

福建三明格氏栲天然林林窗凋落物-土壤的生态化学计量特征

冯雪萍^{1a,1b}, 刘金福^{1a,1b,①}, BUAJAN Supaporn^{1a,1b}, 何中声^{1a,1b},
江 蓝^{1a,1b}, 洪 伟^{1a,1b}, 施友文²

(1. 福建农林大学: a. 海峡自然保护区研究中心, b. 福建省高校生态与资源统计重点实验室, 福建 福州 350002;
2. 三明莘口格氏栲自然保护区管理站, 福建 三明 365000)

摘要: 在前期调查的基础上,在福建三明的格氏栲(*Castanopsis kawakamii* Hay.)天然林内划分不同尺度的林窗(大林窗、中林窗和小林窗,平均面积分别为 199.29、78.53 和 37.86 m²),并以非林窗为对照,研究林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 的生态化学计量特征,并运用冗余分析(RDA)方法探讨了凋落物-土壤生态化学计量特征之间的关联性。结果显示:大林窗的凋落物 C 含量、N 含量、C:N 比、C:P 比、C:K 比、N:P 比和 N:K 比以及土壤 C 含量、N 含量、P 含量、K 含量和 C:N 比均最高,小林窗的凋落物 P 和 K 含量以及土壤 C:P 比、C:K 比、N:P 比和 N:K 比均最高,但各尺度林窗间凋落物和土壤的 P:K 比总体差异不明显。在相同尺度林窗中,凋落物的 C、N 和 P 含量以及 C:N 比、C:P 比、C:K 比、N:K 比和 P:K 比总体上均显著高于土壤,但凋落物的 K 含量则显著低于土壤。与非林窗相比,小林窗的凋落物 P 和 K 含量以及土壤 C 含量、C:N 比、C:K 比和 N:K 比,中林窗的土壤 P 含量,大林窗的土壤 C、N 和 P 含量以及 C:N 比、C:K 比和 N:K 比均显著提高,但各尺度林窗内凋落物-土壤的其他生态化学计量特征均显著降低。RDA 分析结果显示:大林窗的凋落物 P:K 比、中林窗的凋落物 N:P 比和 P 含量以及小林窗的凋落物 P 含量对土壤肥力影响最大,而非林窗的凋落物 C、P 和 K 含量均对土壤肥力影响较大;且大林窗和中林窗的凋落物 P 含量和 N:P 比分别与土壤 P 含量和 N:P 比呈负相关,小林窗和非林窗的凋落物 P 含量和 N:P 比分别与土壤 P 含量和 N:P 比呈正相关。综合分析表明:格氏栲天然林不同尺度林窗内凋落物-土壤生态化学计量特征有较大差异,其中,大林窗的土壤肥力较高,且林窗土壤肥力主要受凋落物中 P 含量的限制。建议根据林窗内土壤 N:P 比采取适宜的施肥管理措施,以促进植物生长并丰富物种多样性。

关键词: 格氏栲; 林窗; 凋落物; 土壤肥力; 生态化学计量特征

中图分类号: Q938.1⁺3; S714 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2017)04-0018-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2017.04.03

Ecological stoichiometric characteristics of litter-soil in gap of *Castanopsis kawakamii* natural forest in Sanming of Fujian FENG Xueping^{1a,1b}, LIU Jinfu^{1a,1b,①}, BUAJAN Supaporn^{1a,1b}, HE Zhongsheng^{1a,1b}, JIANG Lan^{1a,1b}, HONG Wei^{1a,1b}, SHI Youwen² (1. Fujian Agriculture and Forestry University; a. Cross-strait Nature Reserve Research Center, b. Key Laboratory of Fujian University for Ecology and Resource Statistics, Fuzhou 350002, China; 2. Administration Station of *Castanopsis kawakamii* Nature Reserve in Xinkou of Sanming, Sanming 365000, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2017, 26(4): 18-24

Abstract: On the basis of preliminary investigation, gap of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural forest in Sanming of Fujian is divided into different scales (large, medium and small gaps, with an average area of 199.29, 78.53 and 37.86 m², respectively). And taking non-gap as the control, ecological

收稿日期: 2017-05-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31770678; 31770678); 福建省自然科学基金资助项目(2015J05051)

