

DOI: 10.5846/stxb201812192754

胡小燕,段爱国,张建国,杜海伦,张雄清,郭文福,孙建军.广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征.生态学报,2020,40(4):1207-1218.
Hu X Y, Duan A G, Zhang J G, Du H L, Zhang X Q, Guo W F, Sun J J. Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of Chinese fir plantations in Daqing Mountain, Guangxi. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(4): 1207-1218.

广西大青山杉木人工林碳氮磷生态化学计量特征

胡小燕¹, 段爱国^{1,*}, 张建国^{1,2}, 杜海伦¹, 张雄清¹, 郭文福³, 孙建军⁴

1 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091

2 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 南京 210037

3 中国林科院热带林业实验中心, 凭祥 532600

4 中国林科院亚热带林业实验中心, 分宜 336600

摘要:为研究杉木人工林生态系统植物、凋落物和土壤碳(C)、氮(N)、磷(P)生态化学计量特征的差异和相互关系,以广西大青山杉木密度试验林为研究对象,测定了 5 种初植密度下杉木人工林针叶、草本、凋落物和土壤的 C、N、P 含量及其比值。结果表明:针叶的 C、N、P 含量最高,凋落物次之,土壤最低。C:N、C:P 表现为凋落物>针叶>草本>土壤,N:P 表现为凋落物>草本>针叶>土壤。其中针叶的 N:P 均值为 16.69,凋落物 C:N 显著高于 N 发生释放的 C:N 的临界值(30)。杉木人工林针叶和草本 N、C:N 呈显著负相关关系,针叶和土壤的 C:N、N:P,草本和凋落物 P 含量、C:P 均呈显著正相关关系,体现了杉木生态系统内的 C、N、P 在针叶、草本、凋落物和土壤之间相互转化和循环。亚热带杉木人工林植物生长受 P 限制,凋落物分解慢,土壤有机质的矿化作用慢,养分循环能力低,因此在人工林抚育管理中,应保护林下植被,适当施肥,提高土壤肥力,维持杉木林长期生产力。

关键词:杉木;化学计量特征;植物;凋落物;土壤;初植密度

Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of Chinese fir plantations in Daqing Mountain, Guangxi

HU Xiaoyan¹, DUAN Aiguo^{1,*}, ZHANG Jianguo^{1,2}, DU Hailun¹, ZHANG Xiongqing¹, GUO Wenfu³, SUN Jianjun⁴

1 Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Forest Silviculture of the State Forestry Administration, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China

2 Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China

3 Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

4 Experimental Center of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi 336600, China

Abstract: The main objective of this study is to understand the relationship of nutrient elements and stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in needle, herb, litter and soil of mature Chinese fir plantation ecosystem. The study was conducted at Daqingshan forest farm, the contents of C, total N, and total P in needle, herb, litter, and soil (10—100 cm soil layers) of *Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook. The mature plantation under five different planting densities were measured. The C:N, C:P, and N:P ratios were estimated. The results indicated that C, N and P contents followed the order of older needle > litter > soil. The rank of the C:N, C:P was litter > needle > herb > soil, and the rank of the N:P was litter > herb > needles > soil. The ratio of N:P of needle was 16.69. The C:N ratio of

基金项目:国家自然科学基金面上项目(31570619);国家“十二·五”科技计划课题(2015BAD09B0101);国家“十三·五”重点研发计划课题(2016YFD0600302)

收稿日期:2018-12-19; **网络出版日期:**2019-11-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: duanag@caf.ac.cn

litter was significantly higher than the critical value of C:N released by N (30). There was a significantly negative correlation between needle and herb N, C:N. The ratios of N:P and C:P between needle and soil, as well as P content and C:P between herb and litter showed a significantly positive correlation. It indicated that the C, N, and P in the Chinese fir ecosystem were transformed and recycled among needle, herb, litter, and soil. We found that the growth of the Chinese fir plantation in the south subtropical zone was limited by P. The decomposition of litter and mineralization of organic matter were slow. The nutrient cycling ability was low. Therefore, it is necessary to protect undergrowth vegetation, apply fertilizer appropriately, improve soil fertility, and maintain the long-term productivity of the Chinese fir plantation.

Key Words: Chinese fir; stoichiometric characteristic; plant; litter; soil; planting density

生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡的科学,为研究植物-凋落物-土壤相互作用和碳(C)、氮(N)、磷(P)循环提供了新思路^[1-2]。植物结构性元素 C 和限制性元素 N、P 相互作用,调节着植物的生长^[3-4]。其中,植物叶片 N:P 的大小可以用来预测生态系统生产力的限制元素^[5],C:N 和 C:P 可以反映植物的生长速率和养分利用效率^[6]。因此,生态化学计量学通过 C、N 和 P 元素之间的比值揭示植物和土壤之间养分的调节机制,认识养分比例在植物养分需求和土壤养分供应之间的过程和功能中的作用^[7-8]。

国外学者首先利用生态化学计量方法研究海洋生态系统,然后扩展到陆地生态系统^[9-10]。国内在这方面的研究虽起步较晚但发展迅速,主要集中在不同森林类型、不同发育阶段和不同演替阶段植物叶片、凋落物和土壤化学计量学的研究,并将这两者或三者耦合起来进行 C、N、P 生态化学计量学的研究^[11-16],但缺乏对林下植被的研究。土壤是植物生长所需养分的主要来源,其养分的有效性对森林生态系统的生产力有很大的影响;植物叶片通过光合作用固定 C,并以凋落物的形式将养分归还给土壤^[17],林下植被的种类和数量对促进凋落物的分解、维持系统稳定、改善土壤养分状况等具有重要的作用^[18]。密度通过影响植被对水、热和养分等资源的竞争,对林下植被的生物量和覆盖度产生影响,进而影响凋落物的分解和森林生态系统的养分循环^[19]。因此本文将乔木叶片、草本、凋落物和土壤结合起来,研究不同密度下 C、N、P 元素化学计量比的变化规律及其相互作用。

杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)是我国南方重要针叶用材树种,具有生长速度快、材质良好等特点被广泛种植。早期针对不同立地、不同密度和不同发育阶段杉木土壤养分变化做了大量研究^[20]。结果表明,杉木凋落物养分含量低、分解速度慢,且枯枝落叶存在宿存特性,使其养分很难归还土壤,逐渐导致杉木人工林土壤肥力和长期生产力下降^[21]。造林密度作为林分重要的营林因子,适宜的林分密度在一定程度上可以改善土壤肥力,促进杉木林生态系统的稳定。因此,本文以广西凭祥市大青山 37 年生杉木密度试验林固定样地为研究对象,对杉木乔木、草本、凋落物和土壤的 C、N、P 含量及其化学计量比进行测定,分析它们之间的养分循环规律和化学计量特征的相互关系,揭示不同密度对杉木人工林生态系统养分元素分配格局的影响,为杉木人工林长期生产力维护提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验区位于中国林业科学研究院林业研究所于国家“六·五”科技攻关初期设置于我国亚热带广西凭祥的大青山试验林场(106°43'E, 22°06'N),海拔 500 m;地貌主要为低山,坡度 25°—30°;属北热带季风气候区,湿润半湿润气候;光热条件极好,降水充沛,但夏湿冬干,10 月至次年 3 月为干季,4—9 月为湿季;年平均气温 19.9℃,年降水量 1400 mm,年蒸发量 1200 mm。土壤以发育在花岗岩等母质上的红壤为主,土层厚度大于 1 m。林下植被主要有大沙叶(*Pavetta arenosa* Lour.)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa* (Ait.) Hassk.)、金毛狗脊(*Cibotium barometz* (L.) J. Sm.)和铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris* L.)等。

