

# 不同相思林叶片-凋落叶-土壤的生态化学计量特征

周丽丽<sup>1</sup>, 李树斌<sup>2</sup>, 吴亚岚<sup>3</sup>, 郑茹萍<sup>2</sup>, 袁宗胜<sup>1</sup>, 潘 辉<sup>1,①</sup>

(1. 闽江学院地理与海洋学院, 福建 福州 350108; 2. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002;  
3. 福州大学环境与安全工程学院, 福建 福州 350108)

**摘要:**以福建省漳州市的厚荚相思(*Acacia crassicarpa* A. Cunn. ex Benth.)、黑木相思(*A. melanoxylon* R.Br.)、卷荚相思(*A. cincinnata* F. Muell.)、大叶相思(*A. auriculiformis* A. Cunn. ex Benth.)和马占相思(*A. mangium* Willd.) 5种人工林为研究对象,对叶片、凋落叶和土壤的C、N、P含量及其化学计量比进行测定和比较,并对各指标进行Pearson相关性分析。结果显示:供试林分的叶片、凋落叶和土壤的C含量变幅分别为562.52~592.83、532.04~563.51和11.32~19.44 g·kg<sup>-1</sup>,N含量变幅分别为21.28~29.74、10.58~15.57和1.12~1.76 g·kg<sup>-1</sup>,P含量变幅分别为0.57~0.94、0.08~0.19和0.33~0.36 g·kg<sup>-1</sup>,C/N比变幅分别为19.89~27.29、36.15~53.95和8.87~15.80,C/P比变幅分别为628.77~1 049.52、3 266.29~7 459.31、32.51~55.51,N/P比变幅分别为28.34~43.99、79.38~138.85和3.32~4.93。在5种相思林中,黑木相思林的叶片C、N、P含量均较高,其叶片和凋落叶的N/P比及土壤C/N比和C/P比均最小;马占相思林的叶片C、N、P含量均较低,但其叶片C/N比和C/P比均最大;大叶相思林的凋落叶N和P含量均最高,但其土壤N和P含量则最低;卷荚相思林的土壤N和P含量最高;厚荚相思林的凋落叶和土壤C含量均最高,但其凋落叶N和P含量均最低。5种林分叶片、凋落叶和土壤的C、N、P含量及其化学计量比均存在显著( $P<0.05$ )差异;其中,叶片和凋落叶的C和N含量明显高于土壤,叶片P含量明显高于凋落叶和土壤,但凋落叶P含量低于土壤;C/N比、C/P比和N/P比在凋落叶中均最大,在土壤中均最小。相关性分析结果表明:仅土壤P含量与凋落叶N含量呈极显著( $P<0.01$ )负相关,与凋落叶P含量和C/N比分别呈显著负相关和显著正相关;凋落叶N和P含量与叶片N含量呈显著负相关,凋落叶P含量与叶片C/N比呈显著正相关。综合分析结果表明:研究区域内土壤中C、N、P养分均处于较低水平,但叶片和凋落叶的养分含量均具有高C、高N和低P的特点;供试5种相思林的生长均受到P的限制;黑木相思属于“养分奢侈消耗型”树种,而马占相思属于“养分高效利用型”树种。建议根据不同相思树养分需求及养分利用效率差异制定合理的施肥措施。

**关键词:**相思林; C含量; N含量; P含量; 化学计量比; Pearson相关性分析

中图分类号: Q945.1; S792 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2022)02-0064-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2022.02.07

**Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil of different *Acacia* plantations** ZHOU Lili<sup>1</sup>, LI Shubin<sup>2</sup>, WU Yalan<sup>3</sup>, ZHENG Ruping<sup>2</sup>, YUAN Zongsheng<sup>1</sup>, PAN Hui<sup>1,①</sup> (1. College of Geography and Oceanography, Minjiang University, Fuzhou 350108, China; 2. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. College of Environment and Safety Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2022, 31(2): 64-72

**Abstract:** Taking five plantations of *Acacia crassicarpa* A. Cunn. ex Benth., *A. melanoxylon* R. Br., *A. cincinnata* F. Muell., *A. auriculiformis* A. Cunn. ex Benth., and *A. mangium* Willd. in Zhangzhou City of Fujian Province as research objects, the C, N, P contents and their stoichiometric ratios in leaf, leaf

收稿日期: 2021-10-07

基金项目: 福建省林业科技项目([2019]16号); 福建省自然科学基金资助项目(2021J011045)

作者简介: 周丽丽(1982—),女,黑龙江鸡西人,博士,副研究员,主要从事森林生态及资源利用方面的研究。

①通信作者 E-mail: fjpanhui@126.com

引用格式: 周丽丽, 李树斌, 吴亚岚, 等. 不同相思林叶片-凋落叶-土壤的生态化学计量特征[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(2): 64-72.

litter, and soil were measured and compared, and the Pearson correlation analysis was conducted on each index. The results show that the variation ranges of C contents in leaf, leaf litter, and soil of test stands are 562.52–592.83, 532.04–563.51, and 11.32–19.44  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, those of N contents are 21.28–29.74, 10.58–15.57, and 1.12–1.76  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, those of P contents are 0.57–0.94, 0.08–0.19, and 0.33–0.36  $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, those of C/N ratios are 19.89–27.29, 36.15–53.95, and 8.87–15.80, respectively, those of C/P ratios are 628.77–1 049.52, 3 266.29–7 459.31, and 32.51–55.51, respectively, those of N/P ratios are 28.34–43.99, 79.38–138.85, and 3.32–4.93, respectively. Among five *Acacia* plantations, the C, N, P contents in leaf of *A. melanoxylon* plantation are the highest, while the N/P ratios in leaf and leaf litter and the C/N ratio and C/P ratio in soil are the lowest; the C, N, P contents in leaf of *A. mangium* plantation are relatively low, but the C/N ratio and C/P ratio in leaf are the highest; the N and P contents in leaf litter of *A. auriculiformis* plantation are the highest, but the N and P contents in soil are the lowest; the N and P contents in soil of *A. cincinnata* plantation are the highest; the C contents in leaf litter and soil of *A. crassicarpa* plantation are the highest, but the N and P contents in leaf litter are the lowest. There are significant ( $P < 0.05$ ) differences in C, N, P contents and their stoichiometric ratios among leaf, leaf litter, and soil of five stands; in which, the C and N contents in leaf and leaf litter are evidently higher than those in soil, and the P content in leaf is evidently higher than those in leaf litter and soil, but the P content in leaf litter is lower than that in soil; the C/N ratio, C/P ratio, and N/P ratio in leaf litter are the highest, while those in soil are the lowest. The correlation analysis results show that only the P content in soil has extremely significant ( $P < 0.01$ ) negative correlations with N content in leaf litter, and has significantly negative and positive correlations with P content and C/N ratio in leaf litter, respectively; the N and P contents in leaf litter have significantly negative correlations with N content in leaf, and the P content in leaf litter has a significant positive correlation with C/N ratio in leaf. The comprehensive analysis results show that the C, N, P nutrients in soil in the research area are all at low levels, however, the nutrient contents in leaf and leaf litter have the characteristics of high C, high N, and low P; the growth of five test *Acacia* plantations are restricted by P; *A. melanoxylon* belongs to ‘nutrient luxury consumption type’ species, while *A. mangium* belongs to ‘nutrient efficient utilization type’ species. It is suggested that appropriate fertilization measures should be formulated according to the nutrient requirements and nutrient utilization efficiency of different *Acacia* species.