作者简介: 冯雪萍(1991—),女,福建顺昌人,硕士研究生,主要从事野生动植物保护与利用方面的研究。

①通信作者 E-mail: fjlf@126.com

stoichiometric characteristics of C, N, P and K of litter-soil in gap were studied, and the relationship of litter-soil with ecological stoichiometric characteristics was discussed by means of redundancy analysis (RDA). The results show that contents of C and N, ratios of C:N, C:P, C:K, N:P and N:K in litter, and contents of C, N, P and K, and C:N ratio in soil are the highest in large gap; contents of P and K in litter, and ratios of C:P, C:K, N:P and N:K in soil are the highest in small gap; but the difference in P:K ratio between litter and soil in each scale of gap is not obvious in general. In the gap with the same scale, contents of C, N and P, and ratios of C:N, C:P, C:K, N:K and P:K in litter are generally significantly higher than those in soil, but K content in litter is significantly lower than that in soil. Compared with non-gap, contents of P and K in litter, and C content, ratios of C:N, C:K and N:K in soil in small gap, P content in soil in medium gap, contents of C, N and P, and ratios of C:N, C:K and N:K in soil in large gap increase significantly, but other ecological stoichiometric characteristics of litter-soil in each scale of gap decrease significantly. RDA analysis result show that P:K ratio in litter in large gap, N:P ratio and P content in litter in medium gap, and P content in litter in small gap have the greatest effect on soil fertility, while contents of C, P, and K in litter in non-gap have a great effect on soil fertility; furthermore, P content and N:P ratio in litter are negatively correlated with those in soil in large gap and medium gap, those in litter are positively correlated with those in soil in small gap and non-gap. The comprehensive analysis shows that there are great differences in ecological stoichiometric characteristics of litter-soil among different scales of gaps of *C. kawakamii* natural forest, in which, soil fertility of large gap is high and soil fertility of gap is mainly limited by P content in litter. It is suggested that appropriate fertilization management measures should be taken according to N:P ratio in soil in gap to promote plant growth and enrich species diversity.

Key words: *Castanopsis kawakamii* Hay.; gap; litter; soil fertility; ecological stoichiometric characteristics

林窗干扰是森林演替的重要形式,可引起森林内光照强度、太阳辐射量和降水量等环境因子的变化,并导致凋落物分解与土壤养分含量的改变^[1]。凋落物作为养分贮藏库,对森林生态系统能量流动和物质循环有重要作用,其在分解过程中将C、N、P和K等养分归还土壤,构成凋落物-土壤连续体^[2]。而凋落物中C、N、P和K等养分的生态化学计量特征能反映生态进程中化学元素的限制情况,是衡量养分丰缺的重要指标^[3-4],对揭示森林养分循环和养分限制规律以及实现自然资源的可持续利用有重要意义^[5]。

格氏栲(*Castanopsis kawakamii* Hay.)是中亚热带南缘特有的常绿阔叶乔木,仅在福建、台湾、江西、广东和广西等地零星生长^[6],由于人为生境破坏和自身生物学特性的限制,格氏栲野生资源逐渐减少。在福建三明小湖地区分布有以格氏栲占优势的天然林分,该林分物种丰富,引起学者的广泛关注^[7]。研究者先后从数量生态学^[8]、枯枝落叶层碳库养分库分配^[9]、土壤有机碳与养分空间异质性^[10-11]以及林窗更新层物种竞争和生态位^[12]等方面对格氏栲种群的濒危机制进行探讨。目前,对格氏栲天然林中凋落物与土壤生态化学计量特征的关联性尚缺乏足够的了解,尤其对格氏栲天然林林窗中凋落物与土壤之间生

态化学计量特征的关系并不清楚。

目前,格氏栲天然林中幼苗自然更新能力差,种群数量呈衰退趋势,林冠层林窗数量增多。由于不同尺度林窗内微环境的水热条件不同,很大程度上造成林窗内凋落物分解和土壤理化性质的差异^[13],并影响林窗内凋落物-土壤C、N、P和K等养分的含量及其生态化学计量特征,进而影响森林养分循环、养分限制状况和林窗植物更新状况。鉴于此,作者运用化学计量学探讨格氏栲天然林中不同尺度林窗内凋落物-土壤养分含量及化学计量特征的关系,分析林窗内凋落物和土壤养分的分布格局,明确林窗养分循环规律与限制状况对格氏栲更新的影响,以期为提高格氏栲天然林的养分利用效率及其林分的更新提供基础研究数据。

1 研究区概况和研究方法

1.1 研究区概况

三明莘口格氏栲自然保护区位于福建三明小湖地区,面积近700 hm²,其地理坐标为东经117°24'~117°29'、北纬26°07'~26°12';属武夷山脉东伸支脉地带,地貌为低山丘陵,海拔250~500 m;属中亚热带