1.2 样地设置

大青山杉木密度试验林于 1982 年春采用 2 年生苗营造,包括 5 种初植密度,分别为 1667、3333、5000、6667、10000 株/hm²(株行距分别为 2 m×3 m、2 m×1.5 m、2 m×1 m、1 m×1.5 m、1 m×1 m,分别记为 A、B、C、D、E)。采用随机区组排列,每个密度各重复 3 次(A1、A2、A3;B1、B2、B3;C1、C2、C3;D1、D2、D3;E1、E2、E3),共 15 个样地,每个样地面积为 600 m²。不同密度杉木林分基本状况见表 1。

表 1 杉木密度试验林样地基本情况

Table 1 Basic state of Chinese Fir plantations with different planting densities

区组 Plots	坡向 Aspect	初植密度 Planting density/ (株/hm ²)	平均胸径 Mean DBH/ cm	平均树高 Mean tree height/ m	优势树树高 DTH/m	林下植被 生物量 Understory Biomass/ (t/hm ²)	土壤容重 Soil bulk density/ (g/cm ³)	土壤含水率 Soil moisture/%
A	北	1 667	19.76±1.45	18.82±1.36	15.70±1.33	5.42±1.32	1.52±0.02	13.06±2.12
B	北	3 333	17.26±0.30	18.08±0.93	15.09±0.77	7.53±3.51	1.54±0.02	13.19±1.83
C	北	5 000	16.28±2.90	16.95±3.09	14.16±2.87	6.27±3.13	1.52±0.02	14.34±2.39
D	北	6 667	17.61±2.20	18.93±1.83	16.01±1.45	4.51±1.57	1.55±0.02	14.58±1.91
E	北	10 000	15.67±3.37	16.69±3.13	14.56±2.91	4.47±1.57	1.51±0.02	13.94±2.16

1.3 样品采集与测定

在每木检尺的基础上,根据平均胸径和树高选择 10 株标准木,伐倒后,将所有的针叶混匀后对其取样 500 g 带回实验室。在每个样地内沿对角线设置 3 个 2 m×1 m 的小样方,收集样方内所有草本的地上部分以及地表所有的凋落物,将各组分分别混匀后取 200 g—300 g 样品带回实验室。将所有样品放入烘箱中 75℃ 烘干至恒重,粉碎、过筛后,用于 C、N、P 含量测定。同时在每个样地按“S”形选择 3 个土壤剖面,分别取 0—10、10—20、20—30、30—40、40—50、50—60、60—70、70—80、80—90、90—100 cm 土层土壤样品,充分混匀后带回实验室,风干,磨碎,过筛处理后,用于测定土壤 C、N、P 含量。所有样品有机质采用重铬酸钾外热法测定,全氮采用凯氏定氮法测定,全磷采用 NaOH 碱溶-钼锑抗比色法测定^[22]。

1.4 数据分析

应用 Excel 2013 和 SPSS 17.0 进行数据统计及分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(LSD)进行差异显著性检验,采用 Pearson 法进行相关性分析。

2 结果与分析

2.1 杉木人工林生态系统 C、N、P 分布特征

2.1.1 针叶、草本和凋落物 C、N、P 含量特征

从图 1 可以看出,不同密度针叶、草本、凋落物 C、N、P 含量差异不显著($P>0.05$),针叶的 C、N、P 含量分别为 522.41—578.08、15.60—18.79、0.96—1.08 g/kg,草本 C、N、P 含量分别为 426.40—451.83、14.33—18.06、0.79—0.97 g/kg,凋落物 C、N、P 含量分别为 493.47—520.43、8.82—9.89、0.42—0.48 g/kg。同一密度不同组分 C、N、P 含量差异显著($P<0.05$),其中 C 含量表现为针叶>凋落物>草本,B、C、D、E 密度林分 N、P 含量均表现为针叶>草本>凋落物。

2.1.2 土壤 C、N、P 含量特征

从表 2 可以得出,除 A 密度 0—10、80—90 cm 土层土壤有机碳含量分别显著高于 D 密度、B 密度外($P<0.05$),不同密度,其余各土层土壤有机碳含量无显著差异($P>0.05$)。A、B、C、D 和 E 密度杉木人工林 0—100 cm 土壤有机碳含量分别为 5.88—24.89、5.10—23.90、5.79—22.52、5.59—21.56 和 5.52—22.44 g/kg,并随土壤深度的增加而下降。多重比较结果表明,0—30 cm 土壤有机碳含量随土壤深度的增加显著下降($P<0.05$),在 30 cm 以下土层下降相对缓慢,60 cm—100 cm 不同土层间,土壤有机碳含量无显著差异($P>0.05$)。

