马尾松人工林林窗边缘效应对油樟化学计量特征的影响

宋思梦¹ 张丹桔^{1,2} 张健^{1,2*} 杨万勤^{1,2} 张艳¹ 周扬¹ 李勋¹

¹四川农业大学生态林业研究所, 华西雨屏区生态环境监测站, 成都 611130; ²四川省长江上游生态安全协同创新中心, 成都 611130

摘要 马尾松(*Pinus massoniana*)是长江上游低山丘陵区退耕还林的一个主要造林树种。为了解林窗调控下, 马尾松人工林更新优势种在化学计量特征水平上受边缘效应的影响, 该文选取四川省宜宾市高县马尾松人工林人工砍伐形成的7种面积不等的林窗, 以林下为对照, 分析了人工更新优势植物油樟(*Cinnamomum longepaniculatum*)叶片化学计量特征及其季节动态。结果表明: 马尾松人工林林下与不同面积林窗边缘相比, 不同季节各林窗边缘油樟叶片碳(C)含量、碳氮比(C:N)和碳磷比(C:P)均显著高于林下。随着林窗面积增大, 油樟叶片C含量、C:N、C:P和N:P均先升后降, 在中型林窗(400–900 m²)边缘出现最大值。从春季到冬季, 油樟叶片N、P含量显著下降后上升, C:N和C:P显著上升后下降, 均在夏季有拐点。夏秋季林窗边缘油樟对养分吸收利用优于春冬季, 边缘效应更显著。主成分分析结果显示, 马尾松人工林不同大小林窗边缘油樟化学计量特征主要受林窗面积、相对光强及月平均气温影响。研究结果表明: 625 m²林窗边缘油樟有机质储存及养分利用效率在不同季节均有最大值, 在化学计量特征水平上具有更显著的边缘效应。

关键词 林窗大小; 边缘效应; 化学计量学; 油樟; 马尾松人工林

引用格式: 宋思梦, 张丹桔, 张健, 杨万勤, 张艳, 周扬, 李勋 (2017). 马尾松人工林林窗边缘效应对油樟化学计量特征的影响. 植物生态学报, 41, 1081–1090. doi: 10.17521/cjpe.2016.0393

Edge effects of forest gap in *Pinus massoniana* plantations on the ecological stoichiometry of *Cinnamomum longepaniculatum*

SONG Si-Meng¹, ZHANG Dan-Ju^{1,2}, ZHANG Jian^{1,2*}, YANG Wan-Qin^{1,2}, ZHANG Yan¹, ZHOU Yang¹, and LI Xun¹

¹Monitoring Station for Eco-environments in the Rainy Zone of Southwest China, Institute of Ecology & Forestry, Sichuan Agriculture University, Chengdu 611130, China; and ²Collaborative Innovation Center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Chengdu 611130, China

Abstract

Aims *Pinus massoniana* is one of the major plantation tree species in the low hilly lands along the upper reaches of the Yangtze River Valley in China's "Grain for Green" project. The objective of this study was to explore the edge effects of forest gap on the ecological stoichiometry of dominant tree species in a *P. massoniana* plantation forest.

Methods We collected *Cinnamomum longepaniculatum* leaves in a 39-year-old *P. massoniana* plantation forest with seven forest gap sizes (G1: 100 m²; G2: 225 m²; G3: 400 m²; G4: 625 m²; G5: 900 m²; G6: 1 225 m²; G7: 1 600 m², and the control: closed canopy) located in Gao County, south Sichuan Province during different seasons. The contents of C, N and P in leaves were measured, and the effects of edges, seasons and their interaction on leaf C, N and P contents and C:N:P stoichiometry were evaluated.

Important findings The leaf C content, C:N and C:P of *C. longepaniculatum* at the edge of forest gaps in different seasons were all significantly higher than those of understory plants in *P. massoniana* plantation. With increasing size of forest gaps, leaf C content and C:N ratio, C:P and N:P of *C. longepaniculatum* increased initially and then decreased with the maximum at medium size (400–900 m²). From spring to winter, leaf N and P contents of *C. longepaniculatum* increased after an obvious decrease; and the C:N and C:P increased first but then decreased. However, the inflection point all appeared in the summer. The nutrient utilization of *C. longepaniculatum* at the edge of forest gaps was more efficient in summer and autumn than in spring and winter, indicating significant edge effects. The results of principal component analysis (PCA) suggested that gap size, relative light intensity and monthly average air temperature were the main environmental factors affecting the stoichiometry of *C.*

收稿日期Received: 2016-12-22 接受日期Accepted: 2017-08-26

* 通信作者Author for correspondence (E-mail: sicauzhangjian@163.com)

longepaniculatum at the different edge of forest gaps in the *P. massoniana* plantation. These results indicated that forest gap with size 625 m² had the highest organic matter storage and nutrient utilization efficiency in the edge areas in all seasons, and therefore had the most significant edge effect on leaf element stoichiometry.

Key words gap size; edge effect; stoichiometry; *Cinnamomum longepaniculatum*; *Pinus massoniana* plantation

Citation: Song SM, Zhang DJ, Zhang J, Yang WQ, Zhang Y, Zhou Y, Li X (2017). Edge effects of forest gap in *Pinus massoniana* plantations on the ecological stoichiometry of *Cinnamomum longepaniculatum*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 1081–1090. doi: 10.17521/cjpe.2016.0393

林窗作为森林中普遍存在的一种重要的干扰方式(Dupuy & Chazdon, 2008), 在微地形、小气候及土壤理化性质等方面有着异于林下的特殊生境(宋小艳等, 2014)。同时, 在林窗与森林结合部位构成林窗边缘区(Restrepo *et al.*, 1999)。由于能量流及物质流会沿林外—林缘—林内的生态环境产生梯度变化(He *et al.*, 2015), 边缘区形成了组成物种的结构、配置和动态等多方面特殊的环境异质性, 即边缘效应(Kneeshaw & Bergeron, 1998; Yamamoto, 2000; 田超等, 2011)。林窗面积是衡量林窗干扰强度的重要指标(Gálhidy *et al.*, 2006), 不同大小林窗边缘影响的范围和程度不同(Goldblum & Beatty, 1999), 影响着整个林分动态、物种多样性更新与维持(崔宁洁等, 2014)及系统养分循环过程(张艳等, 2015)。因此, 研究边缘效应对森林生态系统管理具有重要的意义。

