

# 格氏栲天然林及人工林和杉木人工林生活叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征

孟庆权<sup>1,2</sup>, 葛露露<sup>1,2</sup>, 林 宇<sup>3</sup>, 邱岭军<sup>1,2</sup>, 胡欢甜<sup>1,2</sup>, 何宗明<sup>1,2</sup>, 董 强<sup>1,2\*</sup>

(1. 福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2. 国家林业和草原局杉木工程技术研究中心, 福建 福州 350002;  
3. 福建省长乐大鹤国有防护林场, 福建 福州 350212)

**摘 要:**通过采用野外调查与室内分析相结合的方法,测定格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林生活叶、凋落叶以及土壤(0~40 cm)C、N、P 含量,并探讨 3 种林分生活叶、凋落叶和土壤的化学计量特征。结果表明:1)3 种林分 C、N、P 含量均为生活叶>凋落叶>土壤,3 种林分生活叶和凋落叶 C、N、P 含量差异均不显著,土壤 C 含量为格氏栲天然林显著高于 2 种人工林,而 N、P 含量差异不显著;2)3 种林分 C:N、C:P、N:P 均表现为凋落叶>生活叶>土壤,格氏栲天然林和人工林生活叶 N:P 均>16,而杉木人工林生活叶 14<N:P<16,生活叶 C:N 为杉木人工林最高,凋落叶 C:N 为格氏栲人工林最低,凋落叶、土壤 C:P 为杉木人工林最低;3)随土层深度的增加,3 种林分土壤 C、N、P 含量逐渐减少,而 C:N、C:P、N:P 变化不大;4)3 种林分 N 含量和 C:N 在生活叶和凋落叶之间均呈显著负相关( $P<0.05$ )。格氏栲天然林改为人工林后土壤 C 含量显著降低,格氏栲天然林和人工林生长受 N 限制,杉木人工林生长受 N、P 限制,且土壤 P 的有效性高。研究结果有助于了解不同林分的限制性元素,为该研究区格氏栲和杉木的养分管理提供科学依据。

**关键词:**生态化学计量学;格氏栲;杉木;天然林;人工林

**中图分类号:**S713      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2019)06-0008-08

## Ecological Stoichiometric Characteristic of Leaf-Litter-Soil in Natural and Planted Forests of *Castanopsis kawakamii* and *Cunninghamia lanceolata*

MENG Qing-quan<sup>1,2</sup>, GE Lu-lu<sup>1,2</sup>, LIN Yu<sup>3</sup>, QIU Ling-jun<sup>1,2</sup>, HU Huan-tian<sup>1,2</sup>,  
HE Zong-ming<sup>1,2</sup>, DONG Qiang<sup>1,2\*</sup>

(1. Forestry College, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, Fujian, China;  
2. Engineering Reserch Center of Chinese Fir, State Forestry and Grassland Administration, Fuzhou 350002, Fujian, China;  
3. Changle Dahe State-owned Protection Forest Farm of Fujian Province, Fuzhou 350212, Fujian, China)

**Abstract:** The contents of carbon, nitrogen, and phosphorus in in the leaves, leaf litters, and soils (0—40 cm) of natural and planted forests of *Castanopsis kawakamii* and planted *Cunninghamia lanceolata* were examined by combining field investigation and indoor measurement to explore the ecological stoichiometric characteristics of leaf-litter-soil interactions in three forests. The results showed that: 1) the concentrations of C, N and P in three forests were in the order of leaf>litter>soil, no significant differences in C, N and P contents were found in the leaves and litter of three forests, the soil C content in natural forest of *C. kawakamii* was significantly higher than those in other two forests, but N and P contents were not significantly different. 2) The ratios of C:N, C:P and N:P in three forests were in the order of litter>leaf>soil; the ratios of N:P in the living leaves of natural and planted *C. kawakamii* forest were above>16, and

收稿日期:2018-10-15 修回日期:2018-12-25  
基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFD0600301)。  
作者简介:孟庆权,男,硕士在读,研究方向:水土保持和沿海防护林。E-mail:1347225209@qq.com  
\* 通信作者:董 强,男,讲师,研究方向:森林培育与水土保持。E-mail:fjdq@126.com

between 14 and 16 in planted *C. lanceolata* forest; the ratios of C : N of the leaves was the highest in planted *C. lanceolata* forest, the C : N of the litter was the lowest in natural *C. kawakamii*; the C : P of the litter and soil were the lowest in planted *C. lanceolata* forest. 3) The concentrations of soil C, N and P in three forests decreased gradually with the increase of soil depth, soil C : N, C : P and N : P were in relative steady state. 4) The N contents and C : N in the leaves showed significant positive correlation with the litters in three forests. These results revealed that after natural *C. kawakamii* forest changed to planted one, soil C content decreased significantly, the growths of natural and planted forests of *C. kawakamii* were restricted by N, the growth of planted *C. lanceolata* forest was restricted by N and P, and soil P was highly effective. The findings in the study could contribute to understand the limiting elements of different forests and provide scientific guidance for nutrient management of *C. kawakamii* and *C. lanceolata* forests in this study area.

