

# 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

张 艳<sup>1</sup> 张丹桔<sup>1</sup> 张 健<sup>1,2\*</sup> 杨万勤<sup>1</sup> 邓长春<sup>1</sup> 李建平<sup>1</sup> 李 勋<sup>1</sup> 唐仕姗<sup>1</sup>  
张明锦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>四川农业大学林学院生态林业研究所, 成都 611130; <sup>2</sup>四川生态林业工程重点实验室, 四川雅安 625014

**摘 要** 林窗通过改变森林微环境及土壤环境而影响凋落物难降解物质的降解, 目前关于人工林林窗对凋落物分解过程中难降解物质影响的研究较少。该文采用凋落物分解袋法, 以马尾松(*Pinus massoniana*)人工林人工砍伐形成的7个不同面积的林窗(G1: 100 m<sup>2</sup>、G2: 225 m<sup>2</sup>、G3: 400 m<sup>2</sup>、G4: 625 m<sup>2</sup>、G5: 900 m<sup>2</sup>、G6: 1 225 m<sup>2</sup>、G7: 1 600 m<sup>2</sup>)为研究对象, 以林下为对照, 研究了林窗大小对两种乡土树种——樟(*Cinnamomum camphora*)和红椿(*Toona ciliata*)凋落叶分解过程中难降解物质(木质素、纤维素、总酚、缩合单宁)含量的影响。结果表明: 1)林窗大小对林窗中心红椿凋落叶缩合单宁、总酚、木质素的含量有显著影响, 对其纤维素含量和樟凋落叶中4种难降解物质含量均无显著影响。随着林窗面积的增大, 红椿凋落叶中除纤维素含量外的其余3种难降解物质含量, 中小型林窗(G1–G5, G1: 100 m<sup>2</sup>, G2: 225 m<sup>2</sup>, G3: 400 m<sup>2</sup>, G4: 625 m<sup>2</sup>, G5: 900 m<sup>2</sup>)低于大型林窗(G6、G7, G6: 1 225 m<sup>2</sup>, G7: 1 600 m<sup>2</sup>)。2)林窗不同位置, 只有红椿凋落叶中缩合单宁含量林窗中心显著低于边缘, 其余难降解物质含量和樟凋落叶中4种难降解物质含量均无显著差异。樟凋落叶的木质素含量在G3林窗显著低于林下; 红椿凋落叶除纤维素含量外的其余难降解物质含量, 中小型林窗从林窗中心到边缘均显著低于林下。3)随着分解时间的延长, 两种凋落叶都表现出缩合单宁、纤维素含量降低, 木质素含量升高, 总酚含量先升高后降低的变化趋势。研究结果表明: 中小型林窗(100–900 m<sup>2</sup>)较大面积林窗干扰更有利于凋落叶中难降解物质的降解, 而林窗内的环境异质性应该是凋落物中难降解物质分解动态的主要调控因子, 并且这种效应依赖于初始凋落物质量。

**关键词** 林窗面积, 马尾松人工林, 难降解物质

**引用格式:** 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, 39, 785–796. doi: 10.17521/cjpe.2015.0075

## Effects of forest gap size on litter recalcitrant components of two tree species in *Pinus massoniana* plantations

ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Dan-Ju<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>1,2\*</sup>, YANG Wan-Qin<sup>1</sup>, DENG Chang-Chun<sup>1</sup>, LI Jian-Ping<sup>1</sup>, LI Xun<sup>1</sup>, TANG Shi-Shan<sup>1</sup>, and ZHANG Ming-Jin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Ecology & Forestry, College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; and <sup>2</sup>Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in Sichuan, Ya'an, Sichuan 625014, China

### Abstract

**Aims** The objective of the study was to evaluate the dynamics of recalcitrant components during foliar litter decomposition at different forest gap size in *Pinus massoniana* plantation in the low hilly land, Sichuan basin.

**Methods** The experiment was set up by thinning *P. massoniana* plantation to establish seven different gap sizes (G1: 100 m<sup>2</sup>, G2: 225 m<sup>2</sup>, G3: 400 m<sup>2</sup>, G4: 625 m<sup>2</sup>, G5: 900 m<sup>2</sup>, G6: 1 225 m<sup>2</sup>, G7: 1 600 m<sup>2</sup>). The contents of four recalcitrant components (condensed tannins, total phenol, lignin, cellulose) in foliar litter of two native species (*Cinnamomum camphora* and *Toona ciliata*) placed in litterbags at different locations in the forest gaps were evaluated. The litterbags placed under closed canopy were used as the control. Litterbags with air-dried leaves of *C. camphora* and *T. ciliata* were placed at center, edge of the gap and under the closed canopy in November 2013, and collected in December 2013, February 2014, May 2014 and August of 2014 for lab analysis.