生态化学计量学(ecological stoichiometry)是研究生物系统能量平衡和多重化学元素平衡(特别是碳(C)、氮(N)、磷(P))的一门科学(Elser *et al.*, 2000)。植物结构性元素C和限制性元素N、P耦合形成的分配格局(如C:N、N:P)影响着群落养分利用效率及生产力等(Elser *et al.*, 2010; Yang & Wang, 2011)。林窗边缘生态过渡带迥异的水热环境可影响植被更新、物种侵入与定居, 造成边缘种对土壤养分的激烈争夺, 加速地上和地下养分周转速率(王家华和李建东, 2006; Kern *et al.*, 2013); 同时, 边缘区适宜的温湿度可提高土壤酶活性(Arunachalam & Arunachalam, 2000), 促进土壤动物微生物繁殖及对凋落物中有机质的矿化分解(Gallo *et al.*, 2009; 张艳等, 2015), 为边缘种提供充足的有机质和养分基础, 这些都可能影响林窗边缘的植物化学计量特征。

马尾松(*Pinus massoniana*)是我国长江上游低山丘陵区退耕还林的主要树种, 面积已超过200万hm²(崔宁洁等, 2014), 但长期采取的纯林经营模式致使马尾松林地出现生产力下降、地力衰退等多种生态问题(张明锦等, 2016)。通过林窗干扰构建复合林分

是改造低效人工林的重要手段(Dupuy & Chazdon, 2008)。马尾松-油樟(*Cinnamomum longepaniculatum*)是四川省宜宾地区的一种混交类型, 油樟是当地一种珍贵的乡土树种, 人为引入在林窗斑块中形成优势种, 构建针叶人工林-阔叶乡土树种镶嵌分布的景观格局。目前, 对天然林或次生林林窗及其边缘效应的研究较多, 如林窗形成时间及方位(王家华和李建东, 2006; Dee *et al.*, 2014)、林窗对物种更新的影响等(廉振民和于广志, 2000; Daoliveira & Ribas, 2011; Haghverdi *et al.*, 2012; Kern *et al.*, 2013), 而对人工林林窗研究报道还相对较少。与天然林相比, 人工林林窗干扰导致的环境异质性及其引起的林下物种元素动态平衡变异性可能更为复杂(王晶苑等, 2011), 可能在养分管理方面存在明显的林窗边缘效应。因此, 本研究在四川宜宾市高县低山丘陵区马尾松人工林7种不同面积的人工林窗边缘, 选取人工更新油樟为研究对象, 研究不同大小林窗边缘效应对油樟化学计量特征的影响, 拟回答以下科学问题: (1)马尾松人工林林窗更新植物油樟在化学计量特征水平上是否存在边缘效应? (2)如果存在边缘效应, 多大林窗面积的边缘效应更加显著, 养分分配格局最优? (3)如果存在边缘效应, 其边缘效应的季节动态如何?

1 研究地区和研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省宜宾市高县来复镇(28.60°–28.61° N, 104.56°–104.57° E, 海拔412–567 m), 处长江上游和四川盆地南缘, 属中亚热带湿润季风气候。全年日照时间1 148 h, 年平均气温18.1 °C, 年降水量1 021.8 mm, 雨量充沛, 雨热同季。样地所在的毛巛坳工区经营小班研究阶段降水主要集中在2015年的5–9月(图1)。土壤为酸性山地黄壤, 发育完善, 土层厚度约50 cm。原生植被为亚热带常绿阔叶林, 现已基本垦殖为马尾松人工林, 林分结构简单,

图1 马尾松人工林不同观测期的降水量。

Fig. 1 Precipitation during different observation periods in *Pinus massoniana* plantations.

郁闭度0.7左右, 林下灌草覆盖度40%, 主要灌木有梨叶悬钩子(*Rubus pirifolius*)、枹栎(*Quercus serrata*)、铁仔(*Myrsine africana*)、茶茱萸(*Viburnum setigerum*)等; 主要草本植物有芒(*Miscanthus sinensis*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)、皱叶狗尾草(*Setaria plicata*)、淡竹叶(*Lophatherum gracile*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)等。

1.2 样地设置

2011年, 根据前期样地调查, 在研究区内选择地形地貌、海拔、母岩、土壤类型、坡度、坡位等相同或相近, 林地情况相近、林分密度相似的39年生成熟马尾松人工林作为研究样地, 人工砍伐形成面积分别为100 m² (G1)、225 m² (G2)、400 m² (G3)、625 m² (G4)、900 m² (G5)、1 225 m² (G6)和1 600 m² (G7)的林窗系列, 形状均近正方形, 各林窗林缘间距不小于20 m。仅在本研究中将这林窗划分为小型林窗(G1、G2)、中型林窗(G3、G4、G5)和大型林

窗(G6、G7)。于次年(2012年)按照2.5 m × 2.5 m的造林密度, 在各梯度林窗内补植一年生珍贵乡土树种油樟优质幼苗构建团块状混交改造模式, 其余灌草植被自然更新, 以远离林窗边缘且大于400 m²的成片马尾松纯林林下为对照处理(CK)。不同大小的林窗和林下对照各设置3个重复样地。样地基本概况见表1。

1.3 样品采集与测定

2015年3月, 林窗形成4年后对林窗内植被和土壤进行调查, 土壤理化特性见表2。自2015年4月(春季)开始, 每隔一个季度采集一次新鲜植物样品, 即采集时间在2015年7月(夏季)、10月(秋季)和2016年1月(冬季), 并监测不同大小林窗边缘及林下环境因子季节动态(表3)。本研究选取各林窗边缘(林窗边缘定义为林冠空隙与周围边界木基部所围成的部分)及林下共有的人工更新优势植物——四年生幼树油樟为研究对象进行样品采集。采样时, 在林窗4条边缘中点及四角位置, 分别采集近等高油樟东南西北四个方位及上中下不同部位当年生健康成熟叶片各5份, 每份不少于10 g。将同一林窗采集的油樟叶片混合后采用四分法取样并装于牛皮纸信封袋中带回实验室处理, 经105 °C杀青, 85 °C烘干至恒质量后, 用粉碎机粉碎制样用于测定C、N、P含量。全碳含量采用重铬酸钾氧化-外加热法(GB 7657-87)测定, 全N和全P含量经H₂SO₄-H₂O₂消煮后分别采用半微量凯氏定氮法(LY/T 1269-1999)和钼锑抗比色法(LY/T 1270-1999)测定。