**Key words:** *Acacia* plantation; C content; N content; P content; stoichiometric ratio; Pearson correlation analysis

C、N、P 是植物最重要的生命元素,其含量及配比控制着植物的营养和生长状况<sup>[1]</sup>。在森林生态系统中,林木通过叶片进行光合作用固定 C,并以凋落物形式将养分及有机质回归土壤,最终满足林木生长对养分的需求。然而,凋落物分解过程中养分的归还量、土壤养分的供给量、植物养分的需求量以及植物对养分需求的自我调节,使得植物、凋落物和土壤三者之间养分含量具有明显的变异性<sup>[2,3]</sup>。因此,开展不同森林生态系统中 C、N、P 的循环变化及相关性研究,对阐明生态系统养分循环和调控机制,科学合理进行森林经营具有重要意义。

生态化学计量学为探讨植物与土壤之间 C、N、P 的相关性及植物养分限制格局提供了有效手段<sup>[4]</sup>。植物结构性 C 和生长限制元素 N、P 的相互作用,影响着植物生长及新陈代谢过程<sup>[5]</sup>。当外界可利用的 N 和 P 受限时,会导致植物体内 C/N 比和 C/P 比升

高<sup>[6]</sup>,而叶片 N/P 比则常被广泛用于判断植物养分限制及适应策略<sup>[7]</sup>。目前关于森林生态系统 C、N、P 生态化学计量特征的研究主要集中在植物的叶片、凋落叶和细根以及土壤等器官或系统中<sup>[8,9]</sup>,但是,将植物叶片-凋落叶-土壤作为一个循环系统进行生态化学计量学的相关研究还较少,因此揭示森林植物-凋落物-土壤各部分生态化学计量特征及其相互关系,有利于阐明生态系统养分循环过程及其调控机制,优化人工林生态系统结构<sup>[10]</sup>。

相思类树种为豆科 (Fabaceae) 金合欢属 (*Acacia* Mill.) 的常绿乔木,具有速生丰产、耐贫瘠、根瘤固氮及材质优良等优点,在改善环境、改良土壤及固碳增汇等方面具有重要作用,已成为中国南方退化山地生态重建的先锋树种之一<sup>[11]</sup>。从 20 世纪 60 年代开始,相思树已在广东、广西和福建等地大面积引种,并在种源筛选、无性系选育和栽培技术等方面取得了显

著成果<sup>[12,13]</sup>。相思树生态学特性的研究主要集中在养分归还、养分转移、生物量分配和碳储量等方面<sup>[14-16]</sup>,但这些研究的树种或样本(叶片、凋落叶或土壤等)较为单一,亟待从整个生态系统的角度研究不同相思树的养分限制特征及生态适应性。

鉴于此,作者以厚荚相思(*Acacia crassicaarpa* A. Cunn. ex Benth.)、黑木相思(*A. melanoxylon* R. Br.)、卷荚相思(*A. cincinnata* F. Muell.)、大叶相思(*A. auriculiformis* A. Cunn. ex Benth.)和马占相思(*A. mangium* Willd.)为研究对象,研究这5种相思林的叶片、凋落叶和土壤的C、N、P含量差异及其化学计量特征,并探讨不同林分叶片、凋落叶和土壤之间的生态化学计量特征相关性,以期揭示各相思树种的养分限制格局,为退化山地生态修复树种的选择及制定合理的森林经营措施奠定科学基础。

## 1 研究区概况和研究方法

### 1.1 研究区概况

实验林分位于福建省漳州市漳浦县中西国有林场,地理位置为东经117°33'、北纬24°17',海拔40~550 m,为低山丘陵地带,地势平缓(坡度15°~28°)。该区域气候属于亚热带海洋性季风气候,年平均气温20.20℃,夏季平均最高气温31.24℃,冬季平均最低气温14.00℃;年平均日照时数1662.6 h,年平均风速2.1 m·s<sup>-1</sup>;年平均空气相对湿度71.17%,年平均降水量1859 mm,且降水主要集中在夏季。

5种相思林的前茬均为湿地松(*Pinus elliottii* Engelm.)人工林采伐迹地,土壤为砂质页岩发育成的山地红壤,土层中厚,腐殖质层薄;土壤酸碱度约pH 5.5,有机质含量1.5%~2.0%。林下植被发育差,以芒萁[*Dicranopteris pedata* (Houtt.) Nakaike]和五节芒[*Miscanthus floridulus* (Lab.) Warb. ex Schum et Laut.]为主<sup>[17]</sup>。各林分均为生态公益林,抚育措施相同,在造林第3年进行强度25%~30%(材积)的间伐,间伐后第2年进行修枝处理;各林分造林后每2~3 a施肥1次。供试林分除黑木相思林为近熟林外,其他林分均为成熟林,样地基本情况见文献[18]。

### 1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 依据典型性和代表性原则,于2018年7月在实验林分内选择海拔、坡向、坡度等立地条件相似且长势良好的厚荚相思、黑木相思、卷荚

相思、大叶相思和马占相思人工林,每种林分划定3个面积20 m×20 m的样方,样方间距100 m以上。

1.2.2 样品采集 在2018年8月中旬(即植物生长旺季)采集叶片、凋落叶和土壤样本。在各林分样方内,通过每木检尺确定平均木,每个样方选择2株平均木,厚荚相思、黑木相思、卷荚相思、大叶相思和马占相思平均木树高分别为24.5、28.6、27.8、29.8、31.5 m,平均胸径分别为39.5、27.8、32.2、27.4和34.3 cm。由于林分内林下植被稀少,仅对各林分样方内平均木的叶片进行采集。