**Key words:** ecological stoichiometry; *Castanopsis kawakamii*; *Cunninghamia lanceolata*; natural forest; planted forest

C、N、P 是植物的主要化学成分和物质基础, 对植物的整个生长过程起着重要作用<sup>[1]</sup>, 他们之间相互独立又相互影响<sup>[2]</sup>, 生态化学计量学综合了生物学、化学和物理学, 是在生态系统交互作用下的多种化学元素平衡的科学<sup>[3]</sup>, 对分析生态系统组成<sup>[2]</sup>、结构<sup>[4]</sup>和功能<sup>[5]</sup>起着重要作用, 为 C、N、P 等元素的化学循环提供了新的思路 and 手段。

生活叶、凋落叶和土壤是生态系统的重要组成部分, 三者构成了一个连续的养分循环链条, 生活叶通过光合作用合成有机物, 然后通过凋落叶归还给土壤, 同时土壤也为植物提供各种必需养分元素<sup>[6]</sup>。目前, 国内外学者从不同尺度对生活叶、凋落叶、土壤等化学计量<sup>[7-9]</sup>进行了研究报道, 也有学者将生活叶-凋落叶-土壤三者作为一个整体进行研究<sup>[10-11]</sup>。然而, 目前已有研究主要集中在不同林龄的同一林型或同一起源的不同林型, 而将不同起源的森林类型结合在一起的研究相对较少。因此有必要将天然林和人工林的化学计量特征进行对比分析, 了解不同森林类型的养分状况, 以期制定更合理的养管理措施。

我国中亚热带常绿阔叶林是全球同纬度特有的重要森林类型, 具有较高的生物量和生产力, 在全球陆地生态系统 C 贮存中发挥着重要作用。而中亚热带丘陵坡度陡, 土壤抗蚀性差, 降水集中, 天然林改为人工林后, 群落结构单一, 水土肥流失较为严重, 人工林长期生产力维持日益得到人们的关注。位于福建三明莘口的格氏栲(*Castanopsis kawakamii*)保护区内格氏栲天然林是目前世界上保存较为完整的中亚热带天然常绿阔叶林, 被誉为“世界格氏栲林”。20 世纪 60 年代, 部分格氏栲天然林曾被皆伐, 然后营造诸如杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、福建柏(*Fokienia hodginsii*)、格氏栲、木荚红豆树(*Ormosia xylocarpa*)等人工纯林。为此本试

验选取格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林为研究对象, 对其生活叶-凋落叶-土壤的 C、N、P 含量及三者之间的化学计量特征进行研究, 揭示 C、N、P 在生活叶-凋落叶-土壤的交换过程, 并为天然林改为人工林后的养分管理提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

试验区位于福建省三明市莘口镇福建农林大学莘口教学林场, 地理坐标(117°27'11"—117°29'45"E, 26°9'30"—26°12'49"N, 海拔 250~604.2 m), 属武夷山脉东伸支脉, 海拔 300 m 左右, 为中亚热带季风性气候, 受热带海洋气团和大陆气团交替控制, 气候温暖湿润, 年均气温为 19.1℃, 年均降雨量为 1 750 mm, 土壤类型主要为沙质页岩发育的山地红壤, 土层厚度 >80 cm, 水肥条件较好, 腐殖质含量丰富。

不同森林生态系统中, 格氏栲天然林层次结构复杂, 乔木层按照高度主要有格氏栲、马尾松(*Pinus massoniana*)和木荷(*Schima superba*)、华南木姜子(*Litsea greenmaniana*)、多花山竹子(*Garcinia multiflora*)、山黄皮(*Randia cochinchinensis*)和树参(*Dendropanax dentiger*)等树种; 灌木层种类较多, 主要有狗骨柴(*Diplospora dubia*)、华南木姜子、矩叶鼠刺(*Itea oblong*)、山血丹(*Ardisia punctata*)、黄绒润楠(*Machilus grijsii*); 草本层种类较少, 发育弱, 主要有狗脊(*Woodwardia japonica*)、山姜(*Alpinia japonica*)、黑莎草(*Gahnia tristis*)、草珊瑚(*Sarcandra glabra*)等。

格氏栲人工林层次结构简单, 乔木层树种单一(格氏栲), 灌木层发育较差, 主要有山血丹、黄绒润楠、山矾(*Symplocos sumuntia*)和毛冬青(*Ilex pubescens*)等, 草本层种类较少, 发育弱, 主要有狗脊、山姜、黑莎草、扇叶铁线蕨(*Adiantum flabellulatum*)。

杉木人工林灌木层主要有栲树(*Castanopsis fargesii*)、鸭脚茶(*Bredia sinensis*)、虎皮楠(*Daphniphyllum oldhami*)和毛冬青等,草本层主要有狗脊、山姜、金星蕨(*Parathelypteris glanduligera*)。

在格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林内选择无病虫害、生长状况良好的区域,分别随机设置 3 个 25 m×25 m 的样方,共 9 个,林分基本情况见表 1。

表 1 3 种林分样地基本概况  
Table 1 The basic situation in three forests

林分	林龄 /a	坡向	坡度 /(°)	郁闭度 /%	林分密度 /(n·hm <sup>-2</sup> )	平均胸径 /cm	平均树高 /m	年凋落物量 /(t·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
格氏栲天然林	约 170	东北	31	95	350±15 a	39.86±0.39 b	25.65±0.41 c	11.1±0.52 b
格氏栲人工林	50	东北	30	95	860±9.5 b	25.44±0.37 a	20.32±0.52 b	9.53±0.53 a
杉木人工林	50	东北	35	85	1130±16 b	23.42±0.26 a	21.08±0.22 a	5.6±0.1 a

注:同列未出现相同小写字母表示差异显著,( $P<0.05$ )。

1.2 样品采集与处理

生活叶、凋落叶和土壤样品采集于 2017 年 3 月、6 月、9 月、12 月。在 9 个样方内,随机、均匀的选取 5 株生长良好的标准木,采用人工攀爬的方式分东西南北 4 个方向在标准木上、中、下部分别采集生活叶,并在每个样方内设置 3 个 1 m×1 m 的小样方收集地表凋落叶,将每个样方内采集的生活叶混匀装入自封袋中,并做好标记带回实验室,置于烘箱,设定 105℃杀青 30 min,70℃烘干至恒重,用自动球磨仪研碎后过 0.149 mm 筛后用于测定生活叶和凋落叶全 C、全 N、全 P 含量。

