

林龄和坡位对杉桐混交林化学计量特征的影响*

樊月^{1,2} 陈志为^{1,2} 潘云龙^{1,2} 洪滔^{1,2} 苏少川³ 吴承祯⁴ 林晗^{1,2**}

¹福建农林大学林学院 福州 350002

²福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室 福州 350002

³福建省南平市建阳区林业局 建阳 354200

⁴武夷学院 南平 354300

摘要 为了解闽北山地针阔混交林的养分循环,以7-9年生不同坡位(上坡、中坡、下坡)的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)-千年桐(*Aleurites montana*)混交林的鲜叶、凋落叶及0-10 cm土壤层的养分含量为研究对象,分析不同林龄、不同坡位的碳(C)、氮(N)、磷(P)含量及化学计量比差异,探讨杉桐混交林随林龄和坡位变化的化学计量特征。结果表明:(1)两种树种C、N、P含量基本表现为叶片>凋落叶>土壤,且在3个库之间差异显著。(2)混交林叶片N含量较低、P含量较高,凋落叶N、P含量均较低,土壤C、N含量较高而P含量偏低,叶片中较高的P含量是对土壤中相应养分含量缺乏的适应策略。(3)千年桐叶片的C、N、P及杉木的N、P均表现为9年生最高,凋落叶随林龄变化与叶片完全一致;混交林土壤P含量随林龄增加而增大。(4)混交林土壤有机C含量、N含量随坡位变化表现为上坡>中坡>下坡。结合本项目组的前期研究发现,该研究区幼龄期受N和P的共同限制,而在中龄期受N限制减缓,仅受P元素的限制,表明混交林对林木的养分限制状况有一定的改善作用;结果可为我国南方地区针阔叶混交林的可持续经营提供科学依据。(图3表4参43)

关键词 千年桐;杉木;化学计量学;林龄;坡位

CLC S718.554

Effects of stand, age, and slope position on the stoichiometric characteristics of the *Cunninghamia lanceolata* - *Aleurites montana* mixed forest*

FAN Yue^{1,2}, CHEN Zhiwei^{1,2}, PAN Yunlong^{1,2}, HONG Tao^{1,2}, SU Shaochuan³, WU Chengzhen⁴ & LIN Han^{1,2*}

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

² Key Laboratory for Forest Ecosystem Processes and Management in Fujian Province, Fuzhou 350002, China

³ Jianyang Forestry Administration, Jianyang 354200, China

⁴ Wuyi University, Nanping 354300, China

Abstract To investigate the ecological stoichiometry of fresh leaves, litter, and the top soil layer (0-10 cm) in a mixed forest, a study was conducted on 7- to 9-year-old *Cunninghamia lanceolata* - *Aleurites montana* mixed forests in different slope positions (up-, mid-, and down-slope). The results showed that: (1) The carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) content in both species were highest in leaves, followed by litter, and lowest in soil, except for the leaves of *Aleurites montana*, where the content was higher in litter compared to leaves. There were significant differences in C, N, and P content of leaves, litter, and soil. (2) Leaves had a low N content and a high P content. In litter, both the N and P content were low. In soil, the C and N content were high, while the P content was low. The high P content in leaves is an adaptive strategy for lack of nutrient content in the soil. (3) The C, N, and P content were high in leaves of *Cunninghamia lanceolata*, as were the N and P content in leaves of *Aleurites montana* in 9-year-old forest stands. The content of these nutrients in the litter was consistent with the leaf content and with the change of stand age, indicating that there is a close relationship between leaves and litter. The soil P content in the mixed forest increased with an increase in stand age. (4) The soil organic C and N content were the highest in the upper slope, followed by the middle slope, and lowest in the lower slope. (5) Compared to previous studies, the 3- to 5-year-old stands in the research area were limited in both N and P. The mid-maturation forest was limited in P only. These results indicate that the mixed forest experienced some improvements regarding the nutrient limitation. Determination of the C, N, and P stoichiometric characteristics of the leaves, litter, and soil in *Cunninghamia lanceolata*-*Aleurites montana* mixed forests can provide scientific guidance for the sustainable management of coniferous and broad-leaved mixed forests in southern China.

Keywords *Aleurites montana*; *Cunninghamia lanceolata*; ecological stoichiometry; stand age; slope position

收稿日期 Received: 2018-05-21 接受日期 Accepted: 2018-06-08

*国家“十三五”重点研发计划项目(2017YFD0601304)、高校科技创新专项基金(KFA17056A)和福建农林大学校重点项目建设专项基金(6112C039N)资助 Supported by the National “13th Five-year Plan” Key R&D Program of China (2017YFD0601304), the University Science and Technology Innovation Fund (KFA17056A) and the Key Project Construction Special Fund of Fujian Agriculture and Forestry University (6112C039N)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: fjlinhan@163.com)

生态化学计量学 (Ecological stoichiometry) 是研究生态过程中多重化学元素 (主要是碳C、氮N、磷P) 与能量相互平衡的科学^[1], 为生态系统的稳定、演替及各种变化提供有利的科学依据^[2]. 森林和林地占地球陆地表面的28%, 植物叶片的脱落与分解是全球养分循环过程中的重要部分^[3]. 植物生长发育所需的养分主要来源于土壤, 植物通过光合作用固定有机物, 并且以凋落物的形式将有机物和养分供给土壤, 凋落物及其分解过程是联系植被和土壤的中转站, 通过植物—凋落物—土壤连续体进行养分循环, 这种循环机制增加了植物—凋落物—土壤系统养分含量研究的复杂性^[4]. 而生态化学计量学能更深入地揭示植物、凋落物与土壤养分比例的调控机制, 其元素相互作用变化规律可以反映森林生态系统养分循环速率和养分利用效率, 对科学合理地经营森林具有重要的意义^[5].

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国南方营造用材林的重要造林树种, 具有生长快、产量高等特点, 作为速生丰产林在闽北地区被广泛栽植^[6]. 但杉木连栽带来的产量降低、地力衰退, 加之酸雨区导致的土壤酸化等问题严重影响了林地的可持续经营. 为了改善杉木的生长状况, 加强南方林地的生态保护及可持续利用, 营造杉阔混交林是一种提高林分质量、改善土壤地力的有效途径, 例如杉木套种木荷 (*Schima superba*)、火力楠 (*Michelia macclurei*)、观光木 (*Michelia odora*) 等模式的可行性都得到了验证^[7-9]. 千年桐 (*Aleurites montana*) 是我国南方常见的乡土阔叶树种, 由于自我更新能力强、凋落物归还量大、维护地力效果好, 作为生态公益林树种在我国南方林区大力推广^[10]. 本项目组前期研究发现, 杉桐混交模式种间竞争强度随林龄增大而减小^[11], 且对土壤的理化性质有改善作用^[12], 但对杉桐混交林叶片—凋落叶—土壤连续体C、N、P化学计量特征的研究鲜见报道, 并且其元素化学计量受林龄及林地环境影响的变化特征尚不明确. 为此, 本研究对不同林龄、不同坡位的杉桐混交林叶片、凋落叶及土壤的C、N、P含量进行比较, 探讨两种树种在不同林龄、坡位影响下叶片—凋落叶—土壤的C、N、P化学计量特征, 为深入开展杉阔混交林的可持续经营制定合理的营林措施提供理论基础.