在平均木同一冠层的东、南、西、北4个方位采集叶片,尽量采集林冠外围、能最大程度接收阳光照射、完全展开的成熟叶。采用本课题组自主研发的凋落物搜集装置收集凋落叶,收集器的尼龙网孔径1 mm、框高10 cm;在每个样方中随机放置5个面积1 m×1 m的收集器(水平放置于距离地面50 cm处),收集各相思树种的凋落叶。叶片和凋落叶均按样方混合取样,每个样方中的每个样品采集约0.5 kg;叶片和凋落叶于105℃杀青30 min,于80℃烘干至恒质量,冷却后粉碎并过0.149 mm筛,密封保存、备用。

采用土钻法在每个样方内随机选择5个样点进行取土,考虑到表层土壤有机质含量高、受凋落物分解影响最大,故将上层凋落物轻轻剥离后收集0~10 cm表层土(包含腐殖质层,厚约2 cm)<sup>[19]</sup>。将同样方的土壤混匀,去掉杂质后采用四分法取1 kg土样,过2 mm筛;经自然风干后,采用对角线法每个样方取约200 g土样,用土壤研磨仪磨细后过0.149 mm筛,备用。

1.2.3 元素含量测定 分别精密称取150 mg叶片和凋落叶的干燥粉末以及750 mg干燥土样,放入镍干锅中,用Elementar Vario Max型元素分析仪(德国Elementar公司)测定各样品中的C和N含量。分别称取0.2 g叶片和凋落叶的干燥粉末以及干燥土样,用HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮叶片和凋落叶粉末,用HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>消煮土样,然后采用Optima 8000电感耦合等离子体发射光谱仪(美国PerkinElmer公司)测定P含量。各元素含量均重复测定3次。

### 1.3 数据处理

采用EXCEL 2010和SPSS 20.0软件进行数据整理和分析。对同一林分不同组分间以及同一组分不同林分间的C、N、P含量及C/N比、C/P比、N/P比进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和多重比较

(LSD法),并对叶片、凋落叶和土壤的C、N、P含量及C/N比、C/P比、N/P比进行Pearson相关性分析。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同相思林的叶片、凋落叶和土壤中C、N、P含量的比较

不同相思林的叶片、凋落叶和土壤中C、N、P含量的比较结果见表1。

2.1.1 在不同林分间的差异 由表1可见:叶片和凋落叶C、N和P含量在5种相思林间差异显著( $P < 0.05$ ),土壤P含量在5种相思林间差异极显著( $P = 0.001$ )。

叶片C含量变幅为562.52~592.83  $g \cdot kg^{-1}$ ,由高到低依次为黑木相思林、卷荚相思林、厚荚相思林、马占相思林、大叶相思林;并且,仅黑木相思林的叶片C含量与大叶相思林和马占相思林存在显著差异。凋落叶C含量变幅为532.04~563.51  $g \cdot kg^{-1}$ ,其中,厚荚相思林和马占相思林的凋落叶C含量相近且明显高于其他林分(分别为563.51和563.31  $g \cdot kg^{-1}$ ),卷荚相思林的凋落叶C含量最低且与厚荚相思林、黑木相思林和马占相思林存在显著差异。土壤C含量的变幅为11.32~19.44  $g \cdot kg^{-1}$ ,由高到低依次为厚荚相思林、卷荚相思林、大叶相思林、马占相思林、黑木相思林;并且,仅黑木相思林的土壤C含量与厚荚相思林和卷荚相思林存在显著差异。

叶片N含量变幅为21.28~29.74  $g \cdot kg^{-1}$ ,以卷荚相思林最高、马占相思林最低;并且,仅马占相思林的叶片N含量与厚荚相思林、黑木相思林和卷荚相思林存在显著差异,其他林分间叶片N含量均无显著差异。凋落叶N含量变幅为10.58~15.57  $g \cdot kg^{-1}$ ,以大叶相思林最高、厚荚相思林最低;其中,大叶相思林的凋落叶N含量显著高于黑木相思林、卷荚相思林和厚荚相思林,但与马占相思林无显著差异;卷荚相思林和厚荚相思林的凋落叶N含量无显著差异,但均显著低于其他3种林分。土壤N含量变幅为1.12~1.76  $g \cdot kg^{-1}$ ,以卷荚相思林最高、大叶相思林最低,但不同林分间土壤N含量无显著差异。

叶片P含量变幅为0.57~0.94  $g \cdot kg^{-1}$ ,以黑木相思林最高、马占相思林最低;其中,黑木相思林的叶片P含量与大叶相思林、卷荚相思林和马占相思林存在显著差异。凋落叶P含量变幅为0.08~0.19  $g \cdot kg^{-1}$ ,以

大叶相思林最高、厚荚相思林最低;其中,大叶相思林、马占相思林和黑木相思林的凋落叶P含量显著高于卷荚相思林和厚荚相思林,差异达显著水平。土壤P含量变幅为0.33~0.36  $g \cdot kg^{-1}$ ,差异很小;其中,卷荚相思林和马占相思林的土壤P含量显著高于其他3种林分,大叶相思林的土壤P含量则显著低于其他4种林分。

表1 不同相思林叶片、凋落叶和土壤中C、N、P含量的比较( $\bar{X} \pm SD$ )  
Table 1 Comparison on contents of C, N, P in leaf, leaf litter, and soil from different *Acacia* plantations ( $\bar{X} \pm SD$ )

