其他树种; 火力楠 N : K 显著高于大叶桉; 湿地松与大叶桉的 K : P 差异不明显, 但显著高于其他树种。

表 2 9 个树种叶片 N、P、K 化学计量学特征比较

Table 2 Comparison of stoichiometric characteristics of N, P and K in leaves of nine tree species

树种 Specie	N (mg/g)	P (mg/g)	K (mg/g)	N : P	N : K	K : P
厚荚相思 ( <i>Acacia crassicaarpa</i> Benth.)	23.22 ± 1.06a	2.33 ± 0.06a	12.86 ± 1.81a	9.97 ± 0.60b	1.81 ± 0.04ab	5.52 ± 1.10b
红锥 ( <i>Castanopsis hystrix</i> )	15.49 ± 1.22b	1.54 ± 0.09bc	9.62 ± 1.23ab	10.09 ± 0.89b	1.61 ± 0.01ab	6.27 ± 0.33b
米老排 ( <i>Mytilaria laosensis</i> )	15.39 ± 1.93b	1.45 ± 0.05bc	10.06 ± 2.34ab	10.60 ± 1.65b	1.53 ± 0.05ab	6.93 ± 0.55b
巨尾桉 ( <i>Eucalyptus grandis</i> × <i>urophylla</i> )	14.39 ± 0.12bc	1.67 ± 0.03b	6.68 ± 2.48ab	8.62 ± 0.18b	2.16 ± 0.05ab	4.00 ± 0.71b
大叶桉 ( <i>Quercus griffithii</i> )	12.28 ± 0.14bcd	1.29 ± 0.08cd	11.53 ± 0.56a	9.52 ± 0.55b	1.06 ± 0.05b	8.95 ± 0.55ab
火力楠 ( <i>Michelia macclurei</i> )	12.03 ± 0.35bcd	1.07 ± 0.19d	4.41 ± 0.63b	11.22 ± 1.92b	2.73 ± 0.04a	4.11 ± 0.30b
马尾松 ( <i>Pinus massoniana</i> )	11.59 ± 0.59cd	1.46 ± 0.08bc	6.43 ± 1.24ab	7.94 ± 0.85b	1.80 ± 0.05ab	4.40 ± 0.69b
湿地松 ( <i>Pinus elliotii</i> )	10.92 ± 0.75cd	0.61 ± 0.12e	8.26 ± 0.44ab	17.79 ± 2.95a	1.32 ± 0.05ab	13.45 ± 0.27a
杉木 ( <i>Cunninghamia lanceolata</i> )	9.75 ± 0.86e	1.12 ± 0.04d	8.45 ± 1.35ab	8.70 ± 1.13b	1.15 ± 0.05ab	7.54 ± 1.11b

注: 同列数据后小写英文字母不同者表示经 Duncan 多重比较差异显著。

Note: The different lowercase letters in the same column represent significant differences with Duncan multiple comparisons.

### 2.2 不同生活型树种叶片化学计量学特征比较

根据树种不同生活型, 将 9 个树种分为阔叶树种和针叶树种两个生活型。方差分析结果 (表 3) 表明, 阔叶树种和针叶树种之间的 N、P 含量

差异极显著, 阔叶树种的 N、P 含量分别比针叶树种高出 47.77%、45.79%。阔叶树种与针叶树种之间的 K 含量以及 N : P、N : K、P : K 差异不显著。

表 3 不同生活型树种叶片化学计量学特征

Table 3 Stoichiometric characteristics of leaves of different life-form tree species

生活型 Life-form	N (mg/g)	P (mg/g)	K (mg/g)	N : P	N : K	K : P
阔叶树种 Broad-leaved tree	15.47 ± 3.73	1.56 ± 0.39	9.19 ± 2.86	10.00 ± 0.82	1.82 ± 0.52	5.96 ± 1.70
针叶树种 Coniferous tree	10.76 ± 0.76	1.07 ± 0.35	7.71 ± 0.91	11.47 ± 4.47	1.43 ± 0.27	8.46 ± 3.75
F 值	11.9	8.86	2.16	1.43	0.48	2.33
P 值	0.002	0.006	0.153	0.242	0.490	0.139