1 材料与方

1.1 研究区域与样地概况

研究区地处福建省南平市建阳区 (27°06'–27°43'N, 117°31'–118°38'E), 属中亚热带季风性湿润气候, 四季分明, 降水丰富, 气候温和. 研究区海拔范围在585–634 m之间, 年平均气温18.1 °C, 年平均降雨量1 742 mm. 土壤类型主要为黄壤、红壤. 试验地位于建阳市溪东国有林场, 其前身为低产低效马尾松人工林, 2008–2010年逐年砍伐后营造杉桐混交林, 混交比为1:1, 株行距为1.5 m × 2 m行间混交, 共28.5 hm² (表1).

1.2 样品采集与处理

2017年10月, 在建阳溪东林场的杉桐混交林中选择坡向相对一致、大小为20 m × 30 m的7、8、9年生杉桐混交林样地3块, 根据每木检尺结果, 在3块混交林样地的不同坡位处,

表1 混交林样地情况表

Table 1 The survey of the mixed stand

树种 Species	林龄 Forest age (t/a)	坡位 Slope position	平均胸径 Average breast diameter (d/cm)	平均树高 Lorey's mean height (h/m)
千年桐 <i>Aleurites montana</i>	9	上坡 Upslope	8.70	5.07
		中坡 Midslope	5.43	4.23
		下坡 Downslope	7.17	5.77
	8	上坡 Upslope	4.20	3.10
		中坡 Midslope	4.90	3.53
		下坡 Downslope	5.60	5.47
	7	上坡 Upslope	6.87	4.73
		中坡 Midslope	5.87	5.23
		下坡 Downslope	7.90	6.53
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	9	上坡 Upslope	4.23	3.80
		中坡 Midslope	6.10	4.13
		下坡 Downslope	8.30	6.27
	8	上坡 Upslope	8.50	5.57
		中坡 Midslope	11.90	5.50
		下坡 Downslope	12.20	5.67
	7	上坡 Upslope	6.40	4.20
		中坡 Midslope	7.33	6.13
		下坡 Downslope	7.30	6.17

千年桐、杉木各选择标准木3株进行样品采集.

叶片取样: 从每株个体的4个不同方向各采剪10片健康无损的成熟叶片, 均匀混合后装入已编号的信封内带回实验室. 置于105 °C烘箱内杀青30 min后, 在70 °C恒温条件下烘干至恒重, 研磨并过0.149 mm筛标记保存.

凋落叶取样: 在每个标准木下按照S型布点法收集凋落叶. 随机采集枯落叶表层干燥、发黄且新近凋落的杉木和千年桐叶片各20片后装入信封, 置于70 °C烘箱内烘干至恒重, 研磨过0.149 mm筛标记保存.

土壤取样: 在每个标准木下按照对角线布点挖取3个剖面, 采集0–10 cm表层土壤, 所取新鲜土样过筛去根后装入已编号的自封袋带回实验室自然风干, 研磨并过0.149 mm筛标记保存.

1.3 测定方法

有机碳含量测定采用重铬酸钾外加热法, 全氮含量测定采用半微量凯氏定氮法, 全磷含量测定采用钼锑钒比色法^[13].

1.4 计算和统计方法

论文中的数据取多次重复结果的平均值, 通过SPSS 19.0统计软件对杉桐混交林中两种树种的叶片、凋落叶、表层土壤C、N、P及化学计量比进行单因素方差分析, 设置为 $P = 0.05$, 并用多重比较 (Duncan's multiple comparison) 检验其相关性, 显著性水平设置为 $P = 0.05$; 本研究中所有植物和土壤数据的前期处理、统计分析在Microsoft Excel 2016和SPSS 19.0中完成, 使用Origin 9.0绘图软件进行图形绘制.

2 结果与分析

2.1 不同林龄和坡位混交林叶片C、N、P含量特征

千年桐叶片C、N、P含量均表现为9年生的最高; 杉木叶片N、P含量均表现为9年生的最高; 两种树种C:P均表现为8年生的最高 (表2). 方差分析表明林龄对杉桐混交林叶片的

表2 不同林龄和坡位混交林叶片C、N、P含量及化学计量特征

Tab 2 Foliar C, N and P contents and stoichiometry in the mixed stands of different ages and slope positions

树种 Species	林龄/坡位 Stand age/slope position	C (w/mg g ⁻¹)	N (w/mg g ⁻¹)	P (w/mg g ⁻¹)	C:N (r/%)	C:P (r/%)	N:P (r/%)
千年桐 <i>Aleurites montana</i>	9 a	389.33 ± 9.40a	10.67 ± 1.19a	1.18 ± 0.07ab	41.19 ± 6.54b	334.91 ± 23.96b	8.80 ± 0.63bc
	8 a	374.11 ± 13.36a	10.48D ± 0.52a	0.90 ± 0.03d	36.55 ± 2.40b	421.45 ± 22.32a	11.69 ± 0.48a
	7 a	377.99 ± 13.92a	10.50 ± 0.78a	1.10 ± 0.05bc	38.56 ± 4.37b	352.59 ± 25.01b	9.77 ± 0.86ab
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	9 a	451.98 ± 11.13b	9.26 ± 0.90ab	1.34 ± 0.11a	56.87 ± 11.11ab	354.39 ± 26.75b	7.15 ± 0.86c
	8 a	473.11 ± 5.90b	7.04 ± 0.87b	0.98 ± 0.03cd	76.34 ± 10.31a	484.01 ± 14.85a	7.04 ± 0.70c
	7 a	456.06 ± 8.05b	8.47 ± 0.66ab	1.02 ± 0.03bcd	56.14 ± 3.88ab	447.95 ± 15.94a	8.26 ± 0.59bc
千年桐 <i>Aleurites montana</i>	上坡 Upslope	388.91 ± 7.07BC	9.12 ± 0.79B	0.89 ± 0.03B	45.68 ± 5.56BCD	438.98 ± 14.37AB	10.40 ± 0.99AB
	中坡 Midslope	393.14 ± 9.50B	9.54 ± 0.62B	1.09 ± 0.05AB	42.94 ± 3.45CD	367.81 ± 20.13BC	8.92 ± 0.70BC
	下坡 Downslope	359.37 ± 15.85C	12.82 ± 0.36A	1.17 ± 0.06A	28.19 ± 1.43D	313.73 ± 24.19C	11.11 ± 0.48A
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	上坡 Upslope	450.23 ± 10.37A	7.80 ± 1.05B	1.02 ± 0.04AB	69.21 ± 11.74A	446.03 ± 22.42A	7.57 ± 0.95CD
	中坡 Midslope	476.37 ± 7.02A	9.10 ± 0.68B	1.12 ± 0.08A	54.53 ± 3.83ABC	440.46 ± 25.71AB	8.22 ± 0.49CD
	下坡 Downslope	454.55 ± 7.01A	7.86 ± 0.78B	1.21 ± 0.12A	65.62 ± 10.51AB	399.86 ± 31.41AB	6.66 ± 0.63D

数据为平均值 ± 标准误; 不同小写字母表示不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同坡位间差异显著 ($P < 0.05$).
Data are showed as mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant difference among different stand ages ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant difference among different slope positions ($P < 0.05$).