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同样本C含量/( $g \cdot kg^{-1}$ ) <sup>2)</sup> C content in different samples <sup>2)</sup>		
	叶片 Leaf	凋落叶 Leaf litter	土壤 Soil
S1	579.64±2.89ABab	563.51±6.16Ab	19.44±6.85Ac
S2	592.83±2.01Aa	558.05±4.51ABb	11.32±0.93Bc
S3	588.22±23.72ABa	532.04±0.74Cb	18.63±3.17Ac
S4	562.52±3.07Ba	546.18±6.03BCb	17.22±1.11ABc
S5	565.34±9.31Ba	563.31±16.37Aa	13.57±3.02ABb
M	574.08±21.00	556.29±13.63	16.04±4.48
F	4.059	7.554	2.635
P	0.033	0.005	0.097
林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同样本N含量/( $g \cdot kg^{-1}$ ) <sup>2)</sup> N content in different samples <sup>2)</sup>		
	叶片 Leaf	凋落叶 Leaf litter	土壤 Soil
S1	27.00±0.82Aa	10.58±1.48Cb	1.28±0.41Ac
S2	26.73±0.32Aa	13.28±1.11Bb	1.30±0.28Ac
S3	29.74±2.44Aa	10.69±0.75Cb	1.76±0.55Ac
S4	25.63±1.09ABa	15.57±0.56Ab	1.12±0.26Ac
S5	21.28±4.99Ba	13.85±0.96ABb	1.25±0.15Ac
M	26.08±3.58	12.79±2.16	1.34±0.38
F	4.323	13.140	1.398
P	0.028	0.001	0.303
林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同样本P含量/( $g \cdot kg^{-1}$ ) <sup>2)</sup> P content in different samples <sup>2)</sup>		
	叶片 Leaf	凋落叶 Leaf litter	土壤 Soil
S1	0.77±0.05ABa	0.08±0.01Bc	0.35±0.01Bb
S2	0.94±0.03Aa	0.17±0.05Ac	0.35±0.01Bb
S3	0.67±0.01BCa	0.09±0.02Bc	0.36±0.01Ab
S4	0.70±0.15BCa	0.19±0.06Ab	0.33±0.01Cb
S5	0.57±0.17Ca	0.18±0.06Ab	0.36±0.01Ab
M	0.73±0.16	0.14±0.06	0.35±0.01
F	5.403	5.036	12.500
P	0.014	0.017	0.001

<sup>1)</sup> S1: 厚荚相思 *Acacia crassicarpa* A. Cunn. ex Benth.; S2: 黑木相思 *A. melanoxylon* R. Br.; S3: 卷荚相思 *A. cincinnata* F. Muell.; S4: 大叶相思 *A. auriculiformis* A. Cunn. ex Benth.; S5: 马占相思 *A. mangium* Willd. M; 均值 Mean value; F: F值 F value; P: P值 P value.

<sup>2)</sup> 同列中不同的大写字母表示在相同样本不同林分间差异显著( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different stands of the same sample; 同行中不同的小写字母表示相同林分不同样本间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different samples of the same stand.

综合分析结果表明:叶片、凋落叶和土壤的C、N、P含量在5种相思林间存在不同程度的差异。其中,叶片C、N、P含量以黑木相思林较高、马占相思林较低;凋落叶N和P含量以大叶相思林最高、厚荚相思林最低;土壤N和P含量以卷荚相思林最高、大叶相思林最低;而凋落叶和土壤C含量均以厚荚相思林最高。

2.1.2 在不同样本间的差异 由表1还可见:从平均值看,叶片和凋落叶的C和N含量大幅高于土壤,且均以叶片的C和N含量最高;叶片P含量也大幅高于凋落叶和土壤,但凋落叶的P含量则低于土壤。总体上,5种相思林叶片的C、N和P含量均最高。

## 2.2 不同相思林叶片、凋落叶和土壤中C、N、P含量化学计量比的比较

不同相思林的叶片、凋落叶和土壤中C、N、P含量的化学计量比(C/N比、C/P比和N/P比)的比较结果见表2。

2.2.1 在不同林分间的差异 由表2可见:叶片、凋落叶和土壤C/N比,凋落叶C/P比以及叶片和凋落叶N/P比在5种相思林中差异显著。叶片C/N比的变幅为19.89~27.29,以马占相思林最大、卷荚相思林最小;其中,马占相思林的叶片C/N比与其他4种林分的差异均达到显著水平,而其他4种林分间的叶片C/N比均无显著差异。凋落叶C/N比的变幅为36.15~53.95,以厚荚相思林最大、大叶相思林最小;其中,黑木相思林、马占相思林和大叶相思林的凋落叶C/N比显著小于厚荚相思林。土壤C/N比的变幅为8.87~15.80,以大叶相思林和厚荚相思林较大、黑木相思林最小,前二者分别较后者大78.13%和70.81%;其中,大叶相思林和厚荚相思林的土壤C/N比均显著大于其他3种林分,而另3种林分间的土壤C/N比无显著差异。

叶片C/P比的变幅为628.77~1 049.52,以马占相思林最大、黑木相思林最小,且仅此二者的叶片C/P比存在显著差异。凋落叶C/P比的变幅为3 266.29~7 459.31,以厚荚相思林最大、大叶相思林最小;其中,厚荚相思林和卷荚相思林的凋落叶C/P比显著大于其他3种林分。土壤C/P比的变幅为32.51~55.51,从大到小依次为厚荚相思林、卷荚相思林、大叶相思林、马占相思林、黑木相思林;其中,厚荚相思林的土壤C/P比是黑木相思林的1.71倍,且仅此二者的土壤C/P比存在显著差异。

表2 不同相思林叶片、凋落叶和土壤中C、N、P含量化学计量比的比较( $\bar{X}\pm SD$ )

Table 2 Comparison on stoichiometric ratios of C, N, P contents in leaf, leaf litter, and soil from different *Acacia* plantations ( $\bar{X}\pm SD$ )

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同样本 C/N 比 <sup>2)</sup> C/N ratio in different samples <sup>2)</sup>		
	叶片 Leaf	凋落叶 Leaf litter	土壤 Soil
S1	21.48±0.62Bb	53.95±7.72Aa	15.16±1.37Ab
S2	22.18±0.34Bb	42.26±3.96BCa	8.87±1.21Bc
S3	19.89±2.06Bb	49.94±3.56ABa	10.93±2.10Bc
S4	21.34±1.06Bb	36.15±1.16Ca	15.80±2.52Ac
S5	27.29±5.24Ab	40.98±3.57Ca	10.78±1.46Bc
M	22.44±3.42	44.66±7.66	12.31±3.18
F	3.623	7.573	8.402
P	0.045	0.004	0.003

  