1.4 数据处理与统计分析

数据的前期处理、统计分析及绘图分别在Microsoft Office Excel 2007、SPSS 20.0和Origin 9.0

表1 马尾松人工林不同面积林窗样地基本概况

Table 1 General characteristics of the sampling plots in forest gaps with different sizes in *Pinus massoniana* plantations

林窗 Gap	面积 Size (m ²)	经纬度 Longitude and latitude	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	坡位 Slope position
G1	100	28.60° N, 104.56° E	423	24.5	SW	中坡 Middle slope
G2	225	28.61° N, 104.56° E	438	26.1	SE	中坡 Middle slope
G3	400	28.60° N, 104.56° E	408	23.5	SE	中坡 Middle slope
G4	625	28.60° N, 104.57° E	424	24.2	SE	中坡 Middle slope
G5	900	28.61° N, 104.57° E	441	21.5	S	中坡 Middle slope
G6	1 225	28.61° N, 104.56° E	418	27.0	SE	中坡 Middle slope
G7	1 600	28.60° N, 104.56° E	430	26.5	SE	中坡 Middle slope
CK	—	28.61° N, 104.57° E	427	23.9	SE	中坡 Middle slope

CK, 林下对照。

CK, closed canopy as control.

中完成。计算林下及不同大小林窗边缘油樟叶片C、N、P含量及C:N、C:P、N:P的算术平均值和标准误差,采用双因素方差分析法分析林窗大小和采样季节对油樟化学计量特征的影响,用Tukey HSD法分别检验不同面积及不同季节林窗边缘油樟化学计量特征的差异($\alpha = 0.05$)。以11个环境因子为自变量,以油樟叶片C、N、P含量及C:N、C:P、N:P为因变量在Canoco for Windows 4.5中进行主成分分析(PCA)排序,结果经Monte Carlo Test检验。

2 结果

2.1 不同季节林窗边缘及林下油樟叶片C、N、P含量

由表4可知,油樟叶片C含量受林窗面积的显著影响,叶片N含量受季节动态的显著影响,叶片P含量受林窗面积和季节动态的显著影响。各林窗边缘油樟叶片C含量在不同季节里均显著高于林下(图2A);叶片N含量在春季和秋季仅G7林窗边缘显著高于林下,冬季G6和G7林窗边缘显著高于林下,在

表2 马尾松人工林不同面积林窗样地土壤理化特性(平均值±标准误差)

Table 2 Soil physical and chemical properties of the sampling plots in forest gaps with different sizes in *Pinus massoniana* plantations (mean ± SE)

林窗 Gap	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	含水量 Soil water content (%)	最大持水量 Maximum field capacity (g·kg ⁻¹)	pH值 pH value	土壤全碳 Soil total carbon (g·kg ⁻¹)	土壤全氮 Soil total nitrogen (g·kg ⁻¹)	土壤全磷 Soil total phosphorus (g·kg ⁻¹)
G1	1.21 ± 0.09 ^c	22.10 ± 3.09 ^a	392.87 ± 6.44 ^a	4.03 ± 0.11 ^b	11.67 ± 2.99 ^b	0.63 ± 0.15 ^{bc}	0.45 ± 0.11 ^c
G2	1.22 ± 0.11 ^{bc}	21.67 ± 4.31 ^a	364.43 ± 10.04 ^{ab}	4.22 ± 0.17 ^{ab}	11.15 ± 1.51 ^b	0.57 ± 0.12 ^d	0.44 ± 0.08 ^d
G3	1.23 ± 0.08 ^{ab}	21.39 ± 4.08 ^{ab}	373.16 ± 8.57 ^{ab}	4.24 ± 0.23 ^{ab}	11.90 ± 1.45 ^{ab}	0.56 ± 0.06 ^d	0.49 ± 0.14 ^a
G4	1.23 ± 0.11 ^{ab}	22.15 ± 3.11 ^a	379.47 ± 8.85 ^{ab}	4.24 ± 0.10 ^{ab}	12.67 ± 1.52 ^a	0.64 ± 0.15 ^b	0.49 ± 0.07 ^a
G5	1.22 ± 0.12 ^{bc}	21.40 ± 3.51 ^{ab}	381.48 ± 11.54 ^{ab}	4.34 ± 0.21 ^{ab}	11.69 ± 1.21 ^b	0.67 ± 0.12 ^a	0.47 ± 0.15 ^b
G6	1.23 ± 0.17 ^a	21.99 ± 4.17 ^a	381.24 ± 13.21 ^{ab}	4.34 ± 0.27 ^{ab}	11.90 ± 1.54 ^{ab}	0.62 ± 0.23 ^c	0.49 ± 0.12 ^a
G7	1.23 ± 0.26 ^a	21.33 ± 1.96 ^{ab}	359.62 ± 6.14 ^b	4.19 ± 0.11 ^{ab}	11.14 ± 1.37 ^b	0.54 ± 0.12 ^e	0.46 ± 0.08 ^{bc}
CK	1.24 ± 0.14 ^a	20.16 ± 2.14 ^b	358.19 ± 15.79 ^b	4.46 ± 0.32 ^a	9.48 ± 0.56 ^c	0.47 ± 0.62 ^f	0.43 ± 0.12 ^d

G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7分别代表面积为100 m²、225 m²、400 m²、625 m²、900 m²、1 225 m²、1 600 m²的林窗;CK, 林下对照。同列不同小写字母代表林窗间差异显著。

G1, G2, G3, G4, G5, G6, and G7 represent gaps with the size of 100 m², 225 m², 400 m², 625 m², 900 m², 1 225 m², and 1 600 m², respectively; CK, closed canopy as control. Different lowercase letters indicate significant differences among the forest gaps in the same column.