表3 不同林龄和坡位混交林凋落叶C、N、P含量及化学计量特征

Tab 3 Foliar litter C, N and P contents and stoichiometry in the mixed stands of different ages and slope positions

树种 Species	林龄/坡位 Stand age/slope position	C (w/mg g ⁻¹)	N (w/mg g ⁻¹)	P (w/mg g ⁻¹)	C:N (r/%)	C:P (r/%)	N:P (r/%)
千年桐 <i>Aleurites montana</i>	9 a	428.78 ± 15.00a	8.47 ± 0.87a	0.87 ± 0.06a	57.24 ± 9.13a	520.29 ± 55.43b	9.73 ± 0.78a
	8 a	394.08 ± 19.75abc	4.71 ± 0.25c	0.50 ± 0.02c	87.22 ± 9.42a	798.60 ± 53.54a	9.57 ± 0.79a
	7 a	352.71 ± 19.75c	5.33 ± 0.56bc	0.61 ± 0.02b	73.01 ± 8.91a	583.12 ± 38.15b	8.55 ± 0.67a
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	9 a	365.86 ± 12.18bc	6.76 ± 0.61ab	0.61 ± 0.02b	57.03 ± 4.58a	600.43 ± 26.20b	10.95 ± 0.75a
	8 a	427.81 ± 12.82a	5.63 ± 0.60bc	0.52 ± 0.02c	87.46 ± 13.74a	842.34 ± 54.03a	10.69 ± 0.92a
	7 a	407.75 ± 19.03ab	5.54 ± 0.67bc	0.49 ± 0.02c	81.57 ± 9.46a	837.65 ± 52.84a	11.11 ± 1.08a
千年桐 <i>Aleurites montana</i>	上坡 Upslope	413.81 ± 20.47A	5.26 ± 0.40A	0.61 ± 0.06A	81.70 ± 6.60A	713.55 ± 55.88A	9.08 ± 1.00A
	中坡 Midslope	407.64 ± 19.24AB	6.70 ± 1.18A	0.68 ± 0.08A	77.44 ± 13.57A	655.86 ± 75.56AB	9.41 ± 0.83A
	下坡 Downslope	354.13 ± 17.58B	6.54 ± 0.67A	0.69 ± 0.05A	58.33 ± 6.45A	532.60 ± 41.87B	9.36 ± 0.32A
杉木 <i>Cunninghamia lanceolata</i>	上坡 Upslope	408.42 ± 13.02AB	5.22 ± 10.39A	0.53 ± 0.02A	83.50 ± 8.65A	776.88 ± 40.01A	9.78 ± 0.75A
	中坡 Midslope	407.39 ± 20.00AB	6.18 ± 0.49A	0.55 ± 0.03A	71.42 ± 9.75A	776.67 ± 72.45A	11.37 ± 0.77A
	下坡 Downslope	385.60 ± 17.71AB	6.54 ± 0.87A	0.56 ± 0.03A	71.14 ± 13.49A	726.87 ± 64.21A	11.59 ± 1.10A

数据为平均值 ± 标准误; 不同小写字母表示不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同坡位间差异显著 ($P < 0.05$).
Data are showed as mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant difference among different stand ages ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant difference among different slope positions ($P < 0.05$).

C、P含量及C:N、C:P、N:P有极显著影响 ($P < 0.01$), 对N含量有显著影响 ($P < 0.05$).

千年桐叶片C含量随坡位变化表现为中坡>上坡>下坡, N、P含量表现为下坡>中坡>上坡; 杉木叶片C、N含量均表现为中坡>下坡>上坡, P含量表现为下坡>中坡>上坡. 千年桐叶片C:N、C:P均表现为上坡>中坡>下坡; 杉木叶片C:N表现为上坡>下坡>中坡, C:P为上坡>中坡>下坡 (表2). 方差分析表明坡位对杉桐混交林叶片的C、N含量及C:N、C:P、N:P有极显著影响 ($P < 0.01$), 对P含量有显著影响 ($P < 0.05$).

2.2 不同林龄和坡位混交林凋落叶C、N、P含量特征

千年桐凋落叶C、N、P含量均表现为9年生的最高, 这与千年桐叶片养分含量随林龄的变化规律完全一致; 杉木凋落叶N、P含量与杉木叶片一致均表现为9年生的最高; 两种树种凋落叶C:N、C:P均表现为8年生的最高 (表3). 林龄对杉桐混交林凋落叶的C、N、P含量及C:P有极显著影响 ($P < 0.01$).

千年桐凋落叶C含量随坡位变化表现为上坡>中坡>下坡, N含量表现为中坡>下坡>上坡, P含量表现为下坡>中坡>上坡; 杉木C含量随坡位的变化趋势与千年桐一致, 表

现为上坡>中坡>下坡, N、P含量均表现为下坡>中坡>上坡; 两种树种凋落叶C:N、C:P均表现为上坡>中坡>下坡 (表3). 坡位对杉桐混交林凋落叶的C含量及C:P有显著影响 ($P < 0.05$).

2.3 不同林龄和坡位混交林土壤C、N、P含量特征

杉桐混交林土壤C、N含量均表现为8年生的含量最高, 土壤P含量表现为9年生的最高; 土壤C:N、C:P均表现为8年生的最高且随林龄增加先增大后减小, N:P表现为7年生的最高 (表4). 林龄对杉桐混交林土壤C、P含量及C:N、C:P有显著影响 ($P < 0.05$), 对土壤N含量及N:P有极显著影响 ($P < 0.01$).

杉桐混交林土壤C、N含量随坡位变化表现为上坡>中坡>下坡, P含量表现为中坡>下坡>上坡; 土壤C:N、C:P均表现为上坡>中坡>下坡, N:P表现为随林龄增加先减小后增大 (表4). 坡位对杉桐混交林土壤C含量及C:N、C:P均有显著影响 ($P < 0.05$).

2.4 混交林叶片—凋落叶—土壤的化学计量特征及相关性

杉木叶片C含量及两种树种叶片N、P含量均显著高于凋

表4 不同林龄和坡位混交林土壤C、N、P含量及化学计量特征

Tab 4 Soil C, N and P contents and stoichiometry in the mixed stands of different ages and slope positions

林龄/坡位 Stand age/slope position	C (w/mg g ⁻¹)	N (w/mg g ⁻¹)	P (w/mg g ⁻¹)	C:N (r/%)	C:P (r/%)	N:P (r/%)
9 a	31.71 ± 3.09b	1.93 ± 0.10b	0.35 ± 0.03a	16.24 ± 0.96b	97.79 ± 13.36b	5.88 ± 0.48c
8 a	45.20 ± 3.75a	2.30 ± 0.07a	0.30 ± 0.01ab	20.56 ± 1.97a	158.60 ± 18.53a	8.23 ± 0.53b
7 a	37.87 ± 3.05b	2.37 ± 0.12a	0.29 ± 0.02b	16.87 ± 1.00b	138.69 ± 5.84ab	8.97 ± 0.41a
上坡 Upslope	44.90 ± 3.62A	2.33 ± 0.11A	0.28 ± 0.01A	20.10 ± 1.60A	166.58 ± 16.17A	8.86 ± 0.54A
中坡 Midslope	38.06 ± 1.97A	2.23 ± 0.08A	0.34 ± 0.02A	17.25 ± 0.77AB	121.13 ± 11.37B	7.07 ± 0.58A
下坡 Downslope	28.24 ± 3.33A	2.04 ± 0.13B	0.29 ± 0.03A	14.31 ± 1.66B	105.52 ± 12.28B	7.87 ± 0.88A

数据为平均值 ± 标准误差; 不同小写字母表示不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示不同坡位间差异显著 ($P < 0.05$)。

Data are showed as mean ± standard error. Different lowercase letters indicate significant difference among different stand ages ($P < 0.05$), and different capital letters indicate significant difference among different slope positions ($P < 0.05$).