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同样本 C/P 比 <sup>2)</sup> C/P ratio in different samples <sup>2)</sup>		
	叶片 Leaf	凋落叶 Leaf litter	土壤 Soil
S1	752.13±48.76ABb	7 459.31±1 133.66Aa	55.51±20.58Ab
S2	628.77±19.86Bb	3 403.99±1 174.32Ba	32.51±2.92Bb
S3	870.66±42.54ABb	5 840.42±962.79Aa	52.19±9.15ABb
S4	810.98±203.17ABb	3 266.29±1 112.35Ba	51.31±3.11ABb
S5	1 049.52±336.21Ab	3 348.17±968.28Ba	37.86±8.66ABb
M	822.41±208.26	4 663.64±1 981.04	45.88±13.14
F	2.277	9.411	2.529
P	0.133	0.002	0.107

  

林分 <sup>1)</sup> Stand <sup>1)</sup>	不同样本 N/P 比 <sup>2)</sup> N/P ratio in different samples <sup>2)</sup>		
	叶片 Leaf	凋落叶 Leaf litter	土壤 Soil
S1	34.99±1.28ABb	138.85±19.02Aa	3.64±1.24Ac
S2	28.34±0.48Bb	79.38±19.48Ba	3.74±0.84Ac
S3	43.99±3.28Ab	118.23±27.26ABa	4.93±1.55Abc
S4	37.77±7.54Ab	90.27±29.72Ba	3.32±0.77Ab
S5	38.14±6.72Ab	81.00±17.29Ba	3.48±0.42Ac
M	36.65±6.64	101.55±31.01	3.82±1.06
F	4.228	3.814	1.130
P	0.029	0.039	0.396

<sup>1)</sup> S1: 厚荚相思 *Acacia crassicarpa* A. Cunn. ex Benth.; S2: 黑木相思 *A. melanoxylon* R. Br.; S3: 卷荚相思 *A. cincinnata* F. Muell.; S4: 大叶相思 *A. auriculiformis* A. Cunn. ex Benth.; S5: 马占相思 *A. mangium* Willd. M; 均值 Mean value; F: F值 F value; P: P值 P value.

<sup>2)</sup> 同行中不同的大写字母表示在不同林分相同样本间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same column indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different stands of the same sample; 同行中不同的小写字母表示相同林分不同样本间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same row indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different samples of the same stand.

叶片N/P比的变幅为28.34~43.99,以卷荚相思林最大、黑木相思林最小;其中,黑木相思林的叶片N/P比与卷荚相思林、马占相思林和大叶相思林存在显著差异,而其他林分间的叶片N/P比均无显著差异。凋落叶N/P比的变幅为79.38~138.85,以厚荚相思林最大、黑木相思林最小,前者较后者大

74.92%;其中,厚荚相思林的凋落叶 N/P 比显著大于黑木相思林、大叶相思林和马占相思林,而另 4 种林分间的凋落叶 N/P 比均无显著差异。土壤 N/P 比的变幅为 3.32~4.93,以卷荚相思林最大、大叶相思林最小,但不同林分间的土壤 N/P 比无显著差异。

综合分析结果表明:在 5 种林分间,叶片、凋落叶和土壤的 C、N、P 含量化学计量比存在不同程度的差异。其中,叶片 C/N 比和 C/P 比以马占相思林最大,凋落叶和土壤 C/N 比和 C/P 比以厚荚相思林较大;土壤 C/N 比和 C/P 比以黑木相思林最小,叶片和凋落叶 N/P 比也以黑木相思林最小。

2.2.2 在不同样本间的差异 由表 2 还可见:从平均值看,C/N 比、C/P 比和 N/P 比均以凋落叶样本最大、土壤样本最小。

2.3 不同相思林叶片、凋落叶和土壤间 C、N、P 含量及其化学计量比的相关性

不同相思林的叶片、凋落叶和土壤的 C、N、P 含量及其化学计量比的相关系数见表 3。结果显示:土壤与叶片的 C、N、P 含量及其化学计量比均无显著相关性,土壤与凋落叶以及凋落叶与叶片的 C、N、P 含量及其化学计量比多数无显著相关性。仅土壤 C 含量与凋落叶 N/P 比呈显著正相关;土壤 P 含量与凋落叶 N 含量呈极显著负相关,与凋落叶 P 含量和 C/N 比分别呈显著负相关和显著正相关;凋落叶 N 含

表 3 不同相思林叶片、凋落叶和土壤间 C、N、P 含量及其化学计量比的相关系数<sup>1)</sup>  
Table 3 Correlation coefficients of indexes of C, N, P contents and their stoichiometric ratios among leaf, leaf litter, and soil from different *Acacia* plantations<sup>1)</sup>

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient					
	C <sub>L</sub>	N <sub>L</sub>	P <sub>L</sub>	C/N <sub>L</sub>	C/P <sub>L</sub>	N/P <sub>L</sub>
C <sub>S</sub>	0.018	0.240	-0.233	-0.275	0.112	0.383
N <sub>S</sub>	0.293	0.226	-0.053	0.150	0.028	0.187
P <sub>S</sub>	0.321	0.161	-0.103	0.034	0.093	0.154
C/N <sub>S</sub>	-0.321	0.052	-0.203	-0.195	0.083	0.249
C/P <sub>S</sub>	-0.018	0.219	-0.219	-0.272	0.100	0.359
N/P <sub>S</sub>	0.282	0.221	-0.035	-0.159	0.014	0.170

  

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient					
	C <sub>Ll</sub>	N <sub>Ll</sub>	P <sub>Ll</sub>	C/N <sub>Ll</sub>	C/P <sub>Ll</sub>	N/P <sub>Ll</sub>
C <sub>S</sub>	-0.100	-0.197	-0.458	0.162	0.435	0.543 *
N <sub>S</sub>	-0.215	-0.292	-0.298	0.168	0.154	0.159
P <sub>S</sub>	0.071	-0.658 **	-0.527 *	0.631 *	0.463	0.304
C/N <sub>S</sub>	-0.014	0.096	-0.185	-0.008	0.323	0.444
C/P <sub>S</sub>	-0.108	-0.126	-0.403	0.097	0.387	0.511
N/P <sub>S</sub>	-0.223	-0.241	-0.264	0.120	0.125	0.144

续表 3 Table 3 (Continued)