季风型气候,年均温 19.5 °C,年均降水量 1 500 mm,年均空气相对湿度 79%;土壤以红壤和暗红壤为主,凋落物层较厚,土层腐殖质层厚,水肥条件良好。

研究区群落的乔木层主要包括格氏栲、马尾松 (*Pinus massoniana* Lamb.) 和木荷 (*Schima superba* Gardn. et Champ.) 等种类;灌木层主要包括桂北木姜子 (*Litsea subcoriacea* Yang et P. H. Huang)、短尾越橘 (*Vaccinium carlesii* Dunn) 和赤楠 (*Syzygium buxifolium* Hook. et Arn.) 等种类;草本层主要包括芒萁 [*Dicranopteris pedata* (Houtt.) Nakaike]、黑莎草 (*Gahnia tristis* Nees) 和华山姜 (*Alpinia oblongifolia* Hayata) 等种类^[14-15]。

1.2 研究方法

1.2.1 林窗选取 根据前期对格氏栲天然林的调查结果,于 2014 年根据林窗尺度、形成原因以及发育期选择 9 个立地条件基本一致且具典型特征林窗,林窗间距 10 m;记录林窗的海拔、坡度和坡向等基本信息。在林窗中央垂直向上拍摄照片,采用半球面影像法^[16]计算林窗面积,林窗的最大面积为 216.72 m²,最小面积为 30.28 m²;依据林窗面积(A),将 9 个林窗分为大 ($A \geq 100 \text{ m}^2$)、中 ($50 \leq A < 100 \text{ m}^2$) 和小 ($30 \leq A < 50 \text{ m}^2$) 3 类林窗,每类林窗 3 个,其中,大林窗平均面积 199.29 m²,中林窗平均面积 78.53 m²,小林窗平均面积 37.86 m²。在林窗边缘 10 m 处设置面积 15 m×15 m 的非林窗为对照,共 10 个样地。

1.2.2 凋落物收集与处理 在各林窗和非林窗的中心点、北、东北、东、东南、南、西南、西和西北 9 个方位收集地表层凋落物,并在同一取样位置将地表剩余凋落物剔除干净,收集表层土壤(0~10 cm);每个方位的凋落物和表层土壤分别收集 1 kg,用自封袋封装并贴上标签后带回实验室。将凋落物置于 70 °C 烘箱

(上海精密仪器仪表有限公司)中烘干至恒质量,粉碎后过 100 目筛;土壤则置于荫蔽通风处自然风干,粉碎后过 40 目筛,分别用于 C、N、P 和 K 含量的测定。

1.2.3 元素含量测定 凋落物和土壤的 C 和 N 含量用 Vario MAX CN 分析仪(德国 Elementar 公司)测定;凋落物 P 含量用全自动连续流动分析仪(德国 Seal 公司)测定,土壤 P 含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法^{[17]76-78}测定;凋落物 K 含量采用火焰光度法^{[17]270-271}测定,土壤 K 含量采用 NaOH 熔融-火焰光度计法^{[17]101-103}测定。各指标均重复测定 3 次。根据各指标测定结果计算 C:N 比、C:P 比、C:K 比、N:P 比、N:K 比和 P:K 比。

1.3 数据统计和分析

采用 EXCEL 2007 软件对实验数据进行统计;采用 SPSS 18.0 软件对数据进行描述性统计和单因素方差分析,并采用 DPS 7.0 软件进行多重比较;采用 Canoco 5.0 软件对不同尺度林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 的生态化学计量特征进行冗余分析(RDA)。

2 结果和分析

2.1 不同尺度林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 含量的比较

格氏栲天然林不同尺度林窗内凋落物-土壤养分含量的比较结果见表 1。由表 1 可见:大林窗的凋落物 C 含量显著 ($P < 0.05$) 高于中林窗和小林窗,而其 N 含量则显著高于中林窗;小林窗的凋落物 P 和 K 含量显著高于大林窗和中林窗。大林窗的土壤 C、N 和 P 含量均显著高于中林窗和小林窗,大林窗和中

表 1 福建三明格氏栲天然林不同尺度林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 含量的比较 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Comparison on contents of C, N, P, and K in litter-soil in different scales of gaps of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural forest in Sanming of Fujian ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

样地 ²⁾ Plot ²⁾	C 含量/g · kg ⁻¹ C content		N 含量/g · kg ⁻¹ N content		P 含量/g · kg ⁻¹ P content		K 含量/g · kg ⁻¹ K content	
	凋落物 Litter	土壤 Soil	凋落物 Litter	土壤 Soil	凋落物 Litter	土壤 Soil	凋落物 Litter	土壤 Soil
LG	114.67±28.40Aa	27.00±8.04Ba	3.67±0.49Aa	2.37±0.48Ba	0.21±0.08Ab	0.21±0.06Aa	4.43±0.71Bb	15.18±4.18Aa
MG	104.66±19.03Ab	19.73±4.92Bc	3.41±0.61Ab	2.02±0.31Bc	0.20±0.06Ab	0.18±0.08Bb	4.60±0.66Bb	15.01±4.03Aa
SG	98.58±22.92Ac	24.64±6.86Bb	3.52±0.70Aab	2.27±0.43Bb	0.24±0.06Aa	0.13±0.05Bc	4.81±0.79Ba	10.84±3.74Ab
NG	110.97±15.60Aab	22.22±8.09Bc	3.61±0.46Aab	2.17±0.46Bbc	0.21±0.08Ab	0.12±0.04Bc	4.34±0.60Bb	15.82±4.00Aa

1) 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示凋落物和土壤间同一元素含量差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference of the same element content between litter and soil ($P < 0.05$).