落叶 ($P < 0.05$); 两种树种叶片C、N、P含量均表现为叶片、凋落叶极显著大于土壤 ($P < 0.01$); 两个树种的C:N、C:P均表现为凋落叶 > 叶片 > 土壤, 且在3个库之间均差异显著 ($P < 0.05$); 千年桐N:P表现为叶片 > 凋落叶 > 土壤, 杉木则表现为凋落叶 > 土壤 > 叶片。两种树种化学计量比除杉木的N:P为叶片小于土壤外, 其余均表现为叶片、凋落叶大于土壤 (图1, 图2)。

研究结果 (图3) 表明, 叶片N与P之间呈显著相关 ($R^2 = 0.082$, $P < 0.05$), N与C:N、P与C:P之间均呈极显著负相关 ($R^2 = 0.788$, $P < 0.01$; $R^2 = 0.608$, $P < 0.01$)。凋落叶N与P之间呈极显著相关 ($R^2 = 0.483$, $P < 0.01$), N与C:N、P与C:P之间均呈极显著负相关 ($R^2 = 0.666$, $P < 0.01$; $R^2 = 0.602$, $P < 0.01$)。土

壤N与P之间相关性不显著 ($R^2 = 0.017$, $P > 0.05$), 与C:N之间相关性显著 ($R^2 = 0.055$, $P < 0.05$), P与C:P之间相关性极显著 ($R^2 = 0.251$, $P < 0.01$) (图3)。

3 讨论与结论

植物体内的养分含量表征植物的营养状况, 而营养状况是土壤性质、水分供应等诸多环境因子共同作用的结果^[14]。植物叶片是植物的主要同化器官, 其养分元素含量可反映植物的生长状况与土壤的供肥能力。本研究中不同林龄杉桐混交林叶片C含量均值为420.43 mg/g, 其中杉木叶片C含量显著高于千年桐, 可能是由于千年桐为宽冠型阔叶树种, 而杉木为窄冠形针叶树种, 在混交林中具有较合理的冠层结构,

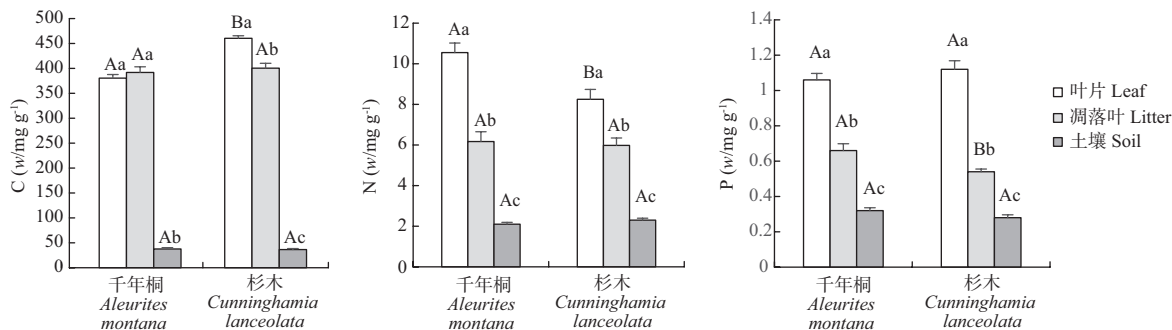


图1 两种植物叶片—凋落叶—土壤的C、N、P含量。不同大写字母表示不同树种同一组分之间差异显著, 不同小写字母表示同一树种不同组分之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 1 The concentrations of C, N and P in plants, litter and soil in the mixed stands. Different capital letters indicate significant difference among the same components in different species, and different lower case letters indicate significant difference among different components of the same species ($P < 0.05$).

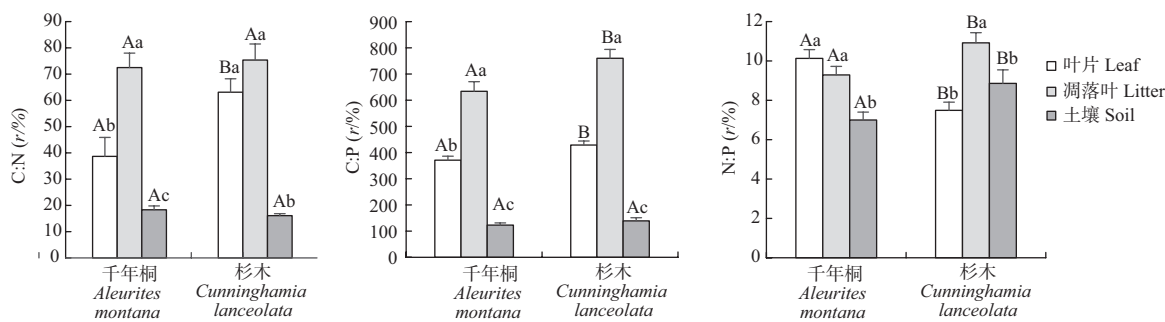


图2 两种植物叶片—凋落叶—土壤的C:N、C:P、N:P。不同大写字母代表不同树种同一组分之间差异显著, 不同小写字母代表同一树种不同组分之间差异显著 ($P < 0.05$)。

Fig. 2 The values of C:N, C:P and N:P in plants, litter and soil in the mixed stands. Different capital letters indicate significant difference among the same components in different species, and different lower case letters indicate significant difference among different components of the same species ($P < 0.05$).