表3 不同季节林窗边缘及林下环境因子概况

Table 3 Environmental factors in the sampling plots in the edges of forest gaps with different sizes in different seasons

林窗 Gap	月平均气温 Mean monthly air temperature (°C)				月平均空气湿度 Mean monthly air humidity (%)				相对光强 Relative light intensity (%)			
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
G1	19.43	28.41	21.03	6.45	71.9	84.7	94.6	83.3	61.7	87.8	55.3	58.9
G2	19.23	28.51	22.05	6.21	72.4	87.2	94.5	86.1	63.6	90.5	57.4	59.2
G3	19.67	29.73	21.67	5.98	69.8	89.6	94.7	86.4	64.7	94.8	60.4	60.1
G4	19.76	29.88	22.22	9.03	72.2	90.0	96.3	89.1	67.9	95.4	65.2	66.3
G5	19.27	30.42	22.63	8.43	69.1	88.3	93.4	84.7	68.3	95.0	66.9	66.6
G6	19.92	30.63	21.91	7.11	71.3	86.1	92.6	85.2	71.0	96.4	69.4	68.8
G7	19.80	30.74	22.55	7.10	69.7	86.3	91.7	85.3	71.8	98.2	70.4	71.4
CK	18.32	27.66	20.09	3.12	72.5	90.3	93.6	87.3	18.6	16.4	16.2	17.2

G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7分别代表面积为100 m²、225 m²、400 m²、625 m²、900 m²、1 225 m²、1 600 m²的林窗;CK, 林下对照。

G1, G2, G3, G4, G5, G6, and G7 represent gaps with the size of 100 m², 225 m², 400 m², 625 m², 900 m², 1 225 m², and 1 600 m², respectively; CK, closed canopy as control.

表4 林窗面积和季节及交互作用对油樟化学计量特征影响的双因素方差分析(F值)

Table 4 Two-way ANOVA on the effects of gap size, season, and their interaction on C, N, P and their stoichiometry of *Cinnamomum longepaniculatum*

变异来源 Source of variation	C	N	P	C:N	C:P	N:P
林窗面积 Gap size (G)	198.314***	2.072	5.789*	126.905***	342.956***	78.855***
季节 Season (S)	2.848	670.556***	540.694***	257.959***	278.434***	4.560
林窗面积×季节 Gap size × Season (G × S)	3.594	3.084	4.701	4.454	3.020	9.219**

***, $p < 0.001$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.

图2 马尾松人工林不同季节不同林窗边缘油樟化学计量特征(平均值±标准误差)。不同大写字母代表季节间差异显著;不同小写字母代表林窗间差异显著。G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7分别代表面积为100 m²、225 m²、400 m²、625 m²、900 m²、1 225 m²、1 600 m²的林窗;CK, 林下对照。

Fig. 2 Carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry of *Cinnamomum longepaniculatum* in the edges of forest gaps with different sizes in different seasons in *Pinus massoniana* plantations (mean ± SE). Different capital letters indicate significant differences among seasons, and different lowercase letters indicate significant differences among forest gaps. G1, G2, G3, G4, G5, G6, and G7 represent gaps with the size of 100 m², 225 m², 400 m², 625 m², 900 m², 1 225 m², and 1 600 m², respectively; CK, closed canopy as control.

夏季各林窗边缘与林下无显著差异(图2B); 叶片P含量在春、夏、秋季里G1和G2林窗边缘显著高于林下, 在冬季除G4和G5外其余林窗边缘均显著高于林下(图2C)。

不同季节里油樟在不同林窗边缘的叶片C含量变化趋势相同, 随林窗面积增大均先升后降, 且在G4林窗边缘有最大值。在油樟叶片N含量中, 秋季变化最显著, 随林窗面积增大先降后升, 其余季节里无显著变化。不同季节里油樟叶片P含量随林窗面积增大均呈现出先降后升的变化趋势, 在G4林窗边缘出现最小值。就季节变化来看, 春季到冬季, 各林窗边缘及林下油樟叶片C含量整体呈逐渐升高的趋势, 但不同季节差异不显著; 叶片N、P含量均呈先降后升的变化趋势, 且在夏季有最小值。

2.2 不同季节林窗边缘及林下油樟叶片化学计量比

油樟叶片C:N及C:P受林窗面积和季节动态的显著影响, 叶片N:P受林窗面积和面积与季节交互作用的显著影响。各林窗边缘油樟叶片C:N在四季均显著高于林下(图2D); 叶片C:P在春、秋、冬季除G1外其余林窗边缘均显著高于林下, 在夏季除G1和G2外其余林窗边缘均显著高于林下(图2E); 叶片N:P在春季和秋季G4和G5林窗边缘显著高于林下, 在冬季仅G4林窗边缘显著高于林下, 在夏季各林窗边缘与林下无显著差异(图2F)。

不同季节油樟在不同林窗边缘叶片C:N变化趋势相同, 随林窗面积增大均先升后降, 且在G4林窗边缘有最大值。油樟叶片C:P与C:N在不同季节有一致的变化趋势, 随林窗面积增大先升后降, G4林窗

边缘有最大值。不同季节油樟叶片N:P随林窗面积增大均呈现出先显著上升后平缓下降的变化趋势,在G4和G5林窗边缘有最大值。就季节变化来看,春季到冬季,各林窗边缘及林下油樟叶片C:N和C:P均呈先升后降的变化趋势,且在夏季有最大值;叶片N:P无规律变化。

2.3 各环境因子对油樟化学计量特征的相对贡献
选择11种环境因子与油樟叶片C含量、N含量、P含量、C:N、C:P及N:P进行PCA排序,前两个排序轴对油樟化学计量特征的累积贡献率(累计值占特征值总和)达98.4%,可见,第1、2排序轴成分(环境因子)对油樟化学计量特征起主要控制作用。其中第1轴与林窗面积、土壤全P、月平均湿度显著正相关,林窗面积对第1排序轴贡献最大;第2轴与含水量、土壤全C、全N、月平均气温及相对光强极显著负相关,相对光强对第2排序轴贡献最大,其次为月平均气温(表5)。由图3可知,林窗面积、含水量、土壤全C、全N、全P、月平均气温及相对光强对油樟叶片N含量影响较小,对其余计量特征影响较大,特别是叶片C含量及N:P;月平均湿度对油樟叶片C含量及N:P影响较小,对其余计量特征影响较大,特别是叶片N含量。

3 讨论

3.1 油樟叶片C、N、P元素含量分析

C、N、P元素是细胞结构与功能最重要的生命元素(王振南和杨惠敏, 2013), 相同生活型植物往往趋于分享一套关键的功能性状来实现对环境的趋同

表5 环境变量与排序轴的相关系数
Table 5 Correlation coefficients of environmental variables with ordination axes