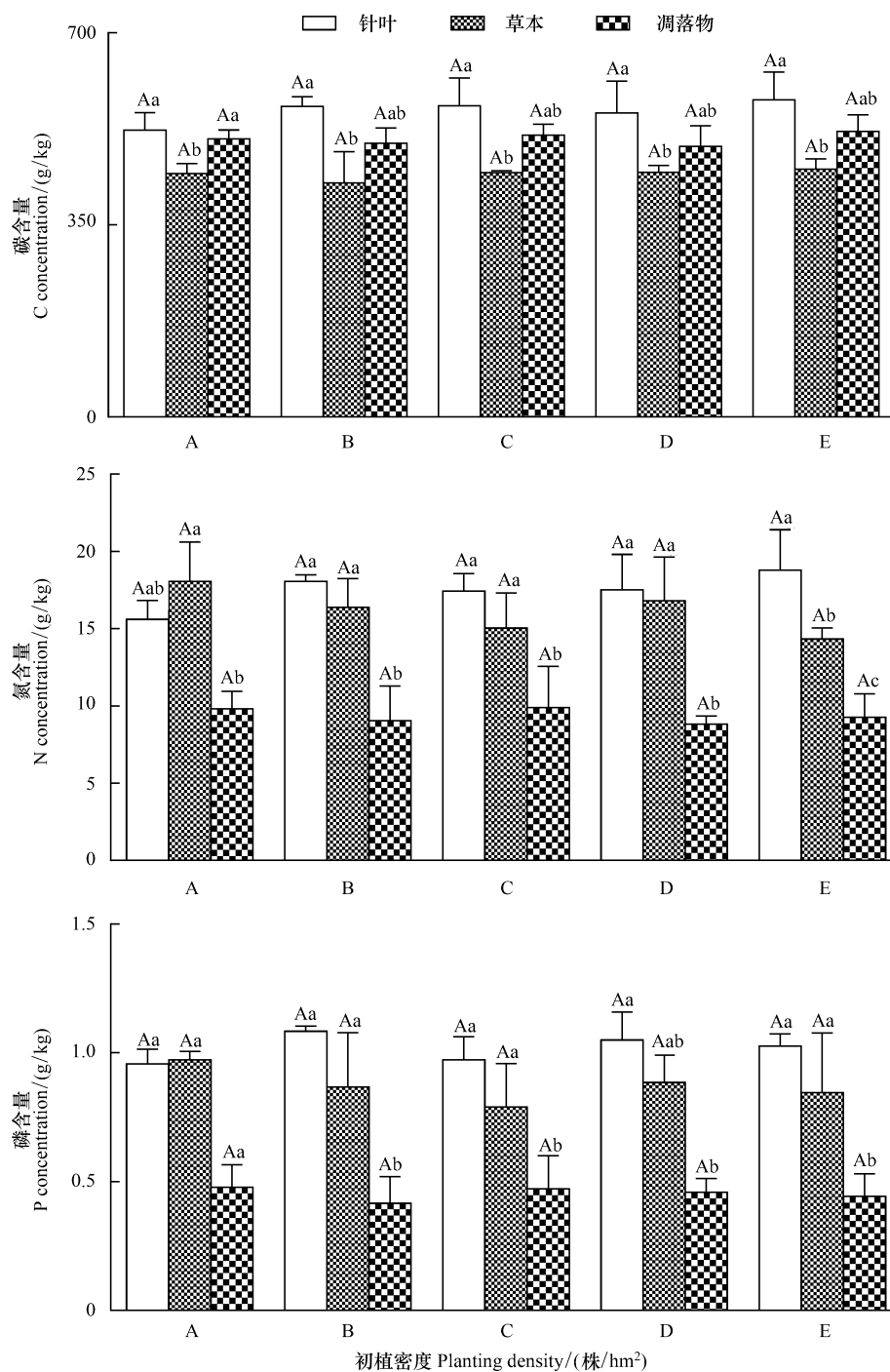


图1 不同密度针叶、草本、凋落物 C、N、P 含量

Fig.1 C, N, P contents of needle, herb and litter in different stand densities

A, 1667 株/hm²; B, 3333 株/hm²; C, 5000 株/hm²; D, 6667 株/hm²; E, 10000 株/hm²; 图中数字为平均值±标准差; 不同大写字母表示不同密度间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写表示不同组分之间差异显著 ($P < 0.05$)

从表 3 可以得出, 各层土壤的全氮含量随密度的增加变化较小, A 密度大部分土层土壤的全氮含量高于其他密度。A、B、C、D 和 E 密度杉木人工林 0—100 cm 土壤全氮含量分别为 0.51—1.51、0.49—1.38、0.50—1.33、0.59—1.35 和 0.54—1.44 g/kg, 随土壤深度的增加, 全氮含量总体上呈现下降的变化趋势。多重比较结果表明, 0—30 cm 土层的全氮含量随土壤深度的增加显著下降 ($P < 0.05$), 30—60 cm 和 60—100 cm 不同土层

间土壤全氮含量均无显著差异 ($P>0.05$)。

从表 4 可以得出,五种密度杉木人工林 0—100 cm 土壤全磷含量分别为 0.24—0.30、0.23—0.29、0.20—0.25、0.23—0.28 和 0.20—0.26 g/kg,不同密度同一土层,含量均表现为 A 密度高于 B 密度,D 密度高于 C、E 密度。同一密度,全磷含量随土壤深度增加下降幅度较小。多重比较结果表明,同一密度,0—10 cm 土层土壤全磷含量最高,A、B、E 密度,0—10 cm 土层土壤全磷含量显著高于 30 cm 以下土层 ($P<0.05$),30—100 cm 土层土壤全磷含量变化较小,差异不显著 ($P>0.05$)。

表 2 不同密度下各层土壤有机碳含量/(g/kg)

Table 2 Soil organic carbon in different layers under different stand densities

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(株/hm ²)				
	A(1667)	B(3333)	C(5000)	D(6667)	E(10000)
0—10	24.89±2.72Aa	23.90±2.85Aab	22.52±3.13Aab	21.56±3.03Ab	22.44±3.76Aab
10—20	17.39±2.73Ba	18.69±4.53Ba	16.87±4.42Ba	14.93±4.05Ba	16.26±2.23Ba
20—30	12.59±1.88Ca	12.85±3.15Ca	11.64±2.56Ca	12.25±3.94Ca	12.46±2.68Ca
30—40	10.42±1.31Da	9.92±1.70Da	10.84±2.59Ca	9.21±2.33Da	9.91±1.19Da
40—50	9.44±1.99Da	8.39±1.06DEa	8.20±1.22Da	8.13±1.19Da	9.60±2.40Da
50—60	8.98±2.73DEa	7.54±1.10EFa	8.13±1.73Da	7.32±0.86DEFa	8.27±1.54DFa
60—70	7.31±1.38EFa	6.96±1.15EFGa	7.95±2.63Da	7.03±1.18DEFa	7.21±0.46EFa
70—80	6.93±1.38Fa	6.53±0.96EFGa	6.73±0.95Da	6.30±0.93EFa	6.36±0.35Fa
80—90	6.40±1.12Fa	5.10±1.96Gb	6.45±0.62Da	5.59±0.78Fab	6.23±0.66Fab
90—100	5.88±0.97Fa	5.83±1.61FGa	5.79±0.66Da	6.13±1.07EFa	5.52±0.56Fa

平均值±标准差;同行不同小写字母表示不同密度间差异显著 ($P<0.05$);同列不同大写表示不同土层间差异显著 ($P<0.05$)

表 3 不同密度下各层土壤的全氮含量/(g/kg)

Table 3 Soil total N in different layers under different stand densities

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(株/hm ²)				
	A(1667)	B(3333)	C(5000)	D(6667)	E(10000)
0—10	1.51±0.18Aa	1.38±0.15Aa	1.33±0.20Aa	1.35±0.19Aa	1.44±0.23Aa
10—20	1.10±0.14Ba	1.12±0.17Ba	1.06±0.21Ba	1.00±0.19Ba	1.08±0.13Ba
20—30	0.91±0.14Ca	0.88±0.16Ca	0.80±0.13Ca	0.84±0.18Ca	0.87±0.08Ca
30—40	0.77±0.07Da	0.74±0.10Da	0.76±0.16DCa	0.72±0.11Da	0.75±0.06Da
40—50	0.72±0.09DEa	0.66±0.07DEFab	0.63±0.09DEFb	0.66±0.07DEab	0.72±0.09Da
50—60	0.72±0.13DEa	0.68±0.10DEa	0.65±0.14DEa	0.65±0.07DEa	0.70±0.07Da
60—70	0.62±0.09EFa	0.58±0.09EFa	0.65±0.19DEa	0.64±0.07DEa	0.65±0.06DEa
70—80	0.62±0.07EFa	0.55±0.08EFb	0.56±0.03EFab	0.61±0.08DEab	0.58±0.05Eab
80—90	0.51±0.07Fab	0.49±0.09Fb	0.55±0.07EFab	0.59±0.07Ea	0.57±0.05Ea
90—100	0.61±0.16EFa	0.53±0.12EFa	0.50±0.06Fa	0.60±0.07DEa	0.54±0.06Ea