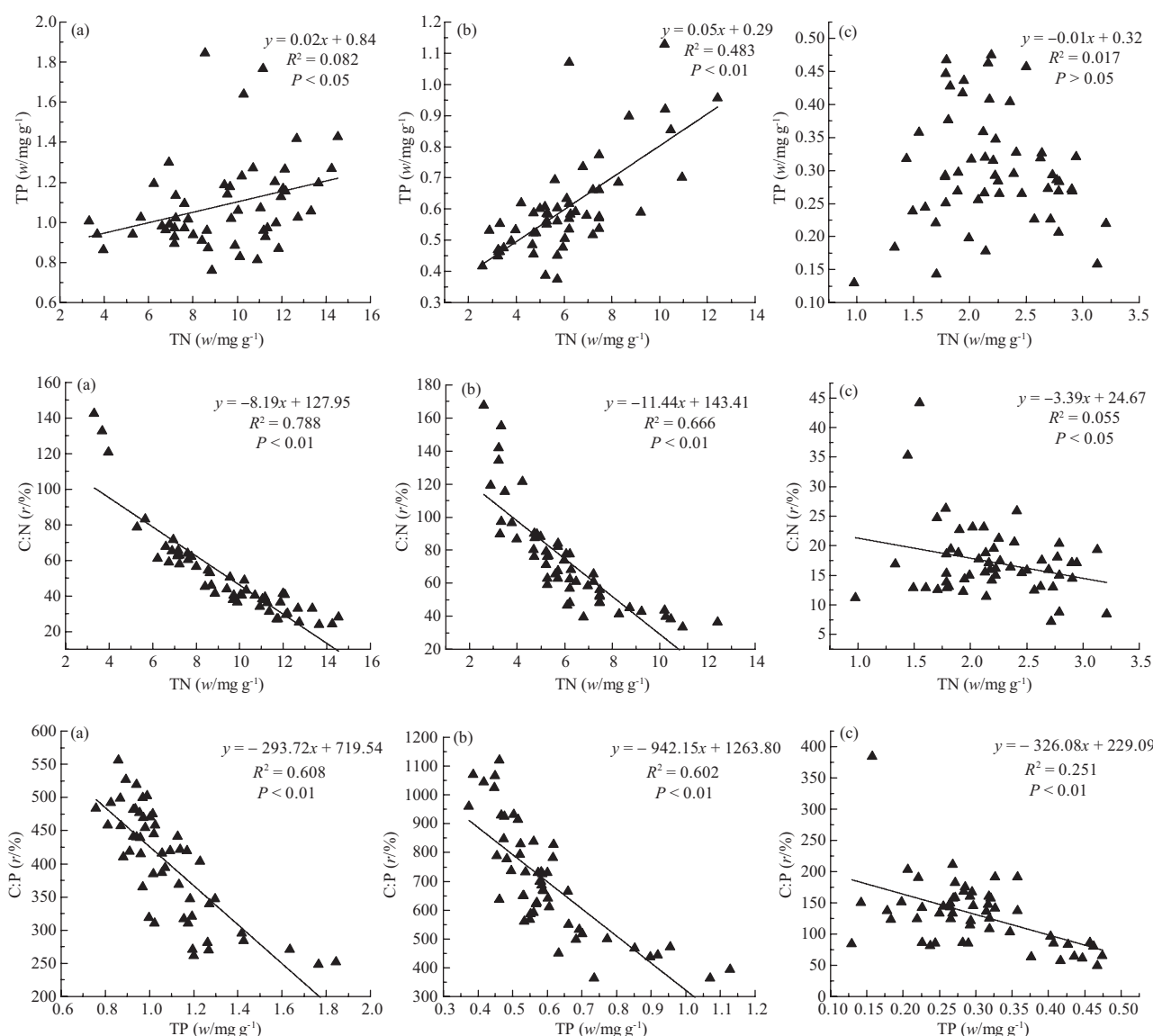


图3 混交林叶片 (a)、凋落叶 (b)、土壤 (c) 的化学计量特征. TC: 全碳; TN: 全氮; TP: 全磷.

Fig. 3 Stoichiometric characteristics of leaves (a), foliar litter (b) and soil (c) in the mixed stands. TC: Total carbon; TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus.

光合作用较强从而促进混交林叶片C的积累^[11]. 通常C在大多数植物体含量高且变异小^[15], N、P是最常见的限制性因子. 混交林中杉木叶片N含量显著低于千年桐, 两种植物叶N含量均低于Han等研究中国753种陆地植物得出的平均值 (18.6 mg/g)^[16], 也低于柯立等研究的北亚热带常绿阔叶林3种树种叶N平均值 (16.4 mg/g)^[17], 说明该研究区植物叶片N含量较低, 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氮较少, 间接导致植物叶片N含量降低^[18]. 混交林中杉木叶片P含量为1.11 mg/g, 千年桐叶片P含量为1.06 mg/g, 两种植物间P含量差异不显著, 且均高于本地区甜槠 (*Castanopsis eyrei*)、树参 (*Dendropanax dentiger*) 和老鼠矢 (*Symplocos stellaris Brand*) 3种常绿阔叶树种的叶片P含量^[17]. 千年桐叶片C:N、C:P比值均低于杉木, 且两种植物叶片C:N、C:P均值明显高于全球植物平均水平^[19], 说明该林分中植物的养分利

用效率相对较高, 显示了杉桐混交林在养分较贫瘠生境中的固碳优势. 叶片的N:P反映N和P供给状况的有效性, 可以反映植物生长的养分供应状况及限制性元素的判断. 有报道^[20]指出, 叶片N:P < 14反映植物受N限制, N:P > 16反映植物受P限制, 14 < N:P < 16表示受N、P的共同限制. 本研究结果显示, 不同林龄杉桐混交林叶的N:P比值均值 (8.68) 较小, 说明杉桐混交林植株生长受N的限制比较严重.

凋落物是主要的养分归还形式, 土壤60%-70%的营养源于凋落物, 凋落物及分解过程是植被和土壤的中转站^[3]. 本研究发现, 杉木凋落叶C含量高于千年桐, N、P含量均低于千年桐, 且两种植物凋落叶N、P含量均低于王晶苑等研究的吉林长白山温带针阔混交林凋落叶的N、P含量^[21], 而高于卢立华等研究的亚热带地区米老排 (*Mytilaria laosensis*)、马尾松 (*Pinus massoniana*)、火力楠3种林木凋落叶的N、P含量^[22], 这可能与树种构成叶片的组分含量、生理生态过程及

N、P 的转移再利用能力等特性有关。其次, 卢立华等首次明确提出凋落叶N、P含量与林木生长成正相关^[22], 故不同树种凋落叶N、P含量的差异可能与采样时间有关。此外, 气候条件对凋落叶N、P含量也会产生一定的影响。纬度较低、水热条件较好的亚热带地区凋落叶分解速率较快, 雨水的淋溶与冲刷作用加快了凋落叶中N、P元素的析出^[23], 故亚热带植物凋落叶N、P含量偏低。与叶片相比, 凋落叶C、N、P含量明显下降, 而其C:N、C:P则相对较高, 这反映出了植物对营养元素的再吸收特征, 即营养元素从衰老叶片中转移并被运输到植物其他组织的过程, 这使得营养元素在植物体内留存的时间增加, 以提供植物新的生物量生产所需的大部分养分^[24]。