环境变量 Environmental variables	排序轴 Ordination axis	
	第1轴 Axis 1	第2轴 Axis 2
林窗面积 Gap size	0.506 4**	-0.245 3
容重 Bulk density	0.134 5	0.333 5
含水量 Moisture content	0.038 0	-0.544 2**
最大持水量 Maximum moisture capacity	0.075 0	-0.381 7
pH值 pH value	-0.027 0	0.381 1
土壤全碳 Total C in soil	0.251 1	-0.510 5**
土壤全氮 Total N in soil	0.210 3	-0.552 8**
土壤全磷 Total P in soil	0.425 4*	-0.356 6
月平均气温 Monthly average air temperature	0.371 6	-0.659 5***
月平均湿度 Monthly average humidity	0.446 6*	0.210 0
相对光强 Relative light intensity	0.099 7	-0.811 4***

***, $p < 0.001$; **, $p < 0.01$; *, $p < 0.05$.

图3 马尾松人工林不同林窗边缘油樟化学计量特征与环境因子的主成分分析(PCA)双序图。TC, 叶片C含量; TN, 叶片N含量; TP, 叶片P含量; C:N, 叶片C:N; C:P, 叶片C:P; N:P, 叶片N:P。BD, 容重; GS, 林窗面积; MAH, 月平均湿度; MAT, 月平均气温; MC, 含水量; MMC, 最大持水量; RLI, 相对光强; STC, 土壤全碳; STN, 土壤全氮; STP, 土壤全磷。
Fig. 3 The principal component analysis (PCA) on carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry of *Cinnamomum longepaniculatum* and environmental variables in the edges of forest gaps with different sizes in *Pinus massoniana* plantations. TC, total C in leaf; TN, total N in leaf; TP, total P in leaf; C:N, C:N in leaf; C:P, C:P in leaf; N:P, N:P in leaf. BD, bulk density; GS, gap size; MAH, monthly average humidity; MAT, monthly average air temperature; MC, moisture content; MMC, maximum moisture capacity; RLI, relative light intensity; STC, total C in soil; STN, total N in soil; STP, total P in soil.

适应(李家湘等, 2017)。因此, 与相关常绿阔叶林研究结果相比, 本研究中油樟平均叶片C含量($466.04 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)与广东鼎湖山($472.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)(王晶苑等, 2011)及云南普洱地区($469.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)(刘万德等, 2015)植物叶片C含量相似, 研究区油樟叶片具有较强的C存储能力; 而油樟平均叶片P含量低于云南普洱地区($1.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)(刘万德等, 2015)植物叶片P含量, 平均叶片N含量远低于广东鼎湖山($19.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)(王晶苑等, 2011)、云南普洱($23.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)(刘万德等, 2015)及浙江天童山($16.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)(阎恩荣等, 2010)地区植物叶片N含量。这可能是因为研究区高温多雨能够导致N、P元素淋溶(杜满义等, 2016), 使油樟可吸收利用的有效氮或有效磷减少; 低的P含量还可能与研究区所属酸性山地黄壤对P有很强的固定作用有关, 也与全国土壤P含量普遍较低的结果(李慧等, 2016)一致。

C含量在一定程度上可以表征植物存储C积累有机物质的能力(Elser *et al.*, 2010), N、P含量则是植物在一定生境下吸收N、P等营养元素的能力(李家湘等, 2017)。本研究中, 各林窗边缘油樟叶片C含量四季均显著高于林下, 平均叶片N、P含量在林窗边缘亦高于林下, 具有明显的边缘效应。林窗与森林

结合的部位构成林窗边缘, 与林下相比, 林窗边缘能更好地接受阳光直射从而形成适宜植物生长代谢的温度与光照条件(田超等, 2011)。PCA分析表明, 月平均气温和相对光强与油樟叶片C含量呈极显著正相关关系, 与P含量相关性较N含量更强, 叶N含量比P含量具有更高的自我调控能力, 变异性和环境依赖性较小, 表现出较强的化学内稳态(Chen *et al.*, 2013; Pan *et al.*, 2015; 李家湘等, 2017)。光合固C是植物体内主要的C来源, 光照、温度及H₂O的变化都会引起光合效率的改变(刘辉等, 2015)。林窗边缘湿度(84.5%)与林下湿度(85.9%)相近, 但边缘区光照强度(55.3%–98.2%)远高于林下(16.2%–18.6%), 特别在夏季更加明显, 充足的光照及适宜的温湿度均有利于边缘区油樟进行光合作用, 进而增加对有机物质的合成与积累, 同时还能加快养分周转, 增加土壤养分的可获得性。

此外, 因林窗空间尺度不同, 使得不同面积林窗边缘拥有光照、热量和水分各异的区域小气候(Gálhidy *et al.*, 2006)。本研究发现, 林窗大小对油樟叶片C、P含量有显著影响, 在不同季节, C含量随林窗面积增大先升后降, 且均为中型林窗G3–G5(特别是G4)有机质积累量最高, 而P含量具有相反的变化趋势, 在一定程度上支持了温度-植物生理假说(Reich & Oleksyn, 2004)。PCA分析表明, 油樟叶片C含量、P含量与月平均气温、月平均湿度、光强及土壤含水量有显著相关性。王丽霞等(2013)的研究表明中林隙土壤含水量最丰富, 其次为大林隙和小林隙, 中型林窗边缘更有利于植物的生长。林窗形成后疏开了上层林冠, 影响着空间及资源的组合状况, 光照强度和气流的改变影响了不同林窗边缘温湿度的变化(Gálhidy *et al.*, 2006)。小型林窗边缘因林冠遮阴及截流导致光照较弱且水分含量较低, 大型林窗边缘因中心所接受的阳光辐射太强使得地面温度较高且水分蒸发较快, 它们均不能保持适宜的温湿度及降水、蒸腾的良好平衡, 不利于油樟的生长。而中型林窗边缘温度低于大型林窗, 适宜的温湿度有利于土壤理化过程(宋小艳等, 2014)、凋落物中有机质的分解矿化(Arunachalam & Arunachalam, 2000)和土壤动物微生物的繁殖(Sylvain & Wall, 2011), 这些要素对于油樟的光合作用、生长发育、高养分吸收利用效率的维持有着重要的作用。