表 4 不同密度下各层土壤的全磷含量/(g/kg)

Table 4 Soil total P in different layers under different stand densities

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(株/hm ²)				
	A(1667)	B(3333)	C(5000)	D(6667)	E(10000)
0—10	0.30±0.02Aa	0.29±0.03Aa	0.25±0.01Abc	0.28±0.03Aab	0.26±0.03Ab
10—20	0.26±0.03Ba	0.26±0.04ABa	0.23±0.01ABb	0.26±0.03ABa	0.23±0.01ABb
20—30	0.25±0.03Ba	0.25±0.05ABa	0.22±0.01ABb	0.24±0.04Bab	0.21±0.02BCb
30—40	0.25±0.02Ba	0.24±0.04Babc	0.21±0.01Bbc	0.24±0.04Bab	0.21±0.02BCc
40—50	0.25±0.02Ba	0.23±0.04Bab	0.20±0.01Bc	0.23±0.04Babc	0.21±0.02BCbc
50—60	0.25±0.02Ba	0.24±0.04Babc	0.21±0.01Bc	0.24±0.04Bab	0.21±0.02Cbc
60—70	0.24±0.03Ba	0.23±0.04Ba	0.23±0.09ABa	0.25±0.04ABa	0.21±0.02Ca
70—80	0.24±0.02Ba	0.23±0.04Bab	0.20±0.01Bc	0.24±0.04Ba	0.21±0.03Cbc
80—90	0.24±0.02Ba	0.23±0.04Bab	0.20±0.01Bc	0.23±0.04Bab	0.20±0.02Cbc
90—100	0.24±0.03Ba	0.23±0.04Ba	0.20±0.01Bb	0.24±0.04Ba	0.20±0.02Cb

2.2 杉木人工林生态系统 C、N、P 化学计量特征

2.2.1 针叶、草本和凋落物 C、N、P 化学计量特征

从图 2 可以看出,不同密度杉木各组分的 C:N、C:P 和 N:P 均无显著差异 ($P>0.05$)。针叶 C:N、C:P、N:P 分别为 32.25—34.51、535.12—572.55、16.18—17.35,草本 C:N、C:P、N:P 分别为 26.10—31.58、502.87—583.06、18.08—19.54,凋落物 C:N、C:P、N:P 分别为 52.21—57.86、1085.93—1251.62、19.36—21.75。凋落物 C:N、C:P 显著高于针叶和草本 ($P<0.05$),但针叶和草本之间无显著差异。N:P 表现为凋落物>草本>针叶。

2.2.2 土壤 C、N、P 化学计量比特征

从表 5 可以看出,五种密度杉木人工林 0—100 cm 土壤 C:N 分别为 10.00—16.54、11.09—17.31、11.63—17.06、9.53—15.99、10.17—15.58。不同密度同一土层,土壤 C:N 无显著差异 ($P>0.05$),0—30 cm 土层土壤 C:N 随密度的增加呈先上升后下降的变化趋势。同一密度土壤 C:N 总体上随土壤深度增加而下降,多重比较结果表明,0—10、10—20 cm 土层土壤 C:N 差异不显著,但均显著高于 30 cm 以下土层 ($P<0.05$)。

从表 6 可以看出,五种密度杉木人工林 0—100 cm 土壤 C:P 分别为 24.38—83.41、25.37—83.84、29.26—91.43、24.71—77.34、27.37—86.93,不同密度间差异不显著 ($P>0.05$)。土壤 C:P 随土壤深度增加呈明显下降的趋势,其中 0—30 cm 下降幅度较大,30 cm 以下土层下降幅度逐渐减小,30—60 cm、60—100 cm 不同土层土壤 C:P 无显著差异,但均显著低于 0—20 cm 土层 ($P<0.05$)。

表 5 不同密度下各层土壤 C:N

Table 5 Ratios of C:N in different soil layers under different stand densities

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(株/hm ²)				
	A(1667)	B(3333)	C(5000)	D(6667)	E(10000)
0—10	16.54±0.54Aa	17.31±0.11Aa	17.06±1.49Aa	15.99±1.51Aa	15.58±0.63Aa
10—20	15.79±0.60ABa	16.58±1.36Aa	16.03±0.65Aa	14.88±1.44Aa	15.04±0.14Aa
20—30	13.93±1.48BCa	14.53±0.92Ba	14.58±0.15Ba	14.52±0.96Aa	14.31±0.53ABa
30—40	13.57±0.50Ca	13.41±0.40BCa	14.24±0.48BCa	12.64±1.43Ba	13.25±0.24Ba
40—50	13.06±1.02CDa	12.65±0.85CDa	13.04±0.81CDa	12.29±0.74Ba	13.32±1.43Ba
50—60	12.34±1.11CDa	11.11±1.32Da	12.52±0.83Da	11.32±0.55BCa	11.89±0.26Ca
60—70	11.80±0.82CDEa	11.92±0.51CDa	12.24±0.37Da	10.92±1.28BCa	11.21±0.92CDa
70—80	11.15±1.63DEa	11.83±0.40Da	12.11±0.37Da	10.33±0.24Ca	10.93±0.36CDa
80—90	12.48±0.91CDa	11.84±0.76Da	11.72±0.89Da	9.53±0.52Ca	10.91±0.99CDa
90—100	10.00±2.46Ea	11.09±0.86Da	11.63±1.07Da	10.28±0.82Ca	10.17±0.61Da

平均值±标准差;同行不同小写字母表示不同密度间差异显著 ($P<0.05$);同列不同大写表示不同土层间差异显著 ($P<0.05$)

表 6 不同密度下各层土壤 C:P

Table 6 Ratios of C:P in different soil layers under different stand densities

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(株/hm ²)				
	A(1667)	B(3333)	C(5000)	D(6667)	E(10000)
0—10	83.41±6.02Aa	83.84±12.23Aa	91.43±11.83Aa	77.34±13.84Aa	86.93±6.49Aa
10—20	67.31±3.58Ba	74.18±21.25Aa	74.08±8.80Ba	58.85±18.46ABa	70.46±3.85Ba
20—30	49.83±2.86Ca	51.92±13.20Ba	54.16±6.01Ca	51.25±13.91BCa	58.25±3.46Ca
30—40	41.94±2.68Da	42.59±9.08BCa	50.65±10.92CDa	39.32±13.82BCDa	46.85±2.00Da
40—50	38.65±4.27Da	37.01±9.10BCa	40.42±5.85DEa	36.48±9.89CDa	45.62±3.77Da
50—60	36.13±7.93DEa	33.35±10.05BCa	39.56±4.85DEa	31.62±7.50CDa	40.20±6.49DEa
60—70	30.32±5.70EFa	31.20±9.23BCa	35.09±2.34Ea	29.35±8.33Da	35.15±3.98EFa
70—80	29.15±3.32EFa	29.05±6.85Ca	34.17±2.43Ea	27.39±6.70Da	31.06±3.77Fa
80—90	26.42±2.75Fa	25.37±5.75Ca	32.97±1.24Ea	24.71±6.45Da	30.75±4.67Fa
90—100	24.38±3.91Fa	25.45±4.97Ca	29.26±0.34Ea	26.56±7.22Da	27.37±2.71Fa