2) LG: 大林窗 Large gap (199.29 m²); MG: 中林窗 Medium gap (78.53 m²); SG: 小林窗 Small gap (37.86 m²); NG: 非林窗 Non-gap.

林窗的土壤 K 含量显著高于小林窗。在大林窗、中林窗、小林窗和非林窗中,凋落物 C 和 N 含量均显著高于土壤,但凋落物 K 含量则显著低于土壤;在中林窗、小林窗和非林窗中,凋落物 P 含量显著高于土壤,但大林窗的凋落物 P 含量与土壤 P 含量间则无显著 ($P>0.05$) 差异。

由表 1 还可见:与非林窗相比,小林窗的凋落物 C 含量显著降低,但其 P 和 K 含量则显著升高;大林窗和小林窗的土壤 C 含量、大林窗的土壤 N 含量、大林窗和中林窗的土壤 P 含量均显著升高,而小林窗的土壤 K 含量则显著降低。

2.2 不同尺度林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 化学计量比的比较

格氏栲天然林不同尺度林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 的化学计量比见表 2。由表 2 可见:大林窗和中林窗的凋落物 C:N 比显著高于小林窗,大林窗的凋落物 C:P 比、C:K 比、N:P 比和 N:K 比均显著高于中林窗和小林窗,大林窗和小林窗的凋落物 P:K

比则显著高于中林窗。大林窗的土壤 C:N 比显著高于中林窗和小林窗,且小林窗的土壤 C:N 比显著高于中林窗;小林窗的土壤 C:P 比、N:P 比、C:K 比和 N:K 比均显著高于大林窗和中林窗,且大林窗的土壤 C:K 比和 N:K 比显著高于中林窗。土壤 N:P 比从大到小依次为 20.09 (小林窗)、19.46 (非林窗)、14.51 (中林窗) 和 12.37 (大林窗)。除小林窗的土壤 N:P 比显著高于其凋落物的 N:P 比以及非林窗的凋落物 N:P 比与其土壤的 N:P 比无显著差异外,在同一尺度的样地中凋落物的 C:N 比、C:P 比、C:K 比、N:K 比和 P:K 比均显著高于土壤。

由表 2 还可见:与非林窗相比,小林窗的凋落物 C:N 比显著降低,中林窗和小林窗的凋落物 C:P 比、C:K 比、N:P 比和 N:K 比均显著降低,且中林窗的凋落物 P:K 比也显著降低;大林窗和小林窗的土壤 C:N 比、C:K 比和 N:K 比显著升高,大林窗和中林窗的土壤 C:P 比和 N:P 比则显著降低,林窗和非林窗的土壤 P:K 比无显著性差异。

表 2 福建三明格氏栲天然林不同尺度林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 化学计量比的比较 ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 2 Comparison on stoichiometric ratios of C, N, P, and K in litter-soil in different scales of gaps of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural forest in Sanming of Fujian ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

样地 ²⁾ Plot ²⁾	C:N 比 C:N ratio		C:P 比 C:P ratio		C:K 比 C:K ratio	
	凋落物 Litter	土壤 Soil	凋落物 Litter	土壤 Soil	凋落物 Litter	土壤 Soil
LG	31.34±3.88Aa	11.22±1.47Ba	623.59±157.38Aa	140.15±28.41Bb	26.95±7.43Aa	2.03±0.99Bb
MG	30.97±4.17Aa	9.70±1.14Bc	562.07±186.79Ab	144.55±62.98Bb	23.57±6.66Ab	1.43±0.51Bc
SG	27.87±4.63Ab	10.75±1.59Bb	425.87±136.59Ac	217.09±23.12Ba	21.96±8.48Ab	2.71±1.41Ba
NG	30.83±3.05Aa	9.91±1.46Bc	619.38±32.44Aa	197.05±17.32Ba	26.45±6.87Aa	1.49±0.64Bc