### 2.3 不同树种叶片化学计量学特征相关性分析

Pearson 相关分析结果 (表 4) 表明, 不同树

种叶片 N 含量与 P 含量呈极显著正相关关系, N : P 与 N 含量的相关性小于与 P 含量的相关性, 说明

N : P 受 P 含量变化影响更大。K 含量与其他化学计量学特征无显著相关关系。N : P 与 K : P 呈极显著正相关关系; N : K 与 K : P 呈显著负相关关系, 其他化学计量学特征相关性不明显。

表 4 不同树种叶片化学计量学 Pearson 相关性分析  
Table 4 Pearson correlation analysis of stoichiometric characteristics of leaves of different tree species

指标 Index	N	P	K	N : P	N : K
P	0.8731**				
K	0.6146	0.4900			
N : P	-0.1523	-0.5951	-0.0228		
N : K	0.1834	0.1979	-0.6304	-0.1288	
K : P	-0.3076	-0.6136	0.3146	0.7893**	-0.6939*

注: \* 表示差异显著, \*\* 表示差异极显著。

Note: \* represents significant difference, \*\* represents extremely significant difference.

### 3 讨论

N、P、K 是植物生长必需的大量元素, 其在植物体内含量的高低影响植物生长和群落动态<sup>[10]</sup>。通过对 9 个南方主要人工林树种叶片 N、P、K 含量的测定, 发现 9 个树种叶片 N 含量平均为 13.90 mg/g, 高于同纬度珠三角常绿阔叶林 (11.50 mg/g)<sup>[16]</sup>, 低于云南季风常绿阔叶林 (20.88 mg/g)<sup>[17]</sup>, 与贵州常见森林类型叶片 N 含量 (13.1 mg/g)<sup>[18]</sup> 基本相同, 低于全国平均值 (20.2 mg/g)<sup>[9]</sup> 和全球平均值 (20.1 mg/g)<sup>[19]</sup>。P 含量平均值为 1.39 mg/g, 介于珠三角常绿阔叶林 (1.31 mg/g)<sup>[20]</sup> 和云南季风常绿阔叶林 (1.41 mg/g)<sup>[21]</sup> 之间, 低于全国平均值 (1.46 mg/g)<sup>[9]</sup> 和全球平均值 (1.77 mg/g)<sup>[19]</sup>。K 含量平均值为 8.70 mg/g, 略高于全国 204 种乔木叶片 K 含量 7.56 mg/g<sup>[20]</sup>。大尺度研究表明, 在水分、温度和土壤养分条件等因素的影响下, 叶片 N 和 P 含量通常随着纬度降低而递减<sup>[10]</sup>。本研究区域属于亚热带季风气候, 处于纬度较低地区, 气候湿热, 土壤淋溶严重, 造成土壤中移动性较强的有效 N 和 P 含量偏低。9 个树种叶片 N、P、K 含量中, 厚荚相思叶片 3 种元素含量均较高, 这是因为厚荚相思根部有固氮根瘤, 对 N 元素吸收利用效率高, 导致叶片 N 含量高, 且厚荚相思每年有大量的枯枝落叶归还林地, 分解后养分丰富, 因此该树种是培肥地力的好树种, 可用作混交树种或公益林树种, 用以改良土壤和恢复地力。