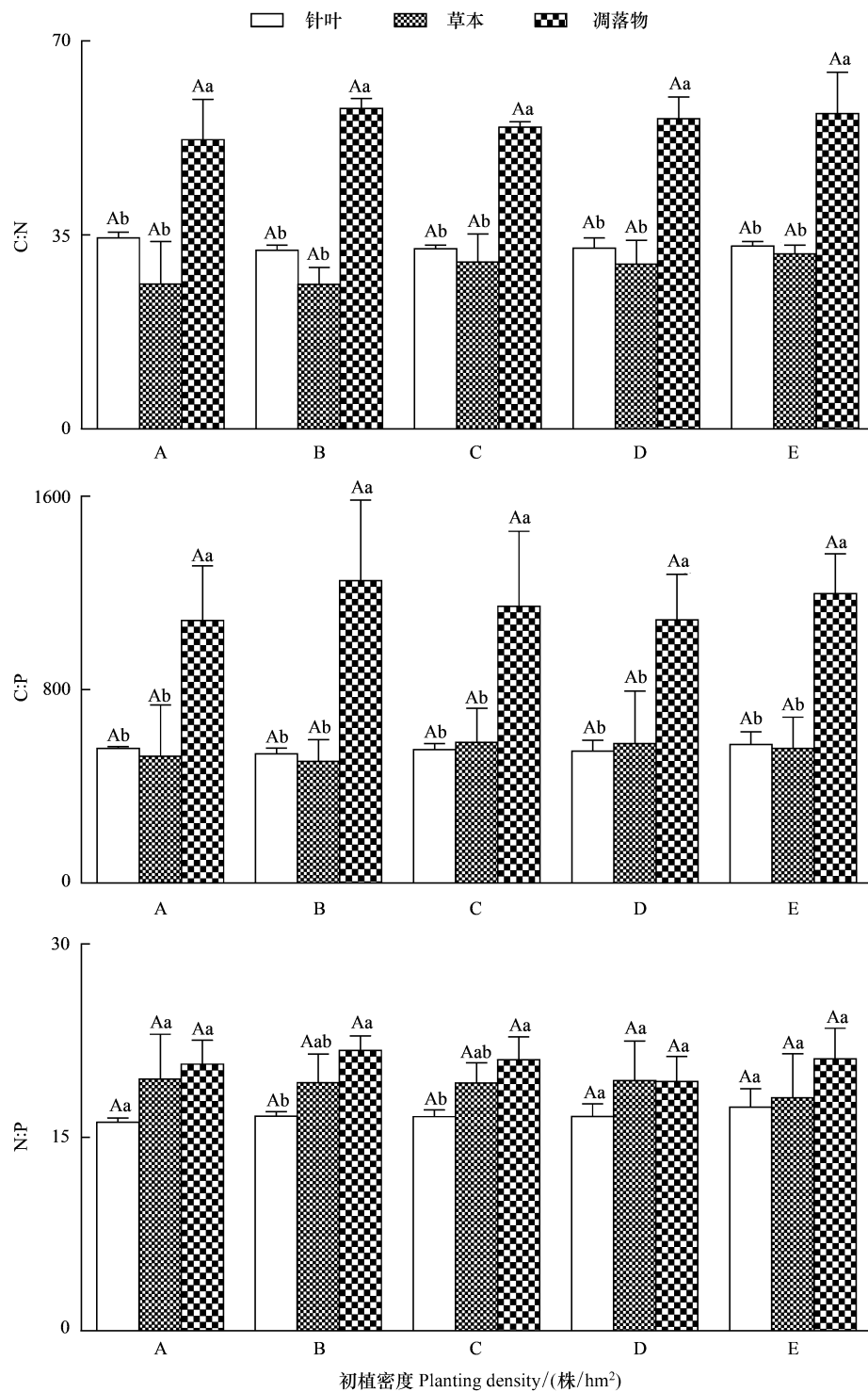


图2 不同密度针叶、草本、凋落物 C、N、P 化学计量比特征

Fig.2 The stoichiometry characteristics of needle, herb and litter in different stand densities

A, 1667 株/hm²; B, 3333 株/hm²; C, 5000 株/hm²; D, 6667 株/hm²; E, 10000 株/hm²; 图中数字为平均值±标准差; 不同大写字母表示不同密度间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写表示不同组分之间差异显著 ($P < 0.05$)

从表 7 可以看出, 五种密度杉木人工林 0—100 cm 土壤 N:P 分别为 2.12—5.05、2.17—4.84、2.53—5.39、2.58—4.82、2.69—5.59, E 密度林分土壤 N:P 最高, D 密度最低, 主要与土壤 P 含量有关。同一密度随土层深

度增加,土壤 N:P 总体上呈下降的变化趋势,0—10 cm 土层土壤 N:P 显著高于 20 cm 以下土层 ($P < 0.05$), 30—60 cm、60—100 cm 土层土壤 N:P 下降幅度较小,土层间没有显著差异 ($P > 0.05$)。

表 7 不同密度下各层土壤 N:P

Table 7 Ratios of N:P in different soil layers under different stand densities

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(株/hm ²)				
	A (1667)	B (3333)	C (5000)	D (6667)	E (10000)
0—10	5.05±0.37Aa	4.84±0.68Aa	5.39±0.85Aa	4.82±0.54Aa	5.59±0.51Aa
10—20	4.26±0.09Ba	4.43±0.95ABa	4.64±0.73Aa	3.90±0.86ABa	4.68±0.25Ba
20—30	3.62±0.56BCa	3.55±0.73BCa	3.71±0.41Ba	3.53±0.89Ba	4.07±0.09Ca
30—40	3.10±0.27CDa	3.16±0.59CDa	3.54±0.65Ba	3.06±0.76Ba	3.54±0.15Da
40—50	2.98±0.47CDa	2.93±0.70CDa	3.09±0.29BCa	2.94±0.64Ba	3.43±0.20Da
50—60	2.91±0.44CDa	2.97±0.61CDa	3.18±0.50BCa	2.78±0.56bBa	3.38±0.49Da
60—70	2.57±0.43DEa	2.60±0.68CDa	2.87±0.19BCa	2.65±0.46Ba	3.13±0.10DEa
70—80	2.64±0.37DEa	2.46±0.60CDa	2.82±0.17BCa	2.64±0.60Ba	2.84±0.26Ea
80—90	2.12±0.13Ea	2.17±0.62Da	2.83±0.31BCa	2.60±0.70Ba	2.81±0.23Ea
90—100	2.54±0.69DEa	2.30±0.45CDa	2.53±0.28Ca	2.58±0.65Ba	2.69±0.14Ea

2.3 杉木人工林针叶、草本、凋落物和土壤 C、N、P 及其比值相关性分析

对针叶、草本、凋落物和 0—10 cm 土壤 C、N、P 及其化学计量比进行相关性分析(表 8),结果表明:针叶、土壤的 C 含量与其自身 N 含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$),草本、凋落物的 N 含量与其自身 P 含量呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。针叶、草本和土壤的 C:P 与其自身的 N:P 呈极显著正相关关系 ($P < 0.01$)。针叶与草本 N 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01$),C:N 呈显著负相关。针叶和土壤 C:P 呈显著正相关 ($P < 0.05$),N:P 值呈极显著正相关 ($P < 0.01$)。草本和凋落物 P 含量、C:P 呈显著正相关 ($P < 0.05$),针叶和凋落物养分之间无显著相关性,可能与凋落物的组分有关。其他组分之间的 C、N、P 化学计量比均无明显相关关系 ($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 杉木人工林植物-凋落物-土壤 C、N、P 含量特征