在样方内按照“S”型路线选取 8 个取土点,每个采样点去除地表凋落物,用直径为 5 cm 的土钻,分 0~10、10~20、20~40 cm 3 个土层进行取样,每个小区内相同土层取得土样混合均匀,然后放入自封袋中,并做好标记,土壤样品去除细根、杂物后进行自然风干,用自动球磨仪粉碎过 100 目筛后用于养分测定土壤全 C、全 N、全 P 含量。

生活叶、凋落叶和土壤全 C、全 N 含量采用全自动碳氮分析仪(Elementar ELVario Max,德国)直接测定。植物全 P 用浓硫酸-高氯酸消煮法制备成待测液后用钼锑钨比色法测定,土壤全 P 用氢氟酸-高氯酸消煮法制备成待测液后用钼锑钨比色法测定。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel 2003 进行数据处理及绘图,采用 SPSS 17.0 统计分析软件对不同林分生活叶、凋落叶和不同土层土壤 C、N、P 含量以及 C : N、C : P、N : P 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较分析(LSD),采用 Person 相关性分析生活叶-凋落叶-土壤 C、N、P 含量以及 C : N、C : P、N : P 之间的关系。

2 结果与分析

2.1 不同林分生活叶-凋落叶-土壤(0~40 cm)C、N、P 含量

由图 1 可知,格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉

木人工林生活叶 C 含量分别为 493.9、488.88 g·kg<sup>-1</sup>和 501.99 g·kg<sup>-1</sup>,凋落叶 C 含量分别为 486.54、482.86 g·kg<sup>-1</sup>和 494.31 g·kg<sup>-1</sup>,生活叶和凋落叶 C 含量在不同林分之间无显著差异。土壤 C 含量表现为格氏栲天然林(53.74 g·kg<sup>-1</sup>)>格氏栲人工林(47.63 g·kg<sup>-1</sup>)>杉木人工林(28.05 g·kg<sup>-1</sup>),且两两之间差异显著。

格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林生活叶 N 含量分别为 15.93、15.67 g·kg<sup>-1</sup>和 14.67 g·kg<sup>-1</sup>,凋落叶 N 含量分别为 11.26、10.17 g·kg<sup>-1</sup>和 9.11 g·kg<sup>-1</sup>,土壤 N 含量分别为 1.59、1.57 g·kg<sup>-1</sup>和 1.54g·kg<sup>-1</sup>,生活叶、凋落叶和土壤 N 含量均表现为格氏栲天然林>格氏栲人工林>杉木人工林,但差异均不显著。

生活叶 P 含量表现为杉木人工林(1.01 g·kg<sup>-1</sup>)>格氏栲人工林(0.93 g·kg<sup>-1</sup>)>格氏栲天然林(0.92 g·kg<sup>-1</sup>),凋落叶 P 含量为杉木人工林(0.58 g·kg<sup>-1</sup>)>格氏栲人工林(0.57 g·kg<sup>-1</sup>)>格氏栲天然林(0.54 g·kg<sup>-1</sup>),土壤 P 含量为杉木人工林(0.28 g·kg<sup>-1</sup>)>格氏栲天然林(0.27 g·kg<sup>-1</sup>)>格氏栲人工林(0.22 g·kg<sup>-1</sup>),3 种组分不同林分之间差异均不显著。

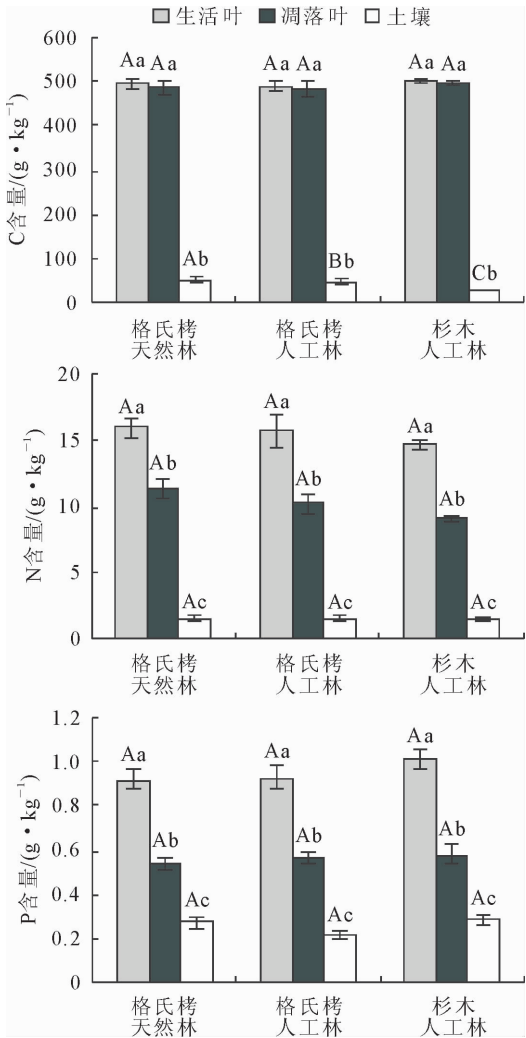
3 种林分 C、N、P 含量均表现为生活叶>凋落叶>土壤,3 种林分 N、P 含量在不同组分之间差异显著。