样地 ²⁾ Plot ²⁾	N:P 比 N:P ratio		N:K 比 N:K ratio		P:K 比 P:K ratio	
	凋落物 Litter	土壤 Soil	凋落物 Litter	土壤 Soil	凋落物 Litter	土壤 Soil
LG	19.77±7.96Aa	12.37±4.08Bb	0.85±0.20Aa	0.18±0.07Bb	0.05±0.02Aa	0.01±0.00Ba
MG	18.21±5.72Ab	14.51±7.30Bb	0.76±0.19Ab	0.14±0.04Bc	0.04±0.01Ab	0.01±0.00Ba
SG	15.17±4.08Bc	20.09±3.52Aa	0.78±0.27Ab	0.24±0.09Ba	0.05±0.03Aa	0.01±0.00Ba
NG	20.19±7.40Aa	19.46±6.90Aa	0.86±0.22Aa	0.14±0.04Bc	0.05±0.02Aa	0.01±0.00Ba

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant difference ($P<0.05$); 同行中不同的大写字母表示凋落物和土壤间同一元素含量差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference of the same element content between litter and soil ($P<0.05$).

²⁾ LG: 大林窗 Large gap (199.29 m²); MG: 中林窗 Medium gap (78.53 m²); SG: 小林窗 Small gap (37.86 m²); NG: 非林窗 Non-gap.