生态系统内部的 C、N、P 循环在植物、凋落物和土壤之间相互转换^[5],对森林生态系统养分的维护具有重要意义。不同生活型和不同植物器官 C、N、P 含量存在差异,姜沛沛等^[23]发现陕西省森林群落的乔灌木叶片和凋落物的 C、N、P 含量差异显著。本研究表明,不同密度针叶、草本和凋落物的 C、N、P 及其化学计量比无显著差异,而相同密度不同组分间差异显著,可能是密度越大的林分,自然稀疏能力越强,随着林龄的增长,林分密度趋于稳定,而在成熟龄时养分略有回升^[24]。叶片通过光合作用固定 C,同时将部分 C 转移到土壤,并以凋落物的形式将 C 和养分逐步补偿给土壤^[25],导致了叶片的 C、N、P 含量最高,凋落物次之,土壤最低。其中针叶的 C 含量平均值为 557.52 g/kg,明显高于曾昭霞等^[26]研究的喀斯特林地植物 C 含量平均值(427.5 g/kg)和全球植物叶片 C 元素含量平均值(464 g/kg)^[27],针叶的 N、P 含量平均值分别为 17.48、1.02 g/kg,均低于全球尺度的 N、P 含量(20.6、1.99 g/kg)^[26]以及我国区域的 N 含量(20.2 g/kg)和 P 含量(1.46 g/kg)^[28]。不同温度带植被的养分含量具有明显差异,研究表明我国亚热带地区植被 N、P 含量较低^[29]。另外亚热带地区降水较多,大部分的 N、P 受雨水淋溶影响,植被可吸收的养分减少^[30],导致植物 N、P 含量较低。草本叶片的 C、N、P 含量均值分别为 442.57、16.12、0.87 g/kg,均低于针叶,可能是由于乔木的光合利用效率更高,对养分的吸收具有更大的竞争力。凋落物作为陆地生态系统有机碳和养分的储存库,参与了土壤与植物间能量和养分的转移,对森林生态系统维护和养分循环有重要意义^[31]。研究表明凋落物的 C、N、P 均低于杉木叶片,可能是因为植物对养分的再吸收利用,养分从衰老的叶片转移到新的植物器官为植物生长提供养分^[32]。

表 8 针叶、草本、凋落物和土壤 C、N、P 含量及其化学计量的相关性
Table 8 Correlations of Needle, herb, litter and soil C, N, P stoichiometry

组分 Component	指标 Index	针叶 Needle				
		C	N	P	C:N	C:P
针叶 Needle	C	1				
	N	0.929 **	1			
	P	0.239	0.424	1		
	C:N	-0.575 *	-0.639 *	-0.646 **	1	
	C:P	0.503	0.403	-0.412	0.387	1
	N:P	0.861 **	0.879 **	0.127	-0.210	0.789 **
组分 Component	指标 Index	草本 Herb				
		C	N	P	C:N	C:P
草本 Herb	C	1				
	N	0.049	1			
	P	0.163	0.909 **	1		
	C:N	0.205	-0.926 **	-0.782 **	1	
	C:P	0.019	-0.852 **	-0.946 **	0.833 **	1
	N:P	-0.279	-0.306	-0.667 **	0.149	0.667 **
组分 Component	指标 Index	凋落物 Litter				
		C	N	P	C:N	C:P
凋落物 Litter	C	1				
	N	0.009	1			
	P	-0.085	0.890 **	1		
	C:N	0.271	-0.935 **	-0.865 **	1	
	C:P	0.337	-0.816 **	-0.947 **	0.906 **	1
	N:P	0.219	0.052	0.408	0.02	0.44
组分 Component	指标 Index	土壤 Soil				
		C	N	P	C:N	C:P
土壤 Soil	C	1				
	N	0.796 **	1			
	P	0.240	0.345	1		
	C:N	0.225	-0.408	-0.189	1	
	C:P	0.603 *	0.368	-0.623 *	0.311	1
	N:P	0.480	0.587 *	-0.553 *	-0.227	0.853 **
组分 Component	C	N	P	C:N	C:P	N:P
针叶-草本 Needle-Herb	0.031	-0.663 **	-0.423	-0.601 *	-0.023	-0.143
针叶-凋落物 Needle-Litter	0.161	-0.100	-0.130	-0.047	0.109	0.323
针叶-土壤 Needle-Soil	0.370	0.170	-0.120	-0.320	0.583 *	0.726 **
草本-凋落物 Herb-Litter	0.477	0.307	0.584 *	0.402	0.563 *	-0.120
草本-土壤 Herb-Soil	-0.128	-0.032	0.353	0.161	0.507	0.193
凋落物-土壤 Litter-Soil	-0.234	-0.337	0.103	-0.134	0.489	0.213

* 表示显著相关($P < 0.05$), ** 表示极显著相关($P < 0.01$)

其中凋落物 C 含量平均值为 506.66 g/kg,明显高于陕西省 121 个森林群落凋落物 C 含量平均值(367.40 g/kg)^[23]和尾巨桉(*Eucalyptus urophylla*×*Eucalyptus grandis*)人工林凋落物 C 含量平均值(493.23 g/kg)^[33],可能与立地条件、树种等有关^[34,35]。凋落物 N、P 含量平均值分别为 9.37、0.45 g/kg,均低于湖南会同 25 年生杉木林凋落物 N、P 含量(13.82、2.72 g/kg)^[36]。从自然地带来看,亚热带杉木是南部边缘产区,而湖南会同杉木林是中亚热带杉木适生生长期^[37],研究发现,亚热带杉木的各器官平均含 N 量和含 P 量均比中热带要低,特别是 P 含量,只有中热带的 15.7%—73.7%^[38],土壤 C、N、P 含量也均低于湖南会同。杉木人工

林凋落物的养分主要来自针叶,因此养分含量低。从林龄来看,凋落物的养分年归还量随林龄的增加而增加^[39],凋落物分解后养分元素释放并迁移到土壤中造成凋落物 N、P 含量下降。