2.2 不同林分生活叶-凋落叶-土壤(0~40 cm)C、N、P 化学计量特征

由图 2 可知,格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林生活叶 C : N 分别为 31.36、31.89 和 34.21,C : P 为 540.54、537.58 和 501.55,N : P 为 17.44、17.32 和 16.06,3 种组分在不同林分间均无显著差异。凋落叶 C : N 表现为杉木人工林(54.62)>格氏栲人工林(48.48)>格氏栲天然林(44.39),杉木人工林显著高于另外 2 种林分,分别为 1.23 和 1.13 倍,凋落叶 C : P 为格氏栲天然林

＞杉木人工林＞格氏栲人工林, 无显著差异, 凋落叶 N : P 为格氏栲天然林显著高于格氏栲人工林和杉木人工林, 分别高出 20. 24% 和 34. 87%。格氏栲天然林和人工林土壤 C : N 和 C : P 显著高于杉木人工林, C : N 分别为杉木人工林的 1. 95 和 1. 75 倍, C : P 为 2. 14 和 2. 23 倍, 而土壤 N : P 表现为格氏栲人工林＞格氏栲天然林＞杉木人工林, 无显著差异。

: P 表现为生活叶和凋落叶均显著高于土壤, 格氏栲天然林 N : P 在不同组分之间两两差异显著。



注: 未出现相同大写字母表示不同林分相同组分之间的差异显著 ( $P<0.05$ ), 未出现相同小写字母表示同一林分不同组分之间的差异显著 ( $P<0.05$ )。下同。

图 1 3 种林分生活叶、凋落叶和土壤的 C、N、P 含量  
Fig. 1 The concentrations of C, N and P in leaf, litter and soil in three forests

3 种林分不同组分中 C : P 表现为凋落叶＞生活叶＞土壤, 且两两之间差异显著, 格氏栲天然林、格氏栲人工林和杉木人工林凋落叶 C : P 分别为生活叶的 1. 70、1. 56 倍和 1. 71 倍, 土壤的 4. 53、3. 97 倍和 9. 04 倍; C : N 在不同林分间没有一致的规律, 但均表现为凋落叶 C : N 显著高于其他组分, 杉木人工林 C : N 在不同组分之间两两差异显著; N

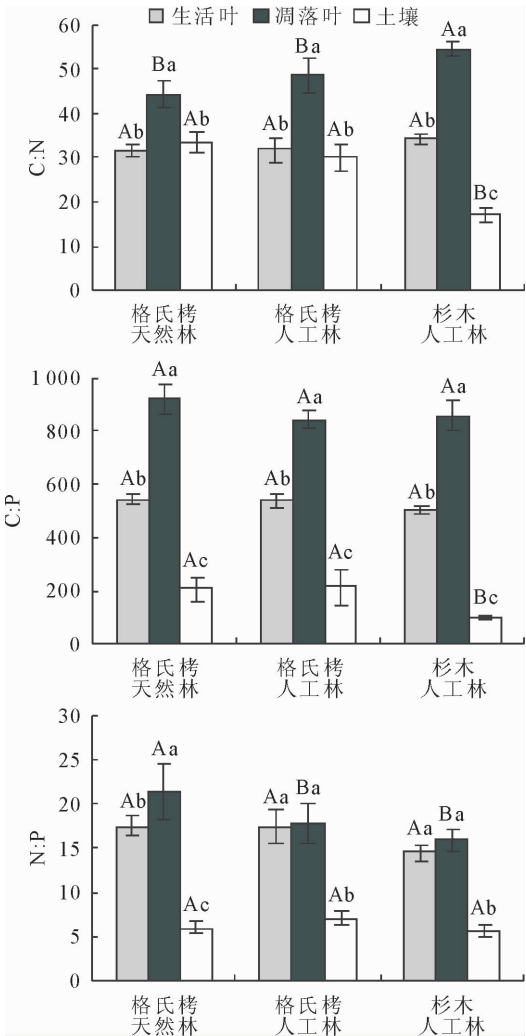


图 2 3 种林分生活叶、凋落叶和土壤的 C : N、C : P、N : P  
Fig. 2 The values of the ratios of C : N, C : P and N : P in leaf, litter and soil in three forests