土壤养分是植物生长所需营养元素的重要来源。杉桐混交林表层土壤C、N、P含量均值为37.07、2.20、0.30 mg/g, C、N含量均高于我国0-10 cm土壤平均水平^[25], 且显著高于本地区杉木纯林土壤C、N含量^[12], 表明混交林能够促进有机C和全N的释放, 使得土壤有机C和全N呈积累作用, 这与前人的研究结果^[26-27]一致。我国南方高温多雨, 土壤多呈酸性, 土壤酸化会加速土壤中铝的原生和次生矿物风化而释放出大量的铝离子, 富铝化作用使得土壤中的铁、铝活性高, 与P形成难溶性的铁磷和铝磷, 使土壤中的P绝大部分转化为固定态P, 导致绝大多数的酸性土壤都严重缺P^[28]。因而土壤P含量贫乏是我国亚热带地区土壤的普遍特征。本研究中土壤P含量显著低于我国0-10 cm土壤P含量均值^[27], 但高于本地区7-9年针阔叶混交林土壤的P含量均值^[29], 表明杉桐混交模式对土壤P含量的增加有一定的贡献作用。此外, 尽管研究区杉桐混交林土壤P含量较低, 但是其上生长的植被叶片却具有相对较高的P含量, 表明在某种养分元素贫瘠的土壤养分条件下, 植物体内仍可具有较高的相关养分含量。这与王宝荣等的研究^[30]一致, 即植物叶片某种养分含量高不能说明土壤中的相关养分供应充足, 低的土壤养分条件下植物体内仍可具有高的养分含量, 这是植物适应贫瘠养分状态的一种生存策略。反之, 土壤中某种元素供应充足也并非意味着植物体内相对养分含量较高, 如研究区土壤N含量相对偏高, 而植物叶片N含量较低, 这可能与土壤性质、植物固N能力及降水量等因素有关。两种树种的叶片、凋落叶和土壤的C、N、P含量及化学计量比中, 除杉木的N:P为土壤大于叶片外, 都表现为叶片、凋落叶显著大于土壤, 这可能是因为凋落物进入土壤转化为有机质, 在这个过程中经历了繁杂的淋溶、分解过程, 导致大量有机C、N、P被矿化^[31]。

两种树种叶片养分含量与凋落叶基本一致, 除杉木C含量外, 均表现为9年生的最高。这与王维奇等的植物—凋落物计量特征研究结果^[32]吻合, 表明植物叶片与凋落叶之间有着密切的关系。其中, 两种树种的叶片N、P含量均表现为8年生的最低, 造成这种现象的原因可能是林缘效应的影响。研究区8年生林分的位置处于7年生和9年生林分之间, 林缘气温较高, 具有较好的光温条件, 加之风会通过协助种子扩散和改变温度场来促进林缘树木发育^[33]。因此, 林缘产生的微生境梯度使得7年生和9年生林分的养分含量更高。两种植物凋落叶C:N、C:P均随林龄增加先增大后减小。总体来说, 千年桐凋落叶C、N、P含量及杉木N、P含量均表示为9年生的

大于7年、8年生的, 两种树种凋落叶C:N、C:P均表现为8年生的最高。本研究中7-9年杉桐混交林土壤N含量均值(2.20 mg/g)显著大于前期研究中3-5年生杉桐混交林土壤N含量均值(1.74 mg/g)^[12], 表明杉桐混交模式对林下土壤N元素贫瘠的状况有较大的改善作用; 土壤P含量随林龄增加而增大, 这与陈欣凡等研究的3-5年杉桐混交林土壤P含量随林龄变化的规律^[12]完全一致。

不同立地条件下的林地土壤肥力不同, 对林木的生长发育影响不同^[34]。其中, 坡位作为重要的林地因子, 代表着水热条件、养分等生态梯度变化, 与林木的生长有着密切关系^[35]。多数研究认为, 山地中雨水的冲刷作用使得上坡土壤养分流失严重, 养分随水分与重力作用影响在下坡位汇集, 故下坡土壤养分含量要高于上坡^[36-38]。如韦建宏等对不同坡位桉树(*Eucalyptus*)人工林生长和土壤理化性质进行比较, 发现不同坡位土壤的各养分含量指标大致表现为下坡>中坡>上坡^[36]。另外, 也有研究发现, 上坡由于凋落物分解速率低等原因其有机C含量要高于下坡^[39-40], 这与本研究的结果一致。本研究中, 杉桐混交林土壤有机C、N含量随坡位变化均表现为上坡>中坡>下坡。这可能是因为研究区下坡靠近路边, 枯枝落叶、球果采集等人为活动对地被层的影响导致下坡位土壤的元素含量偏低。另外, 温度对森林的土壤养分含量具有一定的控制作用, 与土壤中的部分元素含量呈正相关^[41]。中国亚热带山地地区具有较频繁的逆温现象, 地形逆温造成谷底或山坡下方的气温偏低。而上坡由于受太阳直射的作用, 温度通常较高。高温会促进土壤微生物活动, 而微生物作为生态系统的分解者和物质循环和能量交流的承担者, 是影响土壤中的养分元素的重要因素^[42]。因此, 研究区土壤元素含量表现为上坡最高。前人研究发现, 土壤的养分丰度和叶片、凋落叶养分含量的关系很复杂^[1, 30, 43]。本研究中, 千年桐叶片N、P含量及杉木叶片P含量均表现为下坡>中坡>上坡, 且千年桐凋落叶P含量及杉木凋落叶N、P与叶片相同, 均表现为下坡>中坡>上坡。两种树种叶片和凋落叶的养分元素含量整体表现为下坡>中坡>上坡, 这与土壤肥力的状况正好相反。可能是由于下坡混交林林下植物的竞争激烈所引起的, 研究区下坡混交林林下植物生长状况较好, 竞争力较强。此外, 有研究表明, 植物在营养元素供应缺乏的情况下往往具有较高的养分利用效率^[1]。研究区下坡土壤的养分含量较低, 而下坡植物相对反而具有较高的养分利用效率, 因而下坡植物叶片与凋落叶的养分含量相对较高, 这可能是植物面对土壤贫瘠养分状态的一种适应策略。

参考文献 [References]

- 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[J]. 植物生态学报, 2015, 39 (7): 682-693 [Zeng ZX, Wang KL, Liu XL, Zeng FP, Song TQ, Peng WX, Zhang H, Du H. Stoichiometric characteristics of plants, litter and soils in karst plant communities of Northwest Guangxi [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2015, 39 (7): 682-693]
- Wu YT, Liu HY, Song ZL, Yang XM, Li ZC, Hao Q, Liu LN. Ecological stoichiometry of nitrogen, phosphorous, and sulfur in China's forests [J].