3.2 油樟叶片C、N、P化学计量比分析

叶片C:N和C:P可揭示生物量(C)和养分比值关系, 即养分利用效率, 较高的C:N和C:P代表植物对N、P的利用率较高(Elser *et al.*, 2010)。本研究中, 林窗大小对油樟叶片C:N和C:P有极显著影响, 且不同季节各林窗边缘均显著高于林下。在辐射强烈的林窗中心与林木郁闭的林下之间, 光、温、水的再分配改变了地表水热动态(Kern *et al.*, 2013), 干燥与湿润的气流交替循环(刘辉等, 2015), 使林窗边缘形成异于邻近林下的温和的区域微环境, 可影响物种更新与分解者群落结构, 进一步影响林窗边缘植被养分利用和周转效率(Schliemann, 2011; 张艳等, 2015), 深刻作用于植物养分分配格局。林窗边缘区土壤动物多样性和丰富度高于林下(张明锦等, 2016), 土壤动物与植物根系相互作用, 对营养物质的转化、储存和释放发挥着积极作用。同时, 林窗边缘物种丰富度指数也大于林下(崔宁洁等, 2014), 植物间竞争压力较大, 对土壤养分的激烈争夺促进了地上/地下养分周转速率, 进而提高了优势种对资源的利用效率。张艳等(2015)的研究表明, 林窗边缘凋落物叶难降解物质降解率高于林下, 凋落物分解可为植物根系提供充足的有机质, 促进植物养分吸收利用。Fooreid等(2010)也认为光照时间越长, 辐射通量越大, 光降解作用使养分得到快速分解和释放, 从而为植物生长代谢提供更好的养分基础, 可见林窗边缘油樟对养分吸收利用具有明显的边缘效应。

更为重要的是, 林窗面积不同会导致林窗边缘地表接收不同强度和不同时长阳光直射及降水分配而拥有迥异的水热模式, 进而影响油樟养分周转及分配格局。本研究中, 不同季节油樟叶片C:N和C:P随林窗面积增大先升后降, 且均在G4林窗边缘呈现最大值, 养分利用效率最高, G4林窗边缘C、N、P元素分配相对平衡, 边缘效应更显著。在植物群落中, 非生物环境的C、N和P化学计量比值一旦不匹配, 就会导致C、N和P循环途径的不同(Elser *et al.*, 2000; Fan *et al.*, 2015), 任一元素稀缺或过量必将导致另外两种元素积累或消耗。从G1到G4林窗边缘, C:N和C:P上升, 表征油樟朝着N、P相对稀缺而C相对过量的方向生长; 从G4到G7林窗边缘, C:N和C:P下降, 表征油樟朝着N、P相对充裕而C相对不足的方向生长。C:N和C:P变化趋势均在G4林窗边缘出现

高值拐点,这在一定程度上反映了G4林窗边缘油樟C、N、P元素的相对平衡状态以及对N、P营养元素的高的利用效率,边缘效应更显著。一方面,蒸腾作用是养分元素从根系运输到叶片的主导驱动力,且养分元素溶于水以离子态被植物吸收利用(刘辉等, 2015),水分过低将影响到植物对养分元素的吸收,G4林窗边缘土壤含水量、全C及全P显著高于其余林窗,充足的水分及养分环境为油樟提供了良好的生长条件;另一方面,大型林窗边缘中午的强光照也会导致植物叶片气孔变小或关闭,气孔阻力增加,蒸腾作用减弱,而G4林窗边缘适宜的光温环境保障了油樟蒸腾作用的正常进行及对N、P元素的吸收利用。

叶片或生物量中N:P可作为生态系统限制性营养元素的一个重要指标(Han *et al.*, 2005)。目前大量研究认为这种限制的阈值在不同地域、不同物种上表现不一致(Wassen *et al.*, 1995; Koerselman & Meuleman, 1996; 杜满义等, 2016)。本文采用Güsewell (2004)得出的陆地生态系统阈值:当植被N:P小于10时,植物生长受N限制;N:P大于20时,植物生长受P限制;介于两者之间时,植物受N、P共同限制或不受二者限制。本研究中油樟在4个季节不同林窗边缘中N:P均在10–20之间,根据这一标准可知研究区油樟生长与N、P关系暂不明显,接下来可实施增肥实验来确定该地区N:P临界值或N、P限制作用。

植物叶片元素含量及比例与自身结构特点及生长节律有密切联系(刘万德等, 2015)。本研究表明,夏秋季油樟叶片对养分元素的吸收利用优于春冬季,林窗边缘效应更显著。一方面,春季林窗气温开始回升,植物叶片细胞快速分裂需大量的蛋白质和核酸(李家湘等, 2017),因此叶片选择性吸收N、P元素,二者浓度较高,C:N、C:P较低;在夏季,林窗内光照强度增加,降雨充足,植物生长旺盛,根系对营养元素的吸收速度不及细胞膨胀生长速度(李慧等, 2016),因此N、P元素浓度逐渐被稀释而剧烈下降,C:N、C:P升高;在秋季,林窗内光照减弱,温湿度适宜,植物稳定生长,根系吸收能力加强,且植物代谢强度增加,N、P元素浓度略升高,C:N、C:P开始降低;在冬季,植物代谢强度降低,部分衰老叶片凋落之前,营养元素回收至植物体内及其他健康成熟叶片当中,N、P元素升高,C:N、C:P显著降低。另一方面,凋落物的归还也是C和N等元素的主要来源

(Arunachalam & Arunachalam, 2000; 张明锦等, 2016)。有研究表明夏季温暖湿润的林窗环境更有利于难降解物质中酸不溶性组分在微生物作用下进行降解,释放出更多的养分供给植物利用(张艳等, 2015)。研究区域位于亚热带季风气候带,研究期间降雨多集中在5–9月,夏秋季较高的温湿度环境可提高林窗边缘土壤酶活性、促进土壤动物和微生物对凋落物的分解,进而提高养分可利用性。

4 结论

综上所述,本研究区马尾松人工林各林窗边缘油樟叶片C含量及N、P养分利用效率显著高于林下,在化学计量特征水平上具有明显的边缘效应,且夏秋季更显著。在不同季节里,均为G4 (625 m²)林窗边缘油樟叶片有机质含量最高,C、N、P元素最趋于动态平衡,边缘效应最显著。这将为开展马尾松人工林养分管理提供科学依据。