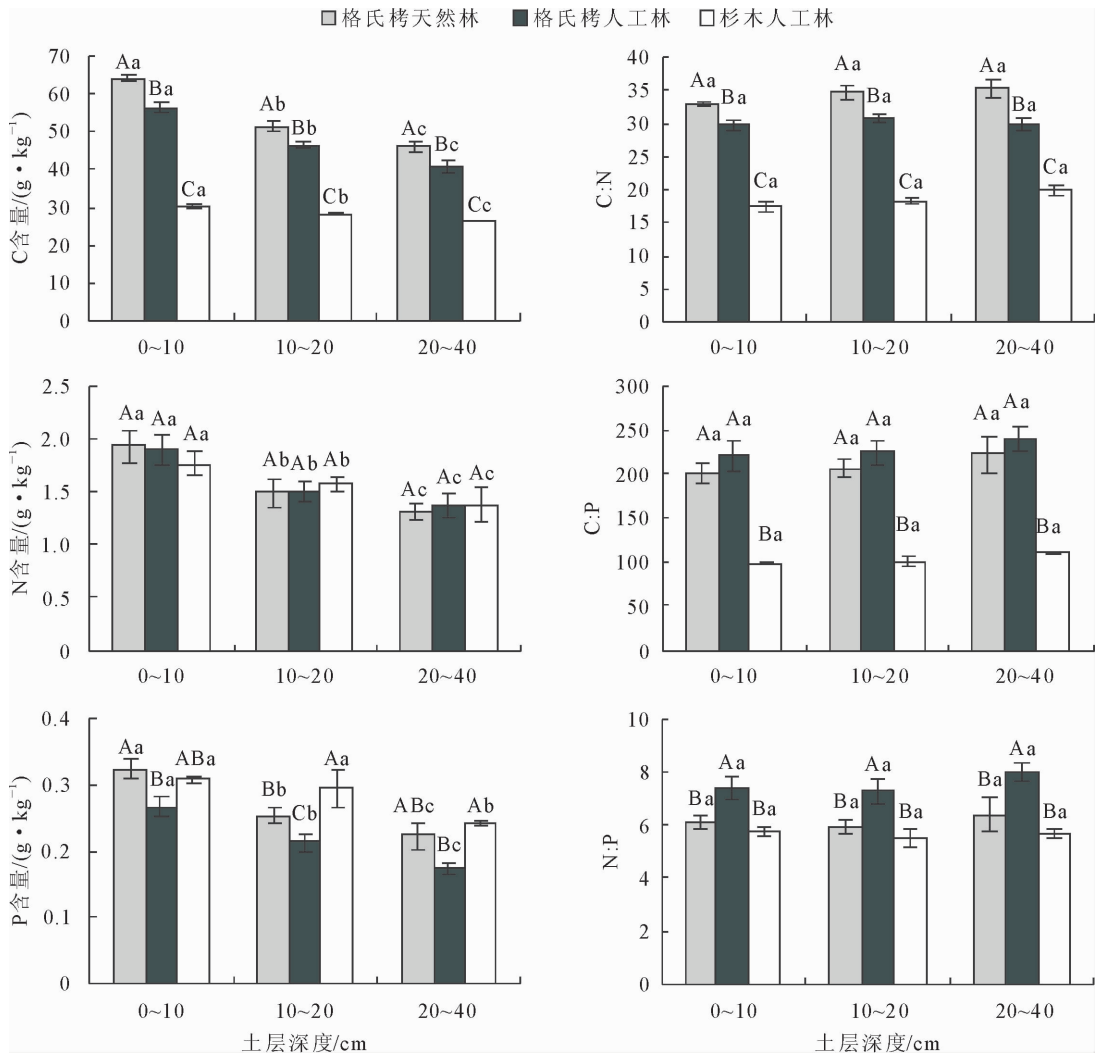
2.3 不同土层土壤 C、N、P 含量及其化学计量特征

由图 3 可知, 土壤 C 含量变化范围是 24. 6 ~ 72. 08 g · kg<sup>-1</sup>, 3 种林分土壤 C 含量在 3 个土层中均差异显著, 为格氏栲天然林＞格氏栲人工林＞杉木人工林, 土壤 N 含量变化范围是 1. 08 ~ 2. 15 g · kg<sup>-1</sup>, 3 种林分土壤 N 含量在不同土层之间差异不显著, 3 种林分土壤 C、N 含量随土层深度的增加逐渐减少, 不同土层间两两差异显著, 土壤 P 含量变化范围是 0. 12 ~ 0. 51 g · kg<sup>-1</sup>。格氏栲天然林和人工林土壤 P 含量随土层深度的增加逐渐减少, 差异显著; 杉木人工林土壤 P 含量为 0 ~ 10 cm 和 10 ~ 20 cm 土层显著高于 20 ~ 40 cm 土层, C、N、P 含量不同土层间变异系数为 28. 37%、16. 21%、26%。

土壤 C : N 的变化范围是 14. 17 ~ 41. 42, C : P 为 52. 55 ~ 377. 63, N : P 为 3. 16 ~ 12. 09, 3 种林分土壤 C : N、C : P 和 N : P 在不同土层间均差异不

显著,3 个土层 C : N 为格氏栲天然林>格氏栲人工林>杉木人工林,3 种林分间两两差异显著。3 个土层 C : P、N : P 均为格氏栲人工林>格氏栲天然

林>杉木人工林,C : P 为格氏栲天然林和人工林显著高于杉木人工林,N : P 为格氏栲人工林显著高于另外 2 个林分。



注:未出现相同大写字母表示不同林分同一土层之间的差异显著( $P<0.05$ ),未出现相同小写字母表示同一林分不同土层之间的差异显著( $P<0.05$ )。

图3 3种林分不同土层深度的C、N、P含量及其化学计量比

Fig. 3 Concentrations of C,N,P and stoichiometric ratio in different soil layers of three forests

## 2.4 生活叶-凋落叶-土壤 C、N、P 含量及其化学计量特征的相关性

对生活叶-凋落叶-土壤(0~40 cm)间 C、N、P 含量及其化学计量比进行了 Person 相关性分析,结果见表 2。结果显示,3 种林分 N 含量和 C : N 在生活叶和凋落叶之间均呈显著负相关( $P<0.05$ ),格氏栲天然林 N : P 在生活叶和凋落叶之间呈显著正相关( $P<0.05$ ),格氏栲人工林 C 含量在生活叶和凋落叶之间呈显著正相关( $P<0.05$ ),C : N 在生活叶和土壤之间呈显著负相关( $P<0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 不同林分生活叶-凋落叶-土壤的 C、N、P 含量

C、N 和 P 是植物的主要化学成分和物质基础,

C 是构成植物体干物质的重要元素,N、P 是生物体蛋白质的基本组成元素,对生物体的功能起着重要作用<sup>[12]</sup>。本研究中,3 种林分生活叶 C 平均含量为 494.92 g · kg<sup>-1</sup>,高于全球平均水平(463.2 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[13]</sup>,也高于桂西北喀斯特地区(427.5 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[14]</sup>和黄土高原子午岭(483 g · kg<sup>-1</sup>)<sup>[15]</sup>,表明该研究区 3 种林分合成的有机化合物含量较高并具有较强的 C 贮存能力,3 种林分生活叶 C 含量表现为杉木人工林高于格氏栲天然林和人工林,分别高出 1.61% 和 2.61%,说明杉木生活叶中有机化合物含量高,马钦彦等<sup>[16]</sup>研究表明针叶树种各器官平均 C 含量比阔叶树种高 1.6%~3.4%,S. C. Thomas 等<sup>[17]</sup>研究发现全球范围内针叶树种生活叶有机化合物含量高于阔叶树种,均与本研究结果一致。