- Acta Geochim*, 2017, **36**(3): 525-530
- 3 Kang HZ, Xin ZJ, Berg B, Burgess PJ, Liu QL, Liu ZC, Li ZH, Liu CJ. Global pattern of leaf litter nitrogen and phosphorus in woody plants [J]. *Ann Forest Sci*, 2010, **67** (8): 811-811
 - 4 王宸. 龙溪—虹口保护区阔叶林林区下土壤一凋落物碳氮林化学计量特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016 [Wang C. C: N: P stoichiometric characteristics of soil and litter of broad-leaved forest in Longxi-Hongkou reserve [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016]
 - 5 Danger M, Gessner MO, Bärlocher F. Ecological stoichiometry of aquatic fungi: current knowledge and perspectives [J]. *Fung Ecol*, 2016, **19**: 100-111
 - 6 林卓. 不同尺度下福建省杉木碳计量模型、预估及应用研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2016 [Lin Z. The carbon accounting models, predictions and applications for Chinese fir in Fujian province based on different scales [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2016]
 - 7 封磊, 洪伟, 吴承祯, 宋萍. 杉木-观光木人工混交林林木竞争效应研究[J]. 热带亚热带植物学报, 2008, **16** (6): 505-510 [Feng L, Hong W, Wu CZ, Song P. The tree competition effects in the artificial mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongioden odorum* [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2008, **16** (6): 505-510]
 - 8 姚甲宝, 楚秀丽, 周志春, 童建设, 王晖, 余家中. 不同养分环境下邻株竞争对木荷和杉木生长、细根形态及分布的影响[J]. 应用生态学报, 2017, **28** (5): 1441-1447 [Yao JB, Chu XL, Zhou ZC, Tong JS, Wang H, Yu JZ. Effects of neighbor competition on growth, fine root morphology and distribution of *Schima superba* and *Cunninghamia lanceolata* in different nutrient environments [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2017, **28** (5): 1441-1447]
 - 9 吴擢溪, 陈礼光, 吴擢城, 吴淑平, 陈鸿, 张宏梓. 杉木与米老排等阔叶树混交林的水源涵养功能[J]. 福建林业科技, 2017, **44** (3): 43-46 [Wu ZX, Chen LG, Wu ZC, Wu SP, Chen H, Zhang HZ. The water conservation ability of the forests of *Cunninghamia lanceolata* mixed with *Mytilaria laosensis* and other broad-leaved tree species [J]. *J Fujian For Sci Technol*, 2017, **44** (3): 43-46]
 - 10 林晗, 陈辉, 吴承祯, 洪滔, 谢安强. 千年桐与毛竹凋落叶混合分解对土壤酶活性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2012, **18** (4): 539-545 [Lin H, Chen H, Wu CZ, Hong T, Xie AQ. Effects of decomposition of *Aleurites montana* and *Phyllostachys pubescences* mixed foliage litter on activity of soil enzymes [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2012, **18** (4): 539-545]
 - 11 林晗, 吴承祯, 陈辉, 林国伟, 洪陈洁, 洪滔. 杉木-千年桐人工混交林种内种间竞争关系分析[J]. 福建林学院学报, 2014, **34** (4): 316-321 [Lin H, Wu CZ, Chen H, Lin GW, Hong CJ, Hong T. Intraspecific and interspecific competition in the mixed stands of *Cunninghamia lanceolata* and *Aleurites montana* [J]. *J Fujian Coll For*, 2014, **34** (4): 316-321]
 - 12 陈欣凡, 林国伟, 洪滔, 陈建忠, 苏少川, 洪伟, 吴承祯, 林晗. 不同林龄杉木千年桐混交林与纯林土壤理化性质特征比较[J]. 热带作物学报, 2017, **38** (9): 1660-1665 [Chen XF, Lin GW, Hong T, Chen JZ, Su SC, Hong W, Wu CZ, Lin H. Soil physical and chemical properties of *Cunninghamia lanceolata* - *Aleurites montana* mixed forest and *Cunninghamia lanceolata* pure forest with different age [J]. *Chin J Trop Crops*, 2017, **38** (9): 1660-1665]
 - 13 中国林业科学研究院林业研究所. LY/T 1271-1999 森林植物与森林枯枝落叶层全氮、磷、钾、钠、钙、镁的测定[S]//国家林业局. 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 1999: 295-297 [Chinese Academy of Forestry Research Institute of Forestry. LY/T 1271-1999 Determination of total nitrogen, phosphorus, potassium, sodium, calcium and magnesium in forest litter layers of forest plants and forests [S]//China Forestry Administration. Forest Soil Analysis Method. Beijing: Standards Press of China, 1999: 295-297]
 - 14 吴锡麟, 叶功富, 张尚炬, 林益明, 张立华. 不同海岸梯度上短枝木麻黄小枝金属元素含量及其再吸收率动态[J]. 应用与环境生物学报, 2011, **17** (5): 645-650 [Wu XL, Ye GF, Zhang SJ, Lin YM, Zhang LH. Contents of some mineral elements and their resorption efficiencies in *Casuarina equisetifolia* branchlets across a coastal gradient [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2011, **17** (5): 645-650]
 - 15 Hendrick JJ, Aber JD, Nadelhoffer KJ, Hallett RD. Nitrogen controls on fine root substrate quality in temperate forest ecosystems [J]. *Ecosystems*, 2000, **3** (1): 57-69
 - 16 Han W, Fang J, Guo D, Zhang Y. Leaf Nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China [J]. *New Phytol*, 2005, **168** (2): 377-385
 - 17 柯立, 杨佳, 余鑫, 李鹏, 徐小牛. 北亚热带常绿阔叶林三优势树种叶水平碳氮磷化学计量及季节变化特征[J]. 土壤通报, 2014, **45** (5): 1170-1174 [Ke L, Yang J, Yu X, Li P, Xu XN. Characteristics of seasonal variations and foliar C, N, P stoichiometry of three dominant trees in a subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *Chin J Soil Sci*, 2014, **45** (5): 1170-1174]
 - 18 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[J]. 植物生态学报, 2010, **34** (1): 58-63 [Wu TG, Chen BF, Xiao YH, Pan YJ, Chen Y, Jiang JH. Leaf stoichiometry of trees in three forest types in Pearl River Delta, South China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2010, **34** (1): 58-63]
 - 19 郎晨, 何兴东, 周启星. 生态系统氮磷比化学计量特征研究进展[J]. 中国沙漠, 2010, **30** (2): 296-302 [Zou W, He XD, Zhou QX. Review on N: P Stoichiometry in Ecosystem [J]. *J Des Res*, 2010, **30** (2): 296-302]
 - 20 Wright IJ, Reich PB, Westoby M, Ackerly DD, Baruch Z, Bongers F, Bares JC, Chapin T, Cornelissen JHC, Diemer M, Flexas J, Garnier E, Groom PK, Gulias J, Hikosaka K, Lamont BB, Lee T, Lee W, Lusk C, Midgley JJ, Navas ML, Niinemets U, Oleksyn J, Osada N, Poorter H, Poot P, Prior L, Pyankov VL, Roumet C, Thomas SC, Tjoelker MG, Veneklaas EJ, Villar R. The worldwide leaf economics spectrum [J]. *Nature*, 2004, **428** (6985): 821-827
 - 21 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[J]. 植物生态学报, 2011, **35** (6): 587-595 [Wang JY, Wang SQ, Li RL, Yan JH, Sha LQ, Han SJ. C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China [J]. *Chin J Plant Ecol*, 2011, **35** (6): 587-595]
 - 22 卢立华, 蔡道雄, 贾宏炎, 何日明. 南亚热带7种林分凋落叶养分含量的年动态变化[J]. 林业科学, 2009, **45** (4): 1-6 [Lu LH, Cai DX, Jia HY,