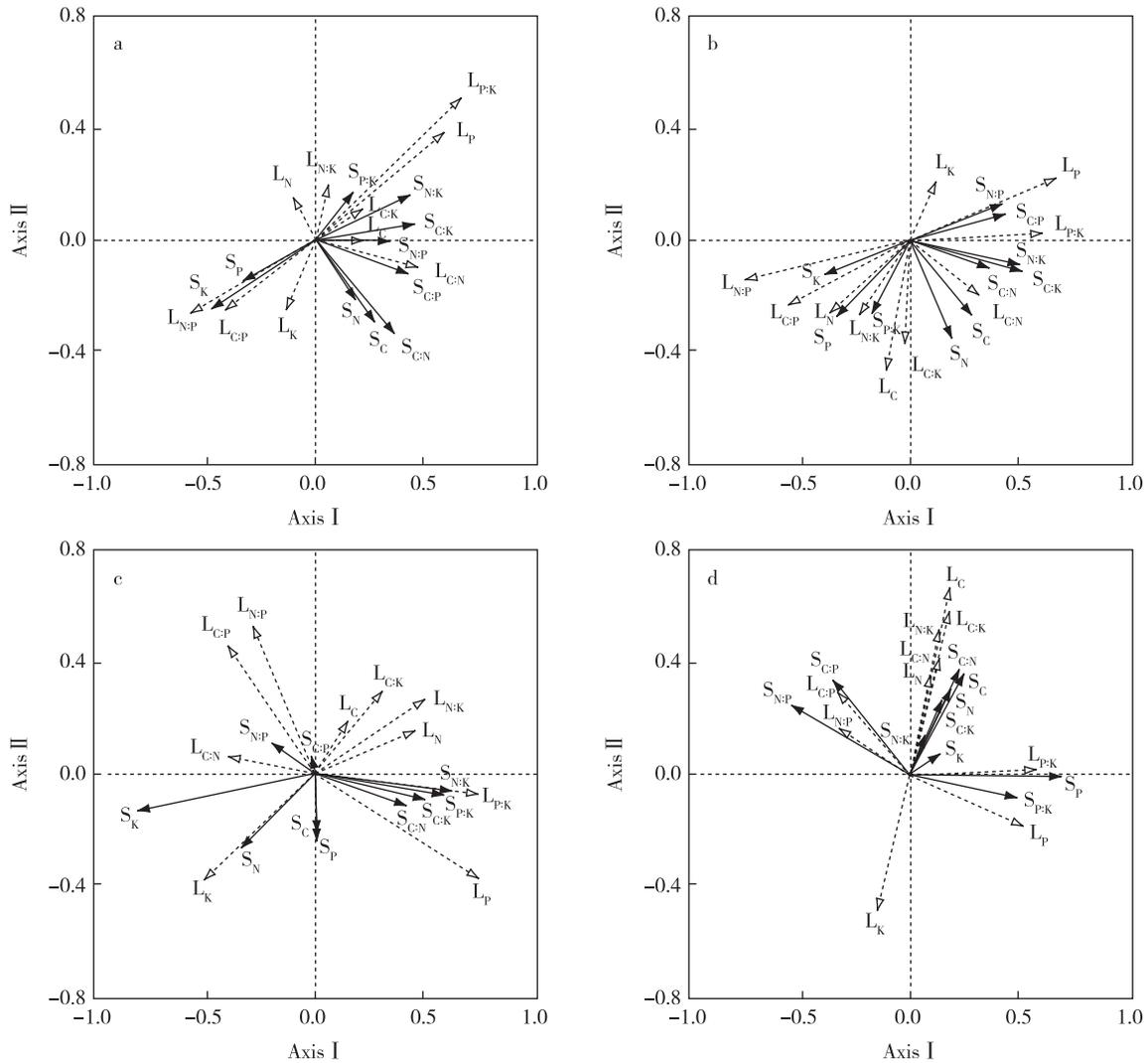
2.3 不同尺度林窗内凋落物-土壤的生态化学计量特征的关联性分析

对格氏栲天然林不同尺度林窗内凋落物-土壤的生态化学计量特征的关联性进行冗余分析 (RDA), 结果见图 1。

由图 1-a 可见:在大林窗的 RDA 二维图上,其第

I 轴和第 II 轴凋落物因子能累积解释 16.89% 的土壤生态化学计量特征变异。其中,凋落物 P:K 比对土壤肥力影响最大,其次是凋落物 P 含量和 N:P 比,且凋落物 N 含量、P 含量和 N:P 比分别与土壤 N 含量、P 含量和 N:P 比呈负相关。

由图 1-b 可见:在中林窗的 RDA 二维图上,其第



----▷: 凋落物的各项指标 All indexes of litter; —▶: 土壤的各项指标 All indexes of soil. L_C, L_N, L_P, L_K : 分别为凋落物的 C、N、P 和 K 含量 Contents of C, N, P, and K in litter, respectively; $L_{C:N}, L_{C:P}, L_{C:K}, L_{N:P}, L_{N:K}, L_{P:K}$: 分别为凋落物的 C:N 比、C:P 比、C:K 比、N:P 比、N:K 比和 P:K 比 Ratios of C:N, C:P, C:K, N:P, N:K, and P:K in litter, respectively. S_C, S_N, S_P, S_K : 分别为土壤的 C、N、P 和 K 含量 Contents of C, N, P, and K in soil, respectively; $S_{C:N}, S_{C:P}, S_{C:K}, S_{N:P}, S_{N:K}, S_{P:K}$: 分别为土壤的 C:N 比、C:P 比、C:K 比、N:P 比、N:K 比和 P:K 比 Ratios of C:N, C:P, C:K, N:P, N:K, and P:K in soil, respectively.

a: 大林窗 Large gap (199.29 m²); b: 中林窗 Medium gap (78.53 m²); c: 小林窗 Small gap (37.86 m²); d: 非林窗 Non-gap.

图 1 福建三明格氏栲天然林不同尺度林窗内凋落物-土壤 C、N、P 和 K 生态化学计量特征的冗余分析 (RDA) 二维图
 Fig. 1 Two-dimensional graph of redundancy analysis (RDA) on ecological stoichiometric characteristics of C, N, P, and K in litter-soil in different scales of gaps of *Castanopsis kawakamii* Hay. natural forest in Sanming of Fujian

I 轴和第 II 轴凋落物因子能累积解释 18.73% 的土壤生态化学计量特征变异。其中,凋落物 N:P 比和 P 含量对土壤肥力影响最大,且凋落物 P 含量和 N:P 比与土壤 P 含量和 N:P 比呈负相关,凋落物 N 含量与土壤 N 含量无相关性。

由图 1-c 可见:在小林窗的 RDA 二维图上,其第 I 轴和第 II 轴凋落物因子能累积解释 21.87% 的土壤

生态化学计量特征变异。其中,凋落物 P 含量对土壤肥力的影响最大,且凋落物 P 含量和 N:P 比分别与土壤 P 含量和 N:P 比呈正相关,凋落物 N 含量与土壤 N 含量呈负相关。

由图 1-d 可见:在非林窗的 RDA 二维图上,其第 I 轴和第 II 轴凋落物因子能累积解释 20.32% 的土壤生态化学计量特征变异。其中,凋落物 C 含量、P 含

量和K含量对土壤肥力影响较大,且凋落物N含量、P含量和N:P比分别与土壤N含量、P含量和N:P比呈正相关。

综合分析结果显示:在格氏栲天然林不同尺度林窗内,土壤肥力主要受凋落物中P元素的限制,大林窗和中林窗的凋落物P含量和N:P比与土壤P含量和N:P比呈负相关,小林窗和非林窗的凋落物P含量和N:P比分别与土壤P含量和N:P比呈正相关。