表 2 生活叶-凋落叶-土壤(0~40 cm)间 C、N、P 含量及其化学计量比的 Person 相关性分析  
Table 2 Person correlation of C,N,P contents and stoichiometric ratio in leafes-litters-soils(0~40 cm)

元素	组成	格氏栲 天然林	格氏栲 人工林	杉木 人工林	元素	组成	格氏栲 天然林	格氏栲 人工林	杉木 人工林
C	生活叶-凋落叶	-0.162	0.594 *	0.206	C : N	生活叶-凋落叶	0.831 **	0.816 **	0.648 *
	生活叶-土壤	-0.228	-0.465	-0.528		生活叶-土壤	-0.370	-0.699 *	0.244
	凋落叶-土壤	-0.164	0.130	-0.170		凋落叶-土壤	-0.471	-0.433	0.460
N	生活叶-凋落叶	0.826 **	0.851 **	0.685 *	C : P	生活叶-凋落叶	0.218	-0.054	0.273
	生活叶-土壤	-0.082	0.296	0.370		生活叶-土壤	0.443	-0.527	-0.234
	凋落叶-土壤	0.144	0.418	0.551		凋落叶-土壤	0.287	-0.490	-0.177
P	生活叶-凋落叶	0.368	-0.167	0.451	N : P	生活叶-凋落叶	0.663 *	0.258	0.526
	生活叶-土壤	0.312	-0.440	-0.426		生活叶-土壤	0.401	0.305	-0.067
	凋落叶-土壤	0.165	-0.459	-0.239		凋落叶-土壤	0.572	-0.054	-0.251

注: \* 显著相关( $P<0.05$ ); \*\* 极显著相关( $P<0.01$ )。

3 种林分生活叶 N 平均含量为  $15.42\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 低于全球平均水平( $20.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[12]</sup>, 低于全国 753 种植物的平均值( $18.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[2]</sup>, 3 种林分体内 N 含量相对缺乏, 可能是因为该地区降水量较高, 使得移动性较强的有效态氮通过淋溶作用有所流失, 造成可被植物吸收和储存的有效 N 较少, 间接导致植物生活叶 N 含量降低<sup>[18]</sup>。本研究区 3 种林分生活叶 P 含量平均值为  $0.95\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 低于全球水平( $1.99\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[12]</sup> 和全国 753 种植物的平均值( $1.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[2]</sup>, 亦低于渭北黄土区刺槐林( $1.59\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )<sup>[19]</sup>, 说明该研究区植物生活叶 P 含量较低, 可能由于该研究区土壤 P 元素缺乏引起的, 植物为适应贫瘠土壤环境需降低自身元素含量。该研究区 3 种林分生活叶 C、N、P 含量相较于其他地区表现出较高的 C 含量和较低的 N、P 含量, 而 N、P 经常被作为植物生长的限制性元素, 在植物体内的含量经常表现出较高的一致性<sup>[20]</sup>。

凋落物是养分回归土壤的主要途径, 森林生长所需的养分大部分来自于凋落物的分解<sup>[21]</sup>。本研究区 3 种林分凋落叶 C、N、P 含量分别为 487.9、10.18  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.56  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 较其他研究区<sup>[14-15]</sup> 相比, 表现出高 C, 低 N、P 的特征, 这与植物生活叶表现出相同的规律, 凋落叶 C 含量表现为杉木人工林最高, 格氏栲天然林次之, 格氏栲人工林最低, 原因可能是针叶树种凋落叶中含有较多难以分解的物质(木质素、纤维素、多酚等)有关, 而阔叶树种则相反<sup>[22]</sup>。

土壤养分与地表植被种类和凋落叶的矿化密切相关<sup>[23]</sup>。本研究中, 3 种林分 0~10 cm 土层 C、N、P 含量平均值为 50.63、1.61  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和 0.32  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , C 含量高于全国平均值<sup>[24]</sup>, 但 N、P 含量却低于全国平均值<sup>[25]</sup>, 土壤与生活叶和凋落叶均呈现出相同的规律, 表明 3 个组分之间相互制约, 低的土壤养分会影响植物体内的的养分含量。本研究中格氏

栲天然林改为格氏栲人工林和杉木人工林后, 土壤 C 含量下降了 11.4% 和 47.8%, 可能是人工林的经营措施导致, 炼山过程中采伐剩余物 C 库被消耗, 而土壤表层的有机质也因火烧导致挥发而损失<sup>[25]</sup>, 也可能是由于凋落物量的差异造成的, 天然林年凋落物归还量显著高于人工林, 凋落物分解速度也为天然林最高, 导致了格氏栲天然林土壤 C 含量较高。而格氏栲人工林和杉木人工林为同一采伐迹地上营造, 土壤、气候、林龄等条件均一致, 土壤养分的差异主要由树种引起<sup>[26]</sup>, 树种是通过影响地上凋落物的数量和质量以及地下根系呼吸和分泌物实现的, 本试验地已有研究发现, 格氏栲人工林细根和凋落物量分别为杉木人工林的 2.15 倍和 1.7 倍, 导致了格氏栲人工林土壤 C 含量显著高于杉木人工林。3 种林分土壤 C、N 含量随土层深度的增加逐渐减少, 是由于凋落物和植物根系主要存在于土壤表层, 并且随着土层深度的增加而减少<sup>[27]</sup>。而 P 含量在不同林分间随土层的变化规律不一致, 主要是由于土壤 P 的来源相对单一, 来源于岩石的风化和淋溶<sup>[28]</sup>。