- He RM. Annual variations of nutrient concentration of the foliage litters from seven stands in the southern subtropical area [J]. *Sci Silv Sin*, 2009, **45** (4): 1-6]
- 23 黄锦学, 黄李梅, 林智超, 陈光水. 中国森林凋落物分解速率影响因素分析[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, **5** (3): 56-63 [Huang JX, Huang LM, Lin ZC, Chen GS. Controlling factors of litter decomposition rate in China's forests [J]. *J Subtrop Res Environ*, 2010, **5** (3): 56-63]
 - 24 Wardle DA, Walker LR, Bardgett RD. Ecosystem properties and forest decline in contrasting long-term chronosequences [J]. *Science*, 2004, **305** (5683): 509-513
 - 25 Tian HQ, Chen GS, Zhang C, Melillo JM, Hall CAS. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data [J]. *Biogeochemistry*, 2010, **98** (3): 139-151
 - 26 Wang QK, Wang SL, Huang Y. Comparisons of litterfall, litter decomposition and nutrient return in a monoculture *Cunninghamia lanceolata* and a mixed stand in southern China [J]. *For Ecol Manage*, 2008, **255** (3/4): 1210-1218
 - 27 肖石红, 高常军, 蔡坚, 潘文, 朱报著, 魏龙. 南亚热带杉木和红椎林及其混交林的土壤肥力[J]. 森林与环境学报, 2018, **38** (2): 142-148 [Xiao SH, Gao CJ, Cai J, Pan W, Zhu BZ, Wei L. Soil fertility of pure and mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Castanopsis hystrix* in south subtropical area [J]. *J For Environ*, 2018, **38** (2): 142-148]
 - 28 线琳, 刘国道, 郇恒福, 高玲. 施用豆科绿肥对砖红壤有效磷含量的影响[J]. 草业科学, 2011, **28** (10): 1781-1786 [Xian L, Liu GD, Huan HF, Gao L. Effects of application of the *leguminous* green manures on phosphorus content in latosol soil [J]. *Prat Sci*, 2011, **28** (10): 1781-1786]
 - 29 周丽, 张卫强, 唐洪辉, 陈伟光, 盘李军, 洗伟光. 南亚热带中幼龄针阔混交林生态化学计量特征[J]. 生态环境学报, 2014, **23** (11): 1732-1738 [Zhou L, Zhang WQ, Tang HH, Chen WG, Pan LJ, Hong WG. Ecological stoichiometry characteristics of young and middle aged conifer-broadleaved plantation in southern subtropical region [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23** (11): 1732-1738]
 - 30 王宝荣, 曾全超, 安韶山, 张海鑫, 白雪娟. 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 [Wang BR, Zeng QC, An SS, Zhang HX, Bai XJ. C: N: P stoichiometry characteristics of plants-litter-soils in two kind types of natural secondary forest on the Ziwanling region of the Loess Plateau [J]. *Acta Ecol Sin*, 2017, **37** (16): 5461-5473]
 - 31 邱岭军, 何宗明, 胡欢甜, 林宝平, 林宇, 汪凤林, 林思祖. 滨海沙地不同树种碳氮磷化学计量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23** (3): 555-559 [Qiu LJ, He ZM, Hu HT, Lin BP, Lin Y, Wang FL, Lin SZ. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen, and phosphorus in different tree species in a sandy coastal plain area [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2017, **23** (3): 555-559]
 - 32 王维奇, 仝川, 曾从盛. 不同质地湿地土壤碳、氮、磷计量学及厌氧碳分解特征[J]. 中国环境科学, 2010, **30** (10): 1369-1374 [Wang WQ, Tong C, Zeng CS. Stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus and anaerobic carbon decomposition of wetland soil of different texture[J]. *China Environ Sci*, 2010, **30** (10): 1369-1374]
 - 33 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 郭萍, 窦军霞. 云南哀牢山常绿阔叶林林缘不同热力作用面热力特征[J]. 生态学杂志, 2003, **22** (2): 74-79 [Zhang YP, Ma YX, Liu YH, GUO P, Dou JX. Thermodynamic characteristics on different thermal active surfaces near edge of ever-green broadleaved forest of Ailao Mountain[J]. *Chin J Ecol*, 2003, **22** (2): 74-79]
 - 34 刘俊, 孟雪, 高媛赟, 温小荣, 林国忠, 余光辉, 刘雪慧. 基于不同立地质量的松树林分生物量遥感估测[J]. 中南林业科技大学学报, 2016, **36** (5): 41-46 [Liu J, Meng X, Gao YY, Wen XR, Lin GZ, She GH, Liu XH. Remote sensing estimation of pine stand biomass based on different site quality [J]. *J Central South Univ For Technol*, 2016, **36** (5): 41-46]
 - 35 范叶青, 周国模, 施拥军, 董德进, 周宇峰. 坡向坡位对毛竹林生物量与碳储量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2012, **29** (3): 321-327 [Fan YQ, Zhou GM, Shi YJ, Dong DJ, Zhou YF. Relationship of slope aspect and position on biomass and carbon storage in a *Phyllostachys edulis* stand [J]. *J Zhejiang A&F Univ*, 2012, **29** (3): 321-327]
 - 36 韦建宏, 侯敏, 韦添露, 欧军. 不同坡位桉树人工林生长和土壤理化性质比较[J]. 安徽农业科学, 2017, **45** (5): 167-169 [Wei JH, Hou M, Wei TL, Ou J. Comparison on *Eucalyptus* spp. plantation growth and soil physicochemical properties in different slope position [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2017, **45** (5): 167-169]
 - 37 Sariyildiz T, Anderson JM, Kucuk M. Effects of tree species and topography on soil chemistry, litter quality, and decomposition in Northeast Turkey [J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, **37** (9): 1695-1706
 - 38 Li Y, Lindstrom MJ. Evaluating soil quality-soil redistribution relationship on terraces and steep Hillslope [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2001, **65** (5): 1500-1508
 - 39 Chen ZS, Tsui CC, Hsieh CF. Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan [J]. *Geoderma*, 2004, **123** (1-2): 131-142
 - 40 Sigua GC, Coleman SW. Spatial distribution of soil carbon in pastures with cow-calf operation: effects of slope aspect and slope position [J]. *J Soils Sed*, 2010, **10** (2): 240-247
 - 41 王芳, 宋明华, 黄玫, 张甲坤. 东北北部温带森林和干草地土壤养分分布及影响因素[J]. 生态环境学报, 2014, **23** (8): 1280-1285 [Wang F, Song MH, Huang M, Zhang JK. The spatial distribution of soil nutrients and the controlling factors of temperate forest and steppe in northeastern China [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, **23** (8): 1280-1285]
 - 42 张英洁, 靳英华, 谷晓楠, 许嘉巍, 陶岩, 贺红土, 王媛林, 刘羽霞, 牛莉平. 长白山苔原带植被变化与土壤微生物、酶活性及土壤肥力的相关性[J]. 生态学杂志, 2017, **36** (11): 3086-3093 [Zhang YJ, Jin YH, Gu XN, Xu JW, Tao Y, He HT, Wang YL, Liu YX, Niu LP. Vegetation change in relation to soil microbes, enzyme activity and soil fertility in the tundra of Changbai Mountain[J]. *Chin J Ecol*, 2017, **36** (11): 3086-3093]
 - 43 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 付姗, 胡启武. 鄱阳湖湿地优势植物叶片-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 LQ, Wu Q, Yao B, Fu S, Hu QW. Leaf litter and soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of dominant plant species in the Poyang Lake wetland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2016, **36** (7): 1898-1906]