指标 Index	相关系数 Correlation coefficient					
	C <sub>L</sub>	N <sub>L</sub>	P <sub>L</sub>	C/N <sub>L</sub>	C/P <sub>L</sub>	N/P <sub>L</sub>
C <sub>Ll</sub>	-0.046	-0.262	0.210	0.222	-0.149	-0.440
N <sub>Ll</sub>	-0.435	-0.538 *	-0.108	0.375	0.109	-0.213
P <sub>Ll</sub>	-0.374	-0.614 *	-0.275	0.537 *	0.358	-0.007
C/N <sub>Ll</sub>	0.333	0.491	0.110	-0.365	-0.130	0.169
C/P <sub>Ll</sub>	0.373	0.505	0.185	-0.436	-0.251	0.051
N/P <sub>Ll</sub>	0.332	0.475	0.214	-0.446	-0.302	-0.018

<sup>1)</sup> C<sub>L</sub>, N<sub>L</sub>, P<sub>L</sub>, C/N<sub>L</sub>, C/P<sub>L</sub>, N/P<sub>L</sub>: 分别为叶片的 C、N 和 P 含量及其化学计量比 C, N, and P contents and their stoichiometric ratios in leaf, respectively; C<sub>Ll</sub>, N<sub>Ll</sub>, P<sub>Ll</sub>, C/N<sub>Ll</sub>, C/P<sub>Ll</sub>, N/P<sub>Ll</sub>: 分别为凋落叶的 C、N 和 P 含量及其化学计量比 C, N, and P contents and their stoichiometric ratios in leaf litter, respectively; C<sub>S</sub>, N<sub>S</sub>, P<sub>S</sub>, C/N<sub>S</sub>, C/P<sub>S</sub>, N/P<sub>S</sub>: 分别为土壤的 C、N、P 含量及其化学计量比 C, N, P contents and their stoichiometric ratios in soil, respectively. \*: P < 0.05; \*\*: P < 0.01.

量与叶片 N 含量呈显著负相关,凋落叶 P 含量与叶片 N 含量和 C/N 比分别呈显著负相关和显著正相关。

3 讨论和结论

3.1 不同相思林叶片-凋落叶-土壤的 C、N、P 养分分配特征

供试 5 种相思林的叶片 C 含量均值 (574.08 g · kg<sup>-1</sup>) 高于全球陆生植物叶片 C 含量均值 (464 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[20]</sup>, N 含量均值 (26.08 g · kg<sup>-1</sup>) 也高于全球木本植物叶片 N 含量均值 (18.22 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[21]</sup>, 但 P 含量均值 (0.73 g · kg<sup>-1</sup>) 明显低于全球木本植物 P 含量均值 (1.10 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[21]</sup>, 说明供试 5 种相思林的叶片具有高 C、高 N、低 P 的特点。叶片的高 C 特征可以增强植株抵御外界不利环境的能力<sup>[4]</sup>; 叶片的高 N 特征说明树种自身光合效率高, 有利于林分的速生丰产<sup>[22]</sup>; 叶片的低 P 特征则是一种重要的养分保存机制<sup>[23]</sup>, 同时也在一定程度上说明相较于 N, 相思树生长更易受 P 限制。供试 5 种相思林中, 黑木相思林叶片 C 含量显著高于大叶相思林和马占相思林, 说明在同一生长条件下黑木相思林叶片的光合作用相对较强。另外, 叶片 N 和 P 含量也以黑木相思林较高、马占相思林最低, 说明不同相思树种在生长期对 N 和 P 的需求程度及利用效率存在差异。黑木相思林处于近熟林阶段, 叶片的旺盛生长需要大量营养, 因而导致土壤和其他器官的 N 和 P 向叶片转移; 同时也说明黑木相思的叶片对 N 和 P 的利用效率小于马

占相思,即生产等量的叶生物量,黑木相思需要吸收更多的N和P,属于“养分奢侈消耗型”树种,而马占相思属于“养分高效利用型”树种。

凋落物通过微生物分解将养分及有机质归还土壤,供植物吸收,是连接森林与土壤的纽带,林木生长所需养分的70%~90%来自凋落物分解<sup>[24]</sup>。本研究中,供试5种相思林的凋落叶C、N、P含量与其叶片同样呈现高C、高N和低P的特点,凋落叶C和N含量均值(556.29和12.79 g·kg<sup>-1</sup>)均高于全球陆地植物凋落叶C和N含量均值(467.0和10.0 g·kg<sup>-1</sup>),但凋落叶P含量均值(0.14 g·kg<sup>-1</sup>)却明显低于全球陆地植物凋落叶P含量均值(0.7 g·kg<sup>-1</sup>)<sup>[25]</sup>。叶片在凋落前会将养分转移至新叶,这是植物的重要养分高效利用策略,凋落叶中养分含量越低表明植物对养分的重吸收程度越大,养分利用效率越高<sup>[26]</sup>。供试5种相思林的凋落叶N和P含量由大到小依次为大叶相思林、马占相思林、黑木相思林、卷荚相思林、厚荚相思林,说明这些树种对N和P的再分配具有协同互作效应<sup>[27]</sup>。与叶片N和P含量相比,马占相思林的凋落叶N和P含量较高、回收利用率较低,导致其叶片的N和P含量较低;而黑木相思林的叶片和凋落叶N和P含量均较高,说明该林分叶片的N和P主要来自于土壤而非凋落叶。Tang等<sup>[28]</sup>对中国172种木本植物凋落叶进行分析,认为木本植物凋落叶N和P的重吸收阈值为11.10和0.65 g·kg<sup>-1</sup>,按此阈值,在供试5种相思林中,只有厚荚相思林和卷荚相思林对N完全吸收,而5种相思林对P均未完全吸收,说明较高的P重吸收效率是供试5种相思林适应养分贫瘠环境的重要策略之一,而黑木相思林、大叶相思林和马占相思林可能采取其他高效的N利用策略。

本研究中,各相思林0~10 cm土壤的C、N、P含量均值(16.04、1.34和0.35 g·kg<sup>-1</sup>)明显低于全国同层土壤C、N、P含量均值(24.56、1.88和0.78 g·kg<sup>-1</sup>)<sup>[29]</sup>,说明该研究区土壤退化严重。此现象一方面与东南地区夏季高温多雨以及土壤高度风化和养分大量淋溶流失形成“缺氮少磷”的特点有关;另一方面与供试林分的树种单一、轮伐期短及多代连栽等不合理营林措施有关<sup>[30]</sup>。在供试5种相思林中,土壤C含量以厚荚相思林最高、黑木相思林最低,这可能与黑木相思林的凋落物产量低(6.40 t·hm<sup>-2</sup>)<sup>[31]</sup>导致通过凋落物归还土壤的有机质少有