土壤中 C、N、P 是土壤化学性质的重要组成部分,能够敏感地指示土壤质量的变化,对植物的生长发育有很大的影响^[40]。研究表明,土壤 C、N 含量随土壤深度增加下降幅度达一半以上,土壤 P 含量下降幅度相对较小,这与很多研究结果一致。刘兴诏等^[41]对鼎湖山森林土壤中全 N 和全 P 含量研究发现,全 N 含量在土壤剖面上呈现出“倒金字塔”的分布,而全 P 含量则是“圆柱体”分布模式。彭晓等^[42]对中亚热带 4 种土壤 C、全 N、全 P 分析也得出了相似的结果,这是因为土壤 C、N 主要来源于凋落物的归还,凋落物、土壤微生物和土壤动物大都集中分布在 0—10 cm 的土层中,凋落物分解后养分元素在土壤表层富集并迁移至深层土壤,造成深层土壤养分低于表层土壤^[43]。建议在人工林抚育时尽量保护林下植被,提高杉木林土壤肥力。而土壤中 P 元素主要来源于漫长的岩石风化,风化的程度在 0—60 cm 的土壤层中差异不大^[41,42],所以 P 元素在土壤剖面上无显著变化。五种密度杉木人工林土壤 C、N、P 含量分别为 5.10—24.89 g/kg、0.49—1.51 g/kg、0.20—0.30 g/kg。A 密度土壤 C、N、P 含量较高,主要原因是低密度林分下,草本和灌木丰富,林下植被生物量为 9.76—13.56 t/hm²,透光性强^[44]。在这样的环境下,土壤动物、微生物及各种酶活性增加^[19],凋落物分解较快,土壤养分相对较高^[18]。

3.2 杉木人工林植物-凋落物-土壤 C、N、P 化学计量比特征

植物体的 C:N 和 C:P 通常能反映植物 N 和 P 的利用效率以及植物的生长速度,生长速率假说认为,C:N、C:P 与植物的生长速率呈反比^[2]。植物的 N:P 用来指示植物生长的限制性养分,一般认为,N:P<14 时,植物生长表现为受 N 限制;当 N:P>16 时,表现为受 P 限制;当 14<N:P<16 时,则可能同时受 N 限制或 P 限制或两者共同限制^[45]。本研究中,叶片的 C:N、C:P、N:P 均值分别为 32.98、552.57、16.69,叶片 N:P>16,说明植物生长受 P 限制。与其他森林生态系统相比,本试验区叶片的 C:N、C:P 较高,体现了植物对养分较高的利用率,反映了杉木成熟林生长比较缓慢。凋落物 C:N、C:P、N:P 分别为 55.50、1153.87、20.79,C:N、C:P 均高于中国森林生态系统凋落物的 C:N(44.3)、C:P(1132.5),而 N:P 低于中国森林生态系统凋落物 N:P(25.0)^[46]。凋落物的分解与自身的质量有很大关系,其中,凋落物的 C:N 最能反映凋落物的分解速率,研究发现,凋落物的 C:N 比越高,分解越慢^[47]。Ritter^[48]发现,当 C 与营养元素低于某个临界值时,N 才会发生释放,N 发生释放的 C:N 的临界值为 30。本研究中,五种密度林分凋落物的 C:N 显著高于 30,表明杉木凋落物的分解慢,不利于营养元素的释放和循环。土壤碳氮磷比是有机质或其他成分中的碳素与氮素、磷素总质量的比值,是土壤有机质组成和质量程度的一个重要指标^[5],土壤有机层的 C:N、C:P 可以用来指示有机质矿化速率和土壤 P 的有效性,较低的 C:N、C:P 表明土壤有机层矿化作用快和 P 的有效性高。本研究发现,0—100 cm 土层土壤 C:N 均值为 12.95,高于我国陆地土壤 C:N 的平均值(11.9)^[49],表明杉木成熟林土壤有机质矿化作用较慢,土壤 N 含量低。这是由于本研究区域土壤为酸性,微生物数量相对低,土壤酶活性差,影响有机质分解和养分的矿化^[34]。本研究所有土层土壤的 C:P、N:P 均值分别为 44.38、3.30,均低于我国陆地土壤 C:P 和 N:P 的平均值(61、5.2)^[46]以及全球森林土壤 N:P(6.6)^[50],而与我国森林生态系统土壤 N:P 值一致(3.2)^[51]。

3.3 杉木人工林植物-凋落物-土壤 C、N、P 及其比值的相关性

相关性分析结果表明,针叶 C 含量与其自身的 N 含量呈极显著正相关关系,N 含量与 P 含量无明显的关系。Sterner 等^[52]认为叶片 C 含量与 N、P 含量间存在显著的负相关,N 含量与 P 含量间则存在显著的正相关关系,某一元素过量和不足都会影响植物间养分元素的平衡关系^[53-54],因此可能是由于该样地植物的生长受 P 限制使其养分利用不平衡等。针叶、草本和土壤的 C:P 与其自身的 N:P 呈极显著正相关关系,这与许宇星等^[55]对不同品种桉树的研究一致。针叶和土壤 C:N、N:P 呈显著正相关关系,说明植物体内的养分需求与土壤的养分供应有一定的关联^[30]。

4 结论

通过对杉木人工林生态系统针叶、草本、凋落物和土壤 C、N、P 及其化学计量比分析,发现不同密度针叶、草本、凋落物和土壤 C、N、P 含量差异不显著,而不同组分间差异显著。其中,杉木叶片作为光合作用的主要器官,C、N、P 含量最高,分别为 557.52、17.48、1.02 g/kg,凋落物的 C、N、P 含量均低于叶片,土壤最低。总体上,不同密度林分 C:N、C:P 表现为凋落物>针叶>草本>土壤,N:P 表现为凋落物>草本>针叶>土壤。叶片的 N:P>16,说明植物生长受 P 限制。凋落物 C:N 显著高于 N 发生释放的 C:N 的临界值,说明凋落物分解慢,不利于养分的归还与利用。土壤的 C:N 较高,说明该区域土壤有机质的矿化作用慢。因此在人工林抚育管理中,应保护林下植被,促进凋落物分解,提高人工林养分循环能力,维持杉木林长期生产力。杉木人工林针叶、草本、凋落物和土壤 C、N、P 含量及其化学计量比具有紧密的相关性,体现了杉木生态系统内的 C、N、P 在针叶、草本、凋落物和土壤之间相互转化和循环。然而由于立地条件和试验样品的影响,还有待于对杉木人工林生态系统养分循环进行深入研究。