在林木经营生产中, 如何判断林木营养情况和有针对性施肥, 是提高林木质量和生产力的关键措施之一。叶片是植物进行光合作用最活跃的器官, 叶片中 N : P 是判断植物营养状况的关键指标, 影响植物以及整个生态系统的生产力<sup>[21]</sup>。Güsewell<sup>[22]</sup> 研究发现, N : P > 20 时, 植物受到 P 元素限制; N : P < 10 时, 植物受到 N 元素限制; N : P 介于 10~20 之间时, 植物受 N、P 或 N : P 的影响。本研究中 9 个树种 N : P 均小于 10, 说明植物生长受到 N 元素限制。与大尺度研究相比, 本地区植物叶片 N 含量偏低, 导致 N : P 偏小, 在林分后期管理上应加强养分管理, 增施氮肥。根据 Venterink 研究结果, 当 N : K > 2.1、K : P < 3.4 时, 植物生长易受 K 元素限制<sup>[23]</sup>。本研究中 9 个树种 N : K 和 K : P 未在阈值内, 说明其生长并未受到 K 元素限制。

陆生植物的生物学和生理学过程基本相似, 如呼吸作用、光合作用、新陈代谢作用等, 所以植物按照一定比例吸收和存储营养元素, 并且各营养元素之间存在一定的相关性<sup>[24]</sup>。本研究中, 9 个树种叶片 N 和 P 含量呈极显著正相关关系, 说明树体吸收 N 和 P 存在协同作用, 吸收格局稳定。N : P 与 P 含量的相关关系强于 N 含量, 说明 P 含量变化对 N : P 的影响更大, 这也符合生长速率假说 (Growth Rate Hypothesis), 生物量累积速率快的物种对磷的需求更高, 对 N : P 要求更低<sup>[25]</sup>。叶片中 N 含量与 K 含量、P 含量与 K 含量的相关系数小于 N 含量与 P 含量, 表明在小尺度上 K 含量是一个微弱因子, 这与秦海<sup>[26]</sup> 研究结果相似。

不同树种叶片养分含量差异受到环境和树种特性影响, 本研究中的阔叶树种 N、P 含量显著大于针叶树种, 这与 Han<sup>[8]</sup>、阎恩荣等<sup>[27]</sup> 研究相同, 说明不同生活型植物营养需求存在差异, 在相同环境和营林措施下, 各生活型树种有不同的养分吸收策略, 阔叶树种比针叶树种对 N 元素和 P 元素的需求更高。

### 4 结论

对我国南方地区 9 个主要人工林树种叶片 N、P、K 化学计量学特征的研究结果表明: (1) 9 个树种叶片 N : P 均小于 10, 说明林分生长主要受到 N 元素限制, 在树种生长旺季应加强养分管理、添施氮肥。(2) 厚荚相思叶片各养分含量