关;表层土壤N和P含量均以卷荚相思林最高,这与该树种叶片N水平同步,但与该树种叶片P含量较低的规律不一致,主要是因为土壤N主要来源于植物本身和大气沉降<sup>[32]</sup>,而土壤P则主要来源于岩石的风化。

### 3.2 不同相思林叶片-凋落叶-土壤的生态化学计量特征及养分限制格局

叶片C/N比和C/P比体现了植物在固碳过程中对N和P利用效率的权衡策略<sup>[33]</sup>。本研究中,供试5种相思林叶片C/N比均值(22.4)接近全球植物叶片C/N比均值(22.5),而其C/P比均值(822.4)则明显高于全球植物叶片C/P比均值(232.0)<sup>[20]</sup>,说明供试5种相思林具有较强的碳同化能力及较高的P利用效率。在供试5种相思林中,马占相思林的叶片C/N比和C/P比显著高于黑木相思林,说明马占相思林的N和P利用效率高,与其叶片N和P含量低的结果一致。植物叶片N/P比是决定群落结构和功能的重要指标之一,可用于判断植物受土壤养分的限制情况。叶片N/P比小于10时植物生长相对受N限制;叶片N/P比大于20时植物生长相对受P限制;叶片N/P比在10~20时,植物生长受N还是P限制取决于环境<sup>[34]</sup>。供试5种相思林叶片N/P比均大于20,说明这些树种的生长均受P限制,但受限程度因树种不同而异;其中,卷荚相思林、马占相思林和大叶相思林的叶片N/P比显著高于厚荚相思林和黑木相思林,说明前3个树种的生长受P限制更显著。

凋落叶N/P比是决定其分解速率的重要因子。一般认为凋落叶N/P比大于25且P含量低于0.22 g·kg<sup>-1</sup>时凋落叶分解受P的限制性强<sup>[35]</sup>,本研究中5种相思林的凋落叶N/P比和P含量均符合上述标准,表明这些林分的凋落叶分解过程均受P的强烈限制,其中,厚荚相思林的凋落叶分解受P限制的程度最大,其次为卷荚相思林,黑木相思林的凋落叶分解受P限制的程度最小。

土壤C/N比是衡量土壤C和N平衡的一个敏感性指标,土壤C/P比则是对微生物矿化土壤P或从环境中吸收固持P潜力的重要衡量指标,较大的C/N比表明土壤N的矿化作用不明显,而较低的C/P比说明微生物矿化土壤P的潜力较大<sup>[8]</sup>。供试大叶相思林和厚荚相思林的土壤C/N比明显高于另3种相思林,也高于全国的表层土壤C/N比(14.4)<sup>[29]</sup>,说明这2种相思林土壤的N矿化作用较强,硝酸盐

淋溶风险较高。供试5种相思林的土壤C/P比均值(45.88)明显高于同纬度的福建闽江河口湿地和广东雷州半岛的土壤C/P比(24和28.59)<sup>[26,36]</sup>,说明与分布于中国亚热带的其他典型林分相比,供试林分的土壤P矿化作用不明显。中国南方酸性红壤中的P大多以Fe-P、Al-P或闭蓄态的形式存在,导致土壤有效P严重不足<sup>[37]</sup>,这也是供试林分土壤P含量较低的原因之一。土壤N/P比作为预测养分有效性的指标之一,可用于诊断土壤N饱和及P缺乏的程度。供试林分的土壤N/P比均值(3.32~4.93)略高于同纬度的福建闽江河口湿地的N/P比(3.0)<sup>[26]</sup>,说明供试林分土壤中的P较亚热带其他林分更匮乏,与叶片N/P比反映的养分限制格局一致,但供试林分土壤N/P比也低于全国土壤的N/P比均值(9.3)<sup>[29]</sup>,预示着供试林分土壤存在较大的N含量限制风险。

### 3.3 不同相思林叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征的相关性

叶片-凋落叶-土壤的C、N、P含量及其化学计量比代表了生态系统各部分为维持生态系统平衡及响应环境变化面临的竞争压力。供试5种相思林的C和N含量在叶片-凋落叶-土壤之间的分配具有耦合性,表现为在叶片中最高、在土壤中最低;而P含量则表现出分流现象,以叶片中最高、凋落叶中最低,在叶片凋落前P被大量转移和再利用,使得凋落叶中P含量处于最低水平,这一现象也存在于黄土高原的不同人工林中<sup>[23]</sup>。相关性分析结果表明:供试5种林分的土壤N含量与叶片N含量呈不显著正相关、土壤P含量与叶片P含量呈不显著负相关,可能与本研究选择的植物器官仅为叶片,未涉及根、茎和枝等器官的养分含量及分配特征有关。本研究中土壤P含量与凋落叶N含量呈极显著负相关,与凋落叶P含量和C/N比分别呈显著负相关和显著正相关,在南亚热带森林不同演替阶段的植物中也存在类似现象<sup>[32]</sup>,说明凋落物的基质质量明显影响凋落物的矿化和分解。但本研究仅对5种相思林凋落叶的养分含量进行了分析,忽略了林下植被及其他伴生树种凋落物的影响,因此,后续应加强生态系统内不同组分以及植物不同器官的养分含量及分配的研究。

供试5种相思林的C/N比、C/P比和N/P比均以凋落叶中最大,土壤中最小,在其他区域的人工林分中也存在相似的现象<sup>[19,23]</sup>,主要由于植物从土壤中吸收养分,在叶片凋落前又通过重吸收过程对N

和P进行回收利用,导致凋落叶的C/N比、C/P比和N/P比均高于叶片。本研究中,凋落叶N含量与叶片N含量呈显著负相关,凋落叶P含量与叶片N含量和C/N比分别呈显著负相关和显著正相关,这一结果与竹万宽等<sup>[38]</sup>对尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)人工林的研究结果存在一定差异。生物体对营养元素的需求符合生态化学计量学的相关理论规律,同时受环境及人为因素的影响,因此,植物叶片、凋落叶和土壤间生态化学计量的相互关系还未能形成定论,需结合氮沉降、全球变暖、植被类型和土壤演化等多种因子,进行进一步探讨。