基金项目 国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05)、国家自然科学基金(31370628)、四川省科技支撑计划项目(12ZC0017)、四川省科技厅应用基础项目(2012JY0047)、四川省教育厅科技创新团队计划项目(11TD006)和四川省大学生创新训练计划项目(201410626032)。

致谢 感谢四川农业大学生态林业研究所谭波老师在野外采样、室内分析工作中给予的帮助。

参考文献

- Arunachalam A, Arunachalam K (2000). Influence of gap size and soil properties on microbial biomass in a subtropical humid forest of north-east India. *Plant and Soil*, 223, 187–195.
- Chen Y, Han W, Tang L, Tang Z, Fang J (2013). Leaf nitrogen and phosphorus concentrations of woody plants differ in responses to climate, soil and plant growth from. *Ecography*, 36, 178–184.
- Cui NJ, Zhang DJ, Liu Y, Zhang J, Yang WQ, Ou J, Zhang J, Song XY, Yin R (2014). Plant diversity and seasonal dynamics in forest gaps of varying sizes in *Pinus massoniana* plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 477–490. (in Chinese with English abstract) [崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 张健, 杨万勤, 欧江, 张捷, 宋小艳, 殷睿 (2014). 马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态. 植物生态学报, 38, 477–490.]
- Daoliveira MVN, Ribas LA (2011). Forest regeneration in

- artificial gaps twelve years after canopy opening in Acre State Western Amazon. *Forest Ecology and Management*, 261, 1722–1731.
- Dee JR, Menges ES, Gilliam F (2014). Gap ecology in the Florida scrubby flatwoods: Effects of time-since-fire, gap area, gap aggregation and microhabitat on gap species diversity. *Journal of Vegetation Science*, 25, 1235–1246.
- Du MY, Fan SH, Liu GL, Feng HY, Guo BH, Tang XL (2016). Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in *Phyllostachys edulis* forests of China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 40, 760–774. (in Chinese with English abstract) [杜满义, 范少辉, 刘广路, 封焕英, 郭宝华, 唐晓鹿 (2016). 中国毛竹林碳氮磷生态化学计量特征. 植物生态学报, 40, 760–774.]
- Dupuy JM, Chazdon RL (2008). Interacting effects of canopy gap, understory vegetation and leaf litter on tree seedling recruitment and composition in tropical secondary forests. *Forest Ecology and Management*, 255, 3716–3725.
- Elser JJ, Fagan WF, Denno RF, Dobberfuhl DR, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham SS, Mccauley E, Schulz KL (2000). Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 408, 578–580.
- Elser JJ, Fagan WF, kerkhoff AJ, Swenson NG, Enquist BJ (2010). Biological stoichiometry of plant production: Metabolism, scaling and ecological response to global change. *New Phytology*, 186, 593–608.
- Fan HB, Wu JP, Liu WF, Yuan YH, Hu L, Cai QK (2015). Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. *Plant and Soil*, 392, 127–138.
- Foereid B, Bellarby J, Meier-Augenstein W, Kemp H (2010). Does light exposure make plant litter more degradable? *Plant and Soil*, 333, 275–285.
- Gálhidy L, Mihók B, Hagyo A, Rajkai K, Standovár T (2006). Effects of gap size and associated changes in light and soil moisture on the understory vegetation of a Hungarian beech forest. *Plant Ecology*, 183, 133–145.
- Gallo ME, Porras-Alfaro A, Odenbach KJ, Sinsabaugh RL (2009). Photoacceleration of plant litter decomposition in an arid environment. *Soil Biology & Biochemistry*, 41, 1433–1441.
- Goldblum D, Beatty SW (1999). Influence of an old field/forest edge on a northeastern United States deciduous forest understory community. *Journal of the Torrey Botanical Society*, 126, 335–343.
- Güsewell S (2004). N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance. *New Phytologist*, 164, 243–266.
- Haghverdi K, Kiadaliri H, Sagheb-Talebi K, Kooch Y (2012). Variability of plant diversity and soil features following gap creation in Caspian Beech Forests of Iran. *Annals of Biological Research*, 3, 4622–4635.
- Han W, Fang J, Guo D, Yan Z (2005). Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China. *New Phytology*, 168, 377–385.
- He ZS, Liu JF, Su SJ, Zheng SQ, Xu DW, Wu ZY, Hong W, Wang JL (2015). Effects of forest gaps on soil properties in *Castanopsis kawakamii* nature forest. *PLOS ONE*, 10, e0141203. doi:10.1371/journal.pone.0141203.
- Kern CC, Montgomery RA, Reich PB, Strong TF (2013). Canopy gap size influences niche partitioning of the ground-layer plant community in a northern temperate forest. *Journal of Plant Ecology*, 6, 101–112.
- Kneeshaw DD, Bergeron Y (1998). Canopy gap characteristics and tree replacement in the southeastern boreal forest. *Ecology*, 79, 783–794.
- Koerselman W, Meuleman AFM (1996). The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *Journal of Applied Ecology*, 33, 1441–1450.
- Li H, Wang BT, Liu T (2016). The nutrient content variations of different forest species and the forest soil in Loess Region of Western Shanxi. *Forest Research*, 29, 587–595. (in Chinese with English abstract) [李慧, 王百田, 刘涛 (2016). 晋西黄土区不同森林树种及其林地土壤养分含量的变化. 林业科学研究, 29, 587–595.]
- Li JX, Xu WT, Xiong GM, Wang Y, Zhao CM, Lu ZJ, Li YL, Xie ZQ (2017). Leaf nitrogen and phosphorus concentration and the empirical regulations in dominant woody plants of shrublands across southern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 41, 31–42. (in Chinese with English abstract) [李家湘, 徐文婷, 熊高明, 王杨, 赵常明, 卢志军, 李跃林, 谢宗强 (2017). 中国南方灌丛优势木本植物叶的氮、磷含量及其影响因素. 植物生态学报, 41, 31–32.]
- Lian ZM, Yu GZ (2000). Edge effect and biodiversity. *Chinese Biodiversity*, 8, 120–125. (in Chinese with English abstract) [廉振民, 于广志 (2000). 边缘效应与生物多样性. 生物多样性, 8, 120–125.]
- Liu H, Song HX, Yang WQ, Zhang J (2015). Responses of photosynthetic traits in *Cinnamomum longepaniculatum* seedlings to forest gap size in a masson pine plantation. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 4089–4096. (in Chinese with English abstract) [刘辉, 宋会兴, 杨万勤, 张健 (2015). 油樟幼苗对马尾松林窗面积的光合响应特征. 生态学报, 35, 4089–4096.]
- Liu WD, Su JR, Li SF, Lang XD, Zhang ZJ, Huang XB (2015). Leaf carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry at different growth stages in dominant tree species of a monsoon broad-leaved evergreen forest in Pu'er, Yunnan Province, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 52–62. (in Chinese with English abstract) [刘万德, 苏建荣, 李帅锋, 郎学东, 张志钧, 黄小波 (2015). 云南普洱季风常绿阔叶林优势物种不同生长阶段叶片碳、氮、磷化学计量特征. 植物生态学报, 39, 52–62.]