高于其他树种,可用作混交树种或公益林树种。

(3)不同树种N和P含量呈极显著正相关关系,说明树体吸收N元素和P元素存在协同作用。

(4)不同生活型树种养分吸收策略存在差异,阔叶树种N、P含量显著大于针叶树种。

#### 参考文献 (References) :

- [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理论[J].植物生态学报,2010,34(1):2-6. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.002.  
HE J S,HAN X G. Ecological stoichiometry: Searching for unifying principles from individuals to ecosystems [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*,2010,34(1):2-6. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.002.
- [2] 高伟,林捷,黄石德,黄雍容,聂森,岳新建,叶功富. 南亚热带海岸沙地不同树种叶片化学计量学季节动态研究[J]. 热带作物学报,2018,39(11):2304-2312. doi:10.3969/j.issn.1000-2561.2018.11.028.  
GAO W, LIN J, HUANG S D, HUANG R R, NIE S, YUE X J, YE G F. Seasonal dynamics of leaf stoichiometry for different tree species in a Coastal Sand Dune in Subtropical China [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*,2018,39(11):2304-2312. doi:10.3969/j.issn.1000-2561.2018.11.028.
- [3] 邵梅香,覃林,谭玲.我国生态化学计量学研究综述[J].安徽农业科学,2012,40(11):6918-6920. doi:10.13989/j.cnki.0517-6611.2012.11.003.  
SHAO M X, QIN L, TAN L. Review of researches on ecological stoichiometry in China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012,40(11):6918-6920. doi:10.13989/j.cnki.0517-6611.2012.11.003.
- [4] OHEIMB G. N:P ratio and the nature of nutrient limitation in Calluna-dominated heathlands [J]. *Ecosystems*, 2010, 13(2): 317-327. doi:10.1007/s10021-010-9320-y.
- [5] SCHREEG L A, SANTIAGO L S, WRIGHT S J, TURNER B L. Stem root and older leaf N:P ratios are more responsive indicators of soil nutrient availability than new foliage [J]. *Ecology*,2014,95(8):2062-2068. doi:10.1890/13-1671.1.
- [6] 刘岑薇,郑向丽,王俊宏,徐国忠,黄毅斌. 陆生和水域生态系统植物的C、N、P生态化学计量特征研究综述[J]. 中国农学通报,2017,33(17):70-75.  
LIU C W, ZHENG X L, WANG J H, XU Z G, HUANG Y B. Reviews on ecological stoichiometry characteristics of CNP in terrestrial and aquatic plants [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*,2017,33(17):70-75.
- [7] 魏希杰,王伟.我国近五年C、N、P生态化学计量学研究进展[J]. 青海畜牧兽医杂志,2018,48(4):60-65. doi:10.3969/j.issn.1003-7950.2018.04.021.  
WEI X J, WANG W. Advances in eco-chemometrics of C, N and P in China in recent five years [J]. *Chinese Qinghai Journal of Animal and Veterinary Sciences*,2018,48(4):60-65. doi:10.3969/j.issn.1003-7950.2018.04.021.
- [8] HAN W X, FANG J Y, REICH P B, WOODWARD F I. Biogeography and variability of eleven mineral elements in plant leaves across gradients of climate, soil and plant functional type in China [J]. *Ecology Letter*, 2011, 14:788-796. doi:10.1111/j.1461-0248.2011.01641.x.
- [9] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, YAN Z. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*,2005,168:377-385. doi:10.1111/j.1469-8137.2005.01530.x.
- [10] TIAN D, YAN Z B, KARL J N, HAN W X, KATTGE J, REICH P B, LUO Y K, CHEN Y H, TANG Z Y, HU H F, ERIGHT L J, SCHMID B, FANG J Y. Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent [J]. *National Science Review*, 2018,3:728-739. doi:10.1093/nsr/nwx142.
- [11] 田地,严正兵,方精云.植物化学计量学:一个方兴未艾的生态学研究方向[J].自然杂志,2018,40(4):235-241. doi:10.3969/j.issn.0253-9608.2018.04.001.  
TIAN D, YAN Z B, FANG J Y. Plant stoichiometry: a research frontier in ecology [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2018, 40(4): 235-241. doi:10.3969/j.issn.0253-9608.2018.04.001.
- [12] 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[J]. 植物生态学报,2010,34(1):64-67. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.010.  
LIU X Z, ZHOU G Y, ZHANG D Q, LIU S Z, ZHU G W, YAN J H. N and P stoichiometry of plant and soil in lower subtropical forest successional series in southern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1):64-67. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.010.
- [13] 赵其国,黄国勤,王礼献.中国南方森林生态系统的功能、问题及对策[J].森林与环境学报,2015,35(4):289-296. doi:10.13324/j.cnki.jfef.2015.04.001.  
ZHAO Q G, HUANG G Q, WANG L X. Forest ecosystems in the south China: functions, problems and countermeasures [J]. *Journal of Forest and Environment*,2015,35(4):289-296. doi:10.13324/j.cnki.jfef.2015.04.001.
- [14] 李艳兰,何慧,黄雪松.南宁市近50年气候变化特征[J].广西大学学报(自然科学版),2007,32(2):159-162. doi:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2007.02.015.  
LI Y L, HE H, HUANG X S. Analysis on climate change in Nanning city in recent 50 years [J]. *Journal of Guangxi University (Nat Sci Ed)*, 2007,32(2):159-162. doi:10.13624/j.cnki.issn.1001-7445.2007.02.015.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000:317-322.  
LU R K. Analytical Methods of Soil Agrochemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Publishing House, 2000:317-322.
- [16] 吴统贵,陈步峰,肖以华,潘勇军,陈勇,萧江.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. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.009.  
WU T G, CHEN B F, XIAO Y H, PAN Y J, CHEN Y, XIAO J H. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010,34(1):58-63. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.009.
- [17] 黄小波,刘万德,苏建荣,李帅锋,郎学东.云南普洱季风常绿阔叶