3 讨论和结论

林窗在森林循环更新中具有重要作用,林窗的大小直接或间接影响凋落物的分解,使不同尺度林窗内的凋落物-土壤养分含量差异较大。在本文调查的格氏栲天然林中,大林窗的凋落物C含量显著高于中林窗和小林窗,N含量显著高于中林窗,这与Zhang等^[18]的研究结果一致,均显示中林窗和小林窗内凋落物层厚、保水能力强,凋落物中有机碳、铵态氮与硝态氮容易被水溶解。格氏栲天然林的大林窗、中林窗和非林窗的凋落物P和K含量显著低于小林窗,是由于在该林分的小林窗中凋落物P和K正处于元素“富集”过程,而大林窗、中林窗和非林窗中凋落物P和K则处于元素“释放”过程^[19]。林窗越大则光照强度与光照时间明显增加,植物种类多样,使凋落物类型和根系分泌物趋于丰富,为土壤提供了大量的营养物质^[20-21],因此,格氏栲天然林大林窗的土壤C、N和P含量均显著高于该林分的中林窗、小林窗和非林窗,而He等^[22]的研究结果表明:中林窗土壤N和C含量均显著高于大林窗和小林窗,且非林窗的土壤P含量显著低于大林窗、中林窗和小林窗,二者的研究结果有差异,这可能与林窗面积、林窗位置和取样季节等有关。凋落物是土壤养分的主要来源之一,在凋落物中C和N多以有机态存在,释放慢^[23];而K多以离子态存在,且多受淋溶作用影响,归还快^[24],导致格氏栲天然林林窗的凋落物C和N含量均显著高于土壤,其K含量则显著低于土壤。P是一种沉积性元素,林窗尺度对P含量的影响不一致,因而各林窗的凋落物和土壤P含量的变化也不一致。总体上看,在格氏栲天然林中,大林窗的凋落物C含量以及土壤C、N和P含量均显著高于中林窗和小林窗,大林窗的凋落物N含量显著高于中林窗,表明大林窗土壤肥力较高。

研究结果显示:在供试的格氏栲天然林中,大林窗、中林窗和非林窗的凋落物C:N比显著高于小林窗,而凋落物C:P比、C:K比、N:P比和N:K比则表现为大林窗和非林窗显著高于中林窗和小林窗;土壤C:N比表现为大林窗显著高于中林窗、小林窗和非林窗,土壤C:P比和N:P比表现为小林窗和非林窗显著高于大林窗和中林窗。在凋落物C、N和P含量的动态变化过程中,任何1个元素的稀缺或过量必将导致另2个元素的积累或消耗^[25],即大林窗内P元素稀缺,则C和N含量较高(C:N比上升)^[26];而土壤C:N比越低说明土壤有机层N的有效性越高^[27],表明格氏栲天然林的大林窗内的土壤中可供植物吸收的有效N含量较低。土壤C:P比和N:P比越低通常说明P的有效性越高^[28],表明格氏栲天然林的大林窗和中林窗内土壤的有效P含量较高,N有效性较低,而小林窗和非林窗则具有相反的规律,与刘聪等^[29]的研究结果一致,均表明大林窗和中林窗的形成导致部分N和P淋失的损失,而小林窗由于面积小,还不足以导致土壤N和P的淋失。Koerselman等^[30]认为,相对于其他化学计量特征,植物的N:P比有更敏感的指示功能,若N:P比小于14,则植物的生长易受N限制;若N:P比为14~16,则植物的生长受N和P共同限制;若N:P比大于16,则植物的生长受P限制。在格氏栲天然林中,小林窗和非林窗的土壤N:P比分别为20.09和19.46,显示植物的生长受P限制;中林窗的土壤N:P比为14.51,显示植物的生长受N和P共同限制;大林窗的土壤N:P比为12.37,显示植物的生长受N限制。说明在小林窗和非林窗内施用P肥,能促进植物生长,增加林窗内的物种多样性;同时施用适量N肥和P肥,可促进中林窗内的植物生长;在大林窗内则应施用N肥,以促进喜N植物生长,增加林窗内的物种多样性。

冗余分析(RDA)结果显示:格氏栲天然林中大林窗和中林窗的凋落物P含量和N:P比分别与土壤P含量和N:P比呈负相关,这与大中型林窗内光照、水分、温度和湿度等环境因子存在较大异质性^[31]有关,凋落物的养分难以进入土壤,土壤中的P元素可能主要来源于周围根系的补充;而小林窗和非林窗内的微环境气候因子异质性较小,凋落物分解后的养分多进入土壤,因此,小林窗和非林窗内的凋落物P含量和N:P比分别与土壤P含量和N:P比呈正相关,这在一定程度上佐证了格氏栲天然林不同尺度林窗

内的植物生长均受 P 含量的限制。

由于本研究涉及的林分面积和林窗数量有限, 研究结果存在一定的局限性, 后续有待于扩大林分或林窗的面积并选择更多类型的林窗, 以进一步明确林窗凋落物与土壤之间的相互作用及生态化学计量特征, 并依据养分在生态系统中的循环途径深入探讨凋落物-土壤-植物循环体 C、N、P 和 K 的生态化学计量特征。

参考文献:

- [1] 何中声, 刘金福, 郑世群, 等. 林窗对格氏栲天然林更新层物种多样性和稳定性的影响[J]. 植物科学学报, 2012, 30(2): 133-140.
- [2] HÄTTENSCHWILER S, TIUNOV A V, SCHEU S. Biodiversity and litter decomposition in terrestrial ecosystems[J]. Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics, 2005, 36: 191-218.
- [3] 左巍, 贺康宁, 田赟, 等. 青海高寒区不同林分类型凋落物养分状况及化学计量特征[J]. 生态学杂志, 2016, 35(9): 1-8.
- [4] ELSER J J, URABE J. The stoichiometry of consumer-driven nutrient recycling: theory, observations, and consequences [J]. Ecology, 1999, 80: 735-751.
- [5] 曾德慧, 陈广生. 生态化学计量学: 复杂生命系统奥秘的探索[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 1007-1019.
- [6] 刘金福, 于玲, 洪伟, 等. 格氏栲林窗物种多样性动态规律的研究[J]. 林业科学, 2003, 39(6): 159-164.
- [7] 刘金福, 洪伟, 樊后保, 等. 天然格氏栲林乔木层种群间关联性研究[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 117-123.
- [8] 刘金福, 洪伟, 李家和. 格氏栲种群生态学研究Ⅲ. 格氏栲种群优势度增长动态规律研究[J]. 应用生态学报, 1998, 9(5): 453-457.
- [9] 杨玉盛, 郭剑芬, 林鹏, 等. 格氏栲天然林与人工林粗木质残体碳库及养分库[J]. 林业科学, 2005, 41(3): 7-11.
- [10] 刘金福, 苏松锦, 何中声, 等. 格氏栲天然林土壤有机碳空间分布及其影响因素[J]. 山地学报, 2011, 29(6): 641-648.
- [11] 苏松锦, 刘金福, 何中声, 等. 格氏栲天然林土壤养分空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(18): 5673-5682.
- [12] 何中声, 刘金福, 吴彩婷, 等. 林窗对格氏栲天然林更新层物种竞争的影响[J]. 山地学报, 2012, 30(2): 165-171.
- [13] 张艳, 张丹桔, 张健, 等. 马尾松人工林林窗大小对两种凋落叶难降解物质含量的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(8): 785-796.
- [14] 刘金福, 何中声, 洪伟, 等. 濒危植物格氏栲保护生态学进展[J]. 北京林业大学学报, 2011, 33(5): 136-143.
- [15] 何中声, 刘金福, 郑世群, 等. 格氏栲天然林林窗边界木特征研究[J]. 福建林学院学报, 2011, 31(3): 207-211.
- [16] 胡理乐, 李俊生, 吴晓蕾, 等. 林窗几何特征的测定方法[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1911-1919.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] ZHANG Q, ZAK J C. Effects of gap size on litter decomposition and microbial activity in a subtropical forest[J]. Ecology, 1995, 76: 2196-2204.
- [19] BERG B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils[J]. Forest Ecology and Management, 2000, 133: 13-22.
- [20] GRAY A N, SPIES T A, EASTER M J. Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests [J]. Canadian Journal of Forest Research, 2002, 32: 332-343.
- [21] 马瑞丰, 刘金福, 张广帅, 等. 格氏栲林土壤生态化学计量和微生物群落特征及其关联性分析[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(1): 19-27.
- [22] HE Z, LIU J, SU S, et al. Effects of forest gaps on soil properties in *Castanopsis kawakamii* nature forest [J]. PLoS One, 2015, 10: e0141203.
- [23] 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: 139-151.
- [24] 李海涛, 于贵瑞, 李家永, 等. 井冈山森林凋落物分解动态及磷、钾释放速率[J]. 应用生态学报, 2007, 18(2): 233-240.
- [25] MANZONI S, TROFYMOW J A, JACKSON R B, et al. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter[J]. Ecological Monographs, 2010, 80: 89-106.
- [26] 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[J]. 植物生态学报, 2010, 34(1): 2-6.
- [27] 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.
- [28] STERNER R W, ELSER J J. Ecological Stoichiometry: the Biology of Elements from Molecules to the Biosphere [M]. Princeton: Princeton University Press, 2002.
- [29] 刘聪, 朱教君, 吴祥云, 等. 辽东山区次生林不同大小林窗土壤养分特征[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(1): 79-81.
- [30] KOERSELMAN W, MEULEMAN A F M. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation [J]. Journal of Applied Ecology, 1996, 33: 1441-1450.
- [31] 管云云, 费菲, 关庆伟, 等. 林窗生态学研究进展[J]. 林业科学, 2016, 52(4): 91-99.

(责任编辑: 郭严冬)