- Pan F, Zhang W, Liu S, Li D, Wang K (2015). Leaf N:P stoichiometry across plant functional groups in the karst region of southwestern China. *Trees*, 29, 883–892.
- Reich PB, Oleksyn J (2004). Global patterns of plant leaf N and P in relation to temperature and latitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 101, 11001–11006.
- Restrepo C, Gomez N, Heredia S (1999). Anthropogenic edges, treefall gaps, and fruit-frugivore interactions in a neotropical montane forest. *Ecology*, 80, 668–685.
- Schliemann S (2011). Effects of treefall gap size and age on carbon and nitrogen biogeochemical cycling in Northern hardwood-hemlock forests. *Dissertation Abstracts International*, 73, 141–147.
- Song XY, Zhang DJ, Zhang J, Li JP, Deng CC, Deng C (2014). Effects of gaps on distribution of soil aggregates and organic carbon in *Pinus massoniana* plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 25, 3083–3090. (in Chinese with English abstract) [宋小艳, 张丹桔, 张健, 李建平, 邓长春, 邓超 (2014). 马尾松人工林林窗对土壤团聚体及有机碳分布的影响. 应用生态学报, 25, 3083–3090.]
- Sylvain ZA, Wall DH (2011). Linking soil biodiversity and vegetation: Implications for a changing planet. *American Journal of Botany*, 98, 517–527.
- Tian C, Yang XB, Liu Y (2011). Edge effect and its impacts on forest ecosystem: A review. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 22, 2184–2192. (in Chinese with English abstract) [田超, 杨新兵, 刘阳 (2011). 边缘效应及其对森林生态系统影响的研究进展. 应用生态学报, 22, 2184–2192.]
- Wang JH, Li JD (2006). Advances in study on forest gaps. *World Forestry Research*, 19, 27–30. (in Chinese with English abstract) [王家华, 李建东 (2006). 林窗研究进展. 世界林业研究, 19, 27–30.]
- Wang JY, Wang SQ, Li RL, Yan JH, Sha LQ, Han SJ (2011). C:N:P stoichiometric characteristics of four forest types' dominant tree species in China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 587–595. (in Chinese with English abstract) [王晶苑, 王绍强, 李纫兰, 闫俊华, 沙丽清, 韩士杰 (2011). 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, 35, 587–595.]
- Wang LX, Duan WB, Chen LX, Du S, Wei QS, Zhao JH, Zhang C (2013). Effects of gap size on the spatial heterogeneity of soil water in *Pinus koraiensis*-dominated broad-leaved mixed forest. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24, 17–24. (in Chinese with English abstract) [王丽霞, 段文标, 陈立新, 杜珊, 魏全帅, 赵健慧, 赵琛 (2013). 红松阔叶混交林林隙大小对土壤水分空间异质性的影响. 应用生态学报, 24, 17–24.]
- Wang ZN, Yang HM (2013). Response of ecological stoichiometry of carbon, nitrogen and phosphorus in plants to abiotic environmental factors. *Pratacultural Science*, 30, 927–934. (in Chinese with English abstract) [王振南, 杨惠敏 (2013). 植物碳氮磷生态化学计量对非生物因子的响应. 草业科学, 30, 927–934.]
- Wassen MJ, Olde Venterink HGM, Swart EOAM (1995). Nutrient concentrations in mire vegetation as a measure of nutrient limitation in mire ecosystems. *Journal of Vegetation Science*, 6, 5–16.
- Yamamoto S (2000). Forest gap dynamics and tree regeneration. *Journal of Forest Research*, 5, 223–229.
- Yan ER, Wang XH, Guo M, Zhong Q, Zhou W (2010). C:N:P stoichiometry across evergreen broad-leaved forests, evergreen coniferous forests and deciduous broad-leaved forests in the Tiantong Region, Zhejiang Province, eastern China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 34, 48–57. (in Chinese with English abstract) [阎恩荣, 王希华, 郭明, 仲强, 周武 (2010). 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, 34, 48–57.]
- Yang HM, Wang DM (2011). Advances in the study on ecological stoichiometry in grass-environment system and its response to environmental factors. *Acta Prataculturae Sinica*, 5, 247–264.
- Zhang MJ, Chen LH, Zhang J, Yang WQ, Li X, Zhang Y, Liu H (2016). Effects of soil fauna on microbial biomass in decomposing litter under artificial masson pine (*Pinus massoniana*) forest gap. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 22, 35–42. (in Chinese with English abstract) [张明锦, 陈良华, 张健, 杨万勤, 李勋, 张艳, 刘华 (2016). 马尾松人工林林窗内土壤动物对凋落物微生物生物量的影响. 应用与环境生物学报, 22, 35–42.]
- Zhang Y, Zhang DJ, Zhang J, Yang WQ, Deng CC, Li JP, Li X, Tang SS, Zhang MJ (2015). Effects of forest gap size on litter recalcitrant components of two tree species in *Pinus massoniana* plantations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 29, 785–796. (in Chinese with English abstract) [张艳, 张丹桔, 张健, 杨万勤, 邓长春, 李建平, 李勋, 唐仕姗, 张明锦 (2015). 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. 植物生态学报, 29, 785–796.]

责任编辑: 程晓莉 责任编辑: 王 薇

扫码向作者提问