3.2 不同林分生活叶-凋落叶-土壤的 C : N、C : P、N : P

一般认为 C : N 和 C : P 是反应植物生长速度的重要指标<sup>[29]</sup>, 一定程度上反映了植物对 N、P 的利用效率<sup>[30]</sup>。本研究中 3 种林分生活叶 C : P、C : N 无显著差异, 说明 3 种林分 N、P 利用效率基本一致。通过对 N、P 含量的分析, 以及相应的 N : P 比率, 可以有效地识别出生物体生长、发育和繁殖的限制因素<sup>[31]</sup>, W. Koerselman 等<sup>[32]</sup> 研究表明, 在植物成熟生活叶中, 当  $N : P < 14$  时, 植物受 N 限制, 当  $14 < N : P < 16$  时, 植物同时受 N、P 的限制, 当  $N : P > 16$  且 P 溶度  $< 1.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  时, 植物受 P 限制。本研究中, 格氏栲天然林和人工林 N : P 均  $> 16$ , 说明格氏栲天然林和人工林的生长受到 P 的限制, 而

杉木人工林除了受 P 的限制外,还受到 N 的限制。

凋落物 C : N 是影响凋落物分解和养分归还的重要因素,C : N 越低,凋落物分解速度越快<sup>[33]</sup>。本研究中 3 种林分凋落叶 C : N 为杉木人工林最高,格氏栲人工林次之,格氏栲天然林最低,表明杉木人工林凋落物相对格氏栲天然林和人工林凋落叶更不容易分解。与生活叶相比,凋落叶 C 含量差异不显著,而 N、P 含量显著降低,这是由于生活叶凋落过程中发生了 N、P 养分内吸收,即营养元素从衰老生活叶中转移并被运输到植物其它组织的过程<sup>[30]</sup>,使凋落叶 C : N、C : P 显著高于生活叶。

土壤 C : N 是土壤质量的敏感指标,会影响土壤中的 C、N 循环<sup>[34]</sup>。土壤 C : N 比与土壤中有机质分解速率成反比<sup>[35]</sup>,该研究区杉木人工林土壤的平均 C : N 值较大,可知其土壤有机质分解速率较慢。土壤 C : P 是表示 P 有效性高低的指标,C : P 越低表示 P 的有效性越高<sup>[35]</sup>。本研究中 C : P 为杉木人工林显著低于格氏栲天然林和人工林,说明杉木人工林土壤磷有效性较高。土壤 N : P 可作为 N 限制和饱和的指标,指示植物生长过程中土壤养分的供应情况<sup>[36]</sup>,但植物所需要的养分不全部来自于土壤,所以土壤 N : P 不能很好的反应养分供应情况。而在不同土层之间,3 种林分 C : N、C : P、N : P 在不同土层并没有呈现出有规律的变化,这与曹娟等<sup>[37]</sup>的研究结果一致,主要是由于土壤腐殖质层对植物养分供应与林木生长吸收利用不同造成的。

4 结论

该研究区 3 种林分的生活叶、凋落叶和土壤 3 个组分较其他研究区均表现出高 C 低 N、P 的特征,其中格氏栲天然林和人工林生长受 P 限制,杉木人工林的生长受 N、P 的共同限制,建议在格氏栲天然林和人工林内施加磷肥,杉木人工林内施加氮肥和磷肥。

3 种林分中,杉木人工林土壤 P 的有效性最高;格氏栲天然林改为人工林后,土壤 C 含量显著降低,而 N、P 含量无明显变化。

通过凋落物和土壤 C : N 的比较发现杉木凋落物较格氏栲天然林和人工林更不容易分解。

3 种林分不同组分 C、N、P 含量均表现为生活叶>凋落叶>土壤,而 C : N、C : P、N : P 表现为凋落叶>生活叶>土壤。

综上,该研究结果有助于了解不同起源林分类型 C、N、P 元素在不同组分间的相互作用规律与机制,更好地为该研究区人工林的养分管理提供参考。

参考文献:

[1] VITOUSEK P M,PORDER S,HOULTON B Z,*et al.* Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. [J]. Ecological Applications, 2010,20(1):5-15.

[2] 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.

[3] ELSER J J,STERNER R W,GOROKHOVA E,*et al.* Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters,2010,3(6):540-550.

[4] HARRYOLDE V,SABINE G. Competitive interactions between two meadow grasses under nitrogen and phosphorus limitation[J]. Functional Ecology,2010,24(4):877-886.

[5] YANG G,YU G,HE N. Equilibration of the terrestrial water, nitrogen, and carbon cycles: advocating a health threshold for carbon storage[J]. Ecological Engineering, 2013, 57 (57): 366-374.

[6] 白雪娟,曾全超,安韶山,等. 黄土高原不同人工林生活叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 应用生态学报,2016,27(12): 3823-3830.

BAI X J,ZENG Q C,AN S S,*et al.* Ecological stoichiometry characteristics of leaf-litter-soil in different plantations on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(12):3823-3830. (in Chinese)

[7] SHI S,PENG C,WANG M,*et al.* A global meta-analysis of changes in soil carbon, nitrogen, phosphorus and sulfur, and stoichiometric shifts after forestation[J]. Plant & Soil,2016, 407(1-2):1-18.

[8] SUN L,ZHANG B,WANG B,*et al.* Leaf elemental stoichiometry of Tamarix, Lour. species in relation to geographic, climatic, soil, and genetic components in China[J]. Ecological Engineering,2017,106:448-457.

[9] GE J,XIE Z. Leaf litter carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometric patterns as related to climatic factors and leaf habits across Chinese broad-leaved tree species[J]. Plant Ecology, 2017,218(9):1063-1076.