### 3.4 结论

综合分析结果显示:研究区域内土壤C、N、P含量均处于较低水平,土壤养分匮乏;但供试5种相思林的叶片和凋落叶的养分含量均具有高C、高N和低风险的特点,且不同相思林的养分利用效率及养分限制程度存在差异。根据植物叶片N/P比阈值(10~20),5种相思林的生长均受到P含量的限制,限制程度由大到小依次为卷荚相思林、马占相思林、大叶相思林、厚荚相思林、黑木相思林。另外,供试林分的土壤也存在受N限制的风险。总体上黑木相思林的叶片C、N和P含量均较高且C/P比和N/P比均较小,因此,黑木相思属于“养分奢侈消耗型”树种;马占相思林的叶片C、N和P含量均较低且C/N比、C/P比和N/P比均较大,因此,马占相思属于“养分高效利用型”树种。综上所述,在中国南方引种相思树时,应考虑各树种对养分需求及养分利用效率的差异,并考虑不同树种的生长受P限制的程度,合理补充P肥,确保相思人工林可持续经营及生态效益最大化。

### 参考文献:

- [1] SARDANS J, RIVAS-UBACH A, PEÑUELAS J. The elemental stoichiometry of aquatic and terrestrial ecosystems and its relationships with organismic lifestyle and ecosystem structure and function: a review and perspectives [J]. *Biogeochemistry*, 2012, 111: 1-39.
- [2] 王宝荣,曾全超,安韶山,等.黄土高原子午岭林区两种天然次生林植物叶片-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2017, 37(16): 5461-5473.
- [3] 崔高阳,曹扬,陈云明.陕西省森林各生态系统组分氮磷化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2015, 39(12): 1146-1155.
- [4] 周丽丽,李树斌,王万萍,等.福建漳江口4种红树植物叶片碳氮磷化学计量及养分重吸收特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2020, 26(3): 674-680.

- [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] 阎恩荣, 王希华, 郭明, 等. 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.
- [7] 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.
- [8] 李树斌, 周丽丽, 陈宝英, 等. 亚热带树种转换对林地土壤碳氮磷计量比的影响[J]. *福建林学院学报*, 2019, 39(6): 575-583.
- [9] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1328-1335.
- [10] 吴慧, 王树力, 郝玉琢, 等. 阿什河流域 6 种人工林叶片-凋落物-土壤系统的养分分配与利用格局[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(5): 100-108.
- [11] YANG Y S, WANG L X, YANG Z J, et al. Large ecosystem service benefits of assisted natural regeneration [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2018, 123(2): 676-687.
- [12] 詹妮, 黄烈健. 我国相思类树种研究进展综述[J]. *热带林业*, 2015, 43(3): 41-45.
- [13] 黄烈健, 詹妮. 我国相思类树种研究文献计量学分析[J]. *广东林业科技*, 2015, 31(3): 113-117.
- [14] 林宇. 滨海沙地厚荚相思人工林养分特征与植物碳储量[D]. 福州: 福建农林大学林学院, 2012: 17-22.
- [15] 邵士垒, 何宗明, 丁国昌, 等. 滨海沙地纹荚相思人工林凋落物及养分归还动态研究[J]. *西南林业大学学报*, 2015, 35(2): 17-23.
- [16] 葛露露, 何宗明, 林宇, 等. 滨海沙地不同树种人工林生物量及凋落物碳氮养分归还[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(1): 39-46.
- [17] 黄猛, 黄玉梅, 赵苗菲, 等. 5 种外来相思类树种的物候期观测[J]. *福建林业科技*, 2018, 45(4): 28-32.
- [18] 周丽丽, 李树斌, 潘辉, 等. 5 种相思树和尾巨桉人工林土壤养分和酶活性特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2021, 29(5): 483-493.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] TIAN D, YAN Z B, NIKLAS K J, et al. Global leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry and their scaling exponent [J]. *National Science Review*, 2018, 5(5): 728-739.
- [22] 陆道调, 吴保国, 王希群, 等. 相思树种研究发展综述[J]. *福建林学院学报*, 2004, 24(1): 92-96.
- [23] 白雪娟, 曾全超, 安韶山, 等. 黄土高原不同人工林叶片-凋落物-土壤生态化学计量特征[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 3823-3830.
- [24] 赵其国, 王明珠, 何园球. 我国热带亚热带森林凋落物及其对土壤的影响[J]. *土壤*, 1991, 23(1): 8-15.
- [25] YUAN Z Y, CHEN H Y H. Global trends in senesced-leaf nitrogen and phosphorus [J]. *Global Ecology and Biogeography*, 2009, 18(5): 532-542.
- [26] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [27] 李树斌, 周丽丽, 伍思攀, 等. 不同氮素形态对干旱胁迫杉木幼苗养分吸收及分配的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26(1): 152-162.
- [28] TANG L Y, HAN W X, CHEN Y H, et al. Resorption proficiency and efficiency of leaf nutrients in woody plants in eastern China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2013, 6(5): 408-417.
- [29] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C : N : P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98: 139-151.
- [30] ZHOU L L, CAI L P, HE Z M, et al. Thinning increases understory diversity and biomass, and improves soil properties without decreasing growth of Chinese fir in southern China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(23): 24135-24150.
- [31] 赵文东, 李凯, 王俊, 等. 5 种人工相思林凋落物现存量及其持水特性[J]. *四川农业大学学报*, 2020, 38(6): 677-684.
- [32] 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.
- [33] 周磊, 吴慧, 王树力. 不同林分红皮云杉针叶养分含量及生态化学计量特征研究[J]. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(3): 19-25, 33.
- [34] GÜSEWELL S. N : P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance [J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2): 243-266.
- [35] 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C : N : P 生态化学计量特征[J]. *生态学报*, 2011, 31(2): 335-343.
- [36] 许宇星, 王志超, 竹万宽, 等. 雷州半岛 3 种速生人工林下土壤生态化学计量特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(1): 35-42.
- [37] ZOU X H, WU P F, CHEN N L, et al. Chinese fir root response to spatial and temporal heterogeneity of phosphorus availability in the soil [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2015, 45(4): 402-410.
- [38] 竹万宽, 陈少雄, 王志超, 等. 不同林龄尾巨桉人工林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. *热带亚热带植物学报*, 2017, 25(2): 127-135.

(责任编辑: 吴蕊夷)