- 林 152 种木本植物叶片 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学杂志, 2016, 35 (3): 567-575. doi:10.13292/j.1000-4890.2016.03.029.
- HUANG X B, LIU W D, SU J R, LI S F, LANG X D. Stoichiometry of leaf C, N and P across 152 woody species of a monsoon broad-leaved evergreen forest in Pu'er, Yunnan Province [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(3):567-575. doi:10.13292/j.1000-4890.2016.03.029.
- [18] 李世杰. 贵州省东南部地区常见森林类型植物叶片 N、P 化学计量学特征 [J]. 贵州林业科技, 2016, 44 (3): 8-13. doi:10.16709/j.cnki.gzlykj.2016.03.002.
- LI S J. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of common forest types in Southeastern Guizhou, China [J]. *Guizhou Forestry Science and Technology*, 2016, 44(3):8-13. doi:10.16709/j.cnki.gzlykj.2016.03.002.
- [19] 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*, 2014, 111(30):1001-11006. doi:10.1073/pnas.0403588111.
- [20] 秦海, 李俊祥, 高三平, 李铖, 李蓉, 沈兴华. 中国 660 种陆生植物叶片 8 种元素含量特征 [J]. 生态学报, 2010, 30 (5): 1247-1257.
- QIN H, LI J X, GAO S P, LI C, LI R, SHEN X H. Characteristics of leaf element contents for eight nutrients across 660 terrestrial plant species in China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5):1247-1257.
- [21] TANG Z Y, XU W T, ZHOU G Y, XIE Z. Patterns of plant carbon, nitrogen, and phosphorus concentration in relation to productivity in China's terrestrial ecosystems [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115: 4033-4038. doi:10.1073/pnas.1700295114.
- [22] GUSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, 164: 243-266. doi:10.1111/j.1469-8137.2004.01192.x.
- [23] VENTERINK H O, WASSEN M J, VERKROOST A W M, RUITER P C. Species richness-productivity patterns differ between N-, P-, K-limited wetlands [J]. *Ecology*, 2003, 84(8):2191-2199. doi:10.1890/01-0639.
- [24] DUARTE C M. Nutrient concentration of aquatic plants: patterns across species [J]. *Limnol Oceanogr*, 1992, 37:882-889. doi:10.1890/01-0639.
- [25] NIKLAS K J, OWENS T, REICH P B, COBB E D. Nitrogen phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth [J]. *Ecology Letters*, 2005(8): 636-642. doi:10.1111/j.1461-0248.2005.00759.x.
- [26] 秦海. 天童常绿阔叶林不同演替阶段植物叶片和土壤养分及其生态化学计量学研究 [D]. 上海: 华东师范大学, 2009.
- QIN H. Foliar and soil nutrients and its ecological stoichiometry in successional stages of evergreen broad-leaved forest in Tiantong [D]. Shanghai: East China Normal University, 2009.
- [27] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武. 浙江天童常绿阔叶林、常绿针叶林与落叶阔叶林的 C:N:P 化学计量特征 [J]. 植物生态学报, 2010, 34(1):48-57. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.008.
- YAN E R, WANG X H, GUO M, ZHONG Q, ZHOU W. C : N : P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong region, Zhejiang Province, eastern China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010, 34(1): 48-57. doi:10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.008.

(责任编辑 张辉玲)