[10] 邱岭军,胡欢甜,林宝平,等. 不同林龄杉木养分重吸收率及其 C : N : P 化学计量特征[J]. 西北林学院学报,2017,32(4): 22-27.

QIU L J,HU H T,LIN B P,*et al.* Nutrient resorption efficiency and C : N : P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* plantations with different ages[J]. Journal of Northwest Forestry University,2017,32(4):22-27. (in Chinese)

[11] 聂兰琴,吴琴,尧波,等. 鄱阳湖湿地优势植物生活叶-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征[J]. 生态学报,2016,36(7):1898-1906.

NIE L Q,WU Q,YAO B,*et al.* Leaf litter and soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of dominant plant species in the Poyang Lake wetland[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(7):1898-1906. (in Chinese)

[12] 平川,王传宽,全先奎. 环境变化对兴安落叶松氮磷化学计量特征的影响[J]. 生态学报,2014,34(8):1965-1974.

PING C,WANG C K,QUAN X K,*et al.* Influence of environ-



mental changes on stoichiometric traits of nitrogen and phosphorus for *Larix gmelinii* trees[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(8): 1965-1974. (in Chinese)

[13] 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.

[14] 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.

ZENG Z X, WANG K L, LIU X L, *et al.* Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of northwest Guangxi[J]. Chinese Journal of Plant Ecology-Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(7): 1898-1906. (in Chinese)

[15] 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生活叶-凋落叶-土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5461-5473.

WANG B R, ZENG Q C, AN S S, *et al.* C : N : P stoichiometry characteristics of plants-litter-soils in two kind types of natural secondary forest on the Ziwuling region of the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5461-5473. (in Chinese)

[16] 马钦彦, 陈遐林, 王 娟, 等. 华北主要森林类型建群种的含碳率分析[J]. 北京林业大学学报, 2002(Supp. 1): 100-104.

MA Q Y, CHEN X L, WANG J, *et al.* Carbon content rate in constructive species of main foresttypes in Northern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2002(Supp. 1): 100-104. (in Chinese)

[17] THOMAS S C, MARTIN A R. Carbon content of tree tissues: a synthesis[J]. Forests, 2012, 3(2): 332-352.

[18] 吴统贵, 吴明, 刘丽, 等. 杭州湾滨海湿地 3 种草本植物生活叶 N、P 化学计量学的季节变化[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 23-28.

[19] 刘冰燕, 陈云明, 曹扬. 渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(1): 1-6, 14.

LIU B Y, CHEN Y M, CAO Y. Nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation in Weibei Loess Plateau region[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(1): 1-6, 14. (in Chinese)

[20] REDFIELD A C. The biological control of chemical factors in the environment [J]. American Scientist, 1958, 46(3): 205-211.

[21] KANG H, XIN Z, BERG B, *et al.* Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants[J]. Annals of Forest Science, 2010, 67(8): 811-811.

[22] ZHAO J, ZHANG X, YUAN X, *et al.* Characteristics and environmental significance of soil dissolved organic matter[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(1): 126-130.

[23] LORENZ K, LAL R. Stabilization of organic carbon in chemically separated pools in reclaimed coal mine soils in Ohio[J]. Geoderma, 2007, 141(3-4): 294-301.

[24] TIAN H, CHEN G, 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(1-3): 139-151.

[25] 杨玉盛, 刘艳丽, 陈光水, 等. 格氏栲天然林与人工林土壤非保护性有机 C 含量及分配[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 1-8.

YANG Y S, LIU Y L, CHEN G S, *et al.* Content and distribution of unprotected soil organic carbon in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 1-8. (in Chinese)

[26] SMOLANDER A, KITUNEN V. Soil microbial activities and characteristics of dissolved organic C and N in relation to tree species[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(5): 651-660.

[27] 章广琦, 张萍, 陈云明, 等. 黄土丘陵区刺槐与油松人工林生态系统生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2018, 38(4): 1328-1336.

ZHANG G Q, ZHANG P, CHEN Y M, *et al.* Stoichiometric characteristics of *Robinia pseudoacacia* and *Pinus tabulaeformis* plantation ecosystems in the Loess hilly-gully region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(4): 1328-1336. (in Chinese)

[28] 崔高阳, 陈云明, 曹扬, 等. 陕西省森林生态系统碳储量分布格局分析[J]. 植物生态学报, 2015, 39(4): 333-342.

[29] ÅGERN G I. The C : N : P stoichiometry of autotrophs-theory and observations [J]. Ecology Letters, 2004, 7(3): 185-191.

[30] WARDLE D A, WALKER L R, BARDGETT R D. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences[J]. Science, 2004, 305(5683): 509-513.

[31] WU T G, YU M K, WANG G G, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across forty-two woody species in Southeast China [J]. Biochemical Systematics & Ecology, 2012, 44(10): 255-263.

[32] KOERSELMAN W. The vegetation N : P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.

[33] 马文济, 赵延涛, 张晴晴, 等. 浙江天童常绿阔叶林不同演替阶段地表凋落物的 C : N : P 化学计量特征[J]. 植物生态学报, 2014, 38(8): 833-842.

[34] 任书杰, 曹明奎, 陶 波, 等. 陆地生态系统氮状态对碳循环的限制作用研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(4): 58-67.

[35] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.

WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8): 3937-3947. (in Chinese)

[36] 郭冬艳. 退化草地的生态化学计量学研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.

[37] 曹娟, 闫文德, 项文化, 等. 湖南会同 3 个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2015, 51(7): 1-8.

CAO J, YAN W D, XIANG W H, *et al.* Stoichiometry characterization of soil C, N and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2015, 51(7): 1-8. (in Chinese)