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化理论. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [2] Elser J J, Dobberfuhl D R, Mackay N A, Schampel J H. Organism size, life history, and N:P stoichiometry: toward a unified view of cellular and ecosystem processes. *BioScience*, 1996, 46(9): 674-684.
- [3] Elser J J, Bracken M E, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135-1142.
- [4] Ågren G I. Stoichiometry and nutrition of plant growth in natural communities. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2008, 39(1): 153-170.
- [5] 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. 生态学报, 2008, 28(8): 3937-3947.
- [6] Elser J J, Acharya K, Kyle M, Cotner J, Makino W, Markow T, Watts T, Hobbie S, Fagan W, Schade J, Hood J, Sterner R W. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota. *Ecology Letters*, 2010, 6(10): 936-943.
- [7] 吴统贵, 陈步峰, 肖以华, 潘勇军, 陈勇, 萧江华. 珠江三角洲 3 种典型森林类型乔木叶片生态化学计量学. 植物生态学报, 2010, 34(1): 58-63.
- [8] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 王玲玲, 王国兴, 孙鹏跃, 白小芳. 华北落叶松根茎叶碳氮磷含量及其化学计量学特征的季节变化. 植物学报, 2014, 49(5): 560-568.
- [9] Schindler D E. Reviewed Work: Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere by Robert W Sterner, James J Elser, Peter Vitousek. *The Quarterly Review of Biology*, 2003, 78(4): 501-501.
- [10] Sardans J, Rivas-Ubach A, Peñuelas J. The C:N:P stoichiometry of organisms and ecosystems in a changing world: A review and perspectives. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2012, 14(1): 33-47.
- [11] 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. 植物生态学报, 2010, 34(1): 48-57.
- [12] Zheng S X, Shanguan Z P. Spatial patterns of leaf nutrient traits of the plants in the Loess Plateau of China. *Trees*, 2007, 21(3): 357-370.
- [13] 毕建华, 苏宝玲, 于大炮, 吴健, 曹琳琳, 代力民, 周莉. 辽东山区不同森林类型生态化学计量特征. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3109-3115.
- [14] 庞圣江, 张培, 贾宏炎, 杨保国, 邓硕坤, 冯昌林, 王庆灵. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征. 中国农学通报, 2015, 31(1): 17-23.
- [15] Song B L, Yan M J, Hou H, Guan J H, Shi W Y, Li G Q, Du S. Distribution of soil carbon and nitrogen in two typical forests in the semiarid region of the Loess Plateau, China. *Catena*, 2016, 143: 159-166.
- [16] 王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰. 中国四种森林类型主要优势植物的 C:N:P 化学计量学特征. 植物生态学报, 2011, 35(6): 587-595.
- [17] 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 陈亚南, 党廷辉, 安韶山. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究. 土壤学报, 2014, 51(1): 133-142.
- [18] 林开敏, 俞新妥, 洪伟, 黄宝龙. 杉木人工林林下植物对土壤肥力的影响. 林业科学, 2001, 37(Z1): 94-98.
- [19] 盛炜彤, 杨承栋, 范少辉. 杉木人工林的土壤性质变化. 林业科学研究, 2003, 16(4): 377-385.
- [20] 胡亚利, 孙向阳, 张建国, 段爱国. 杉木人工林土壤养分变化规律. 河北林业科技, 2007, (1): 9-11, 22-22.
- [21] 盛炜彤, 范少辉. 杉木及其人工林自身特性对长期立地生产力的影响. 林业科学研究, 2002, 15(6): 629-636.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版). 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-114.
- [23] 姜沛沛, 曹扬, 陈云明. 陕西省森林群落乔灌木叶片和凋落物 C、N、P 生态化学计量特征. 应用生态学报, 2016, 27(2): 365-372.

- [24] 段爱国, 张建国, 何彩云, 童书振. 杉木人工林生物量变化规律的研究. 林业科学研究, 2005, 18(2): 125-132.
- [25] 王维奇, 徐玲琳, 曾从盛, 仝川, 张林海. 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. 生态学报, 2011, 31(23): 7119-7124.
- [26] 曾昭霞, 王克林, 刘孝利, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 张浩, 杜虎. 桂西北喀斯特森林植物-凋落物-土壤生态化学计量特征. 植物生态学报, 2015, 39(7): 682-693.
- [27] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, Mccauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. Nature, 2000, 408(6812): 578-580.
- [28] Han W X, Fang J Y, Guo D L, Zhang Y. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. New Phytologist, 2005, 168(2): 377-385.
- [29] 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 王绍强. 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. 环境科学, 2007, 28(12): 2665-2673.
- [30] 郭颖, 李军, 张亚亚, 牛颖权, 周雯雯, 王艺涵. 我国陆地生态系统土壤·植物生态化学计量学研究进展. 安徽农业科学, 2016, 44(16): 1-6.
- [31] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. Biological Reviews, 2010, 81(1): 1-31.
- [32] 曾德慧, 陈广生, 陈伏生, 赵琼, 冀小燕. 不同林龄樟子松叶片养分含量及其再吸收效率. 林业科学, 2005, 41(5): 21-27.
- [33] 竹万宽, 陈少雄, 王志超, 徐宇星, 张利丽, 杜阿朋. 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. 热带亚热带植物学报, 2017, 25(2): 127-135.
- [34] Zhang Q Z, Wang C K, Wang X C, Quan X K. Carbon concentration variability of 10 Chinese temperate tree species. Forest Ecology and Management, 2009, 258(5): 722-727.
- [35] Elias M, Potvin C. Assessing inter- and intra-specific variation in trunk carbon concentration for 32 neotropical tree species. Canadian Journal of Forest Research, 2003, 33(6): 1039-1045.
- [36] 高吉权, 周国新, 王光军, 李栎, 赵月. 杉木林凋落物与土壤 C:N:P 生态化学计量学的相关关系. 湖南林业科技, 2016, 43(4): 1-6.
- [37] 洪菊生. 杉木造林优良种源选择. 林业科学研究, 1994: 1-25.
- [38] 盛炜彤. 中国人工林及其育林体系. 北京: 中国林业出版社, 2014.
- [39] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 黄志霖, 付甜, 封晓辉. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系. 生态学报, 2012, 32(3): 852-862.
- [40] 曾凡鹏, 迟光宇, 陈欣, 史奕. 辽东山区不同林龄落叶松人工林土壤-根系 C:N:P 生态化学计量特征. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1819-1825.
- [41] 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. 植物生态学报, 2010, 34(1): 64-71.
- [42] 彭晓, 方晰, 喻林华, 项文化, 黄志宏. 中亚热带 4 种森林土壤碳、氮、磷化学计量特征. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 65-72.
- [43] 郭剑芬, 杨玉盛, 陈光水, 林鹏, 谢锦升. 森林凋落物分解研究进展. 林业科学, 2006, 42(4): 93-100.
- [44] 胡小燕, 段爱国, 张建国, 杜海伦, 张雄清, 郭文富, 郭光智. 南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究. 林业科学研究, 2018, 31(3): 15-23.
- [45] Koerselman W, Meuleman A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation. The Journal of Applied Ecology, 1996, 33(6): 1441-1450.
- [46] 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 王维奇, 王纯. 生态化学计量学特征及其应用研究进展. 生态学报, 2013, 33(18): 5484-5492.
- [47] Sariyildiz T, Anderson J M. Interactions between litter quality, decomposition and soil fertility: a laboratory study. Soil Biology and Biochemistry, 2003, 35(3): 391-399.
- [48] Ritter E. Litter decomposition and nitrogen mineralization in newly formed gaps in a Danish beech (*Fagus sylvatica*) forest. Soil Biology and Biochemistry, 2005, 37(7): 1237-1247.
- [49] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. Biogeochemistry, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [50] 赵航, 贾彦龙, 王秋凤. 中国地带性森林和农田生态系统 C-N-P 化学计量统计特征. 第四纪研究, 2014, 34(4): 803-814.
- [51] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [52] Sterner R W, Elser J J. Ecological Stoichiometry: The Biology of Elements from Molecules to the Biosphere. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [53] 莫江明, 张德强, 黄忠良, 余清发, 孔国辉. 鼎湖山南亚热带常绿阔叶林植物营养元素含量分配格局研究. 热带亚热带植物学报, 2000, 8(3): 198-206.
- [54] 卢俊培, 吴仲民. 尖峰岭热带林的植物化学特征. 林业科学研究, 1991, 4(1): 1-9.
- [55] 许宇星, 王志超, 竹万宽, 杜阿朋. 不同品种桉树林生活叶-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2018, 46(3): 95-100.