**Important findings** The results showed that: 1) Forest gap size had significant effect on the content of condensed tannins, total phenol and lignin for *T. ciliata* in gap center. However, the forest gap size had no significant

effect on the content of recalcitrant components in the litters of *C. camphora* and cellulose content of *T. ciliata*. With the increase of gap size, except for cellulose content, the other three recalcitrant components content in small and medium sized gaps (G1–G5) were significant lower than in large gaps (G6, G7). 2) The condensed tannin content of *T. ciliata* at the gap center were significant lower than at the gap edge. The lignin contents at gap center of G3 was significant reduced in the *C. camphora* litter. The condensed tannins, total phenol, and lignin contents of *T. ciliata* litter in small and medium gaps significantly decreased. 3) The contents of the four recalcitrant components in both species' foliar litter changed with time. The contents of condensed tannins and cellulose decreased and the content of lignin increased significantly with time, however, the total phenol content increased initially, and then decreased. Therefore, small and medium sized gaps (100–900 m<sup>2</sup>) could be the optimal gap sizes to promote the degradation of litter recalcitrant components for two native species in *P. massoniana* plantations.

**Key words** forest gap size, *Pinus massoniana* plantations, recalcitrant components

**Citation:** 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*, 39, 785–796. doi: 10.17521/cjpe. 2015.0075

凋落物分解是森林生态系统中养分归还的主要途径, 是森林生态系统中物质循环和能量流动的重要环节(林波等, 2004)。凋落物分解受自身基质特性和外部生物和非生物因素的共同影响, 同时, 其分解速率制约着生态系统的养分循环速率(李强等, 2012)。凋落物中存在易分解的无机成分(N、P等)和相对难分解的有机成分(木质素、纤维素、半纤维素、多酚类物质等)(Swift *et al.*, 1979)。凋落物分解前期, 主要发生水溶性组分和少量易分解的有机性组分的分解(McClaugherty, 1983; Couteaux *et al.*, 1995), 而后期难分解有机成分(木质素、纤维素、单宁、多酚类物质等)的分解才开始缓慢发生(Berg & Lundmark, 1987; Landsberg, 1987)。以往的研究都主要关注易分解成分(N、P等)养分释放规律等方面(李强等, 2012), 而现在越来越多的研究表明凋落物中难降解物质对生态系统碳和营养循环有很大的影响(Hatakka, 2001; Klotzbücher *et al.*, 2011; Rahman *et al.*, 2013)。因此研究凋落物分解过程中难降解物质的变化对了解森林凋落物分解过程具有重要意义。

林窗是森林内普遍存在的干扰方式之一(刘庆和吴彦, 2002; 何永涛等, 2003), 是造成森林环境异质性的因子。林窗形成后, 林窗内环境发生变化, 且随着林窗形状、大小及位置而不同(刘文杰等, 2000)。由于林窗空间尺度的不同, 使得不同面积的林窗中央、边缘至林下光照、热量和水分等环境因素有显著差异, 从而形成不同水热条件的微环境(Gálhidy *et al.*, 2006; Muscolo *et al.*, 2007; He *et al.*, 2012), 影响着凋落物有机组分的降解。林窗大小直

接影响着林窗的光照、温度和其他生态环境因子, 从而影响着森林生态系统养分动态(王家华和李建东, 2006)。不同面积的林窗中心接受的光照强度不同, 蒸腾作用也不同(Arunachalam & Arunachalam, 2000; 段文标等, 2008), 在很大程度上也影响着凋落物的分解。迄今, 对林窗中凋落物分解的研究多关注于N、P等易分解营养元素的释放等方面(胡蓉等, 2011; 徐李亚等, 2014), 而针对凋落物中难降解物质的动态变化研究较少。

马尾松(*Pinus massoniana*)是四川低山丘陵区的主要造林树种, 面积已超过20万hm<sup>2</sup>。单一的马尾松人工纯林存在林分结构单一、土壤退化等生态问题。林窗干扰是改造低效人工林的主要技术手段(崔宁洁等, 2014), 研究林窗对凋落物分解的影响有助于了解马尾松人工林的养分动态循环特征。樟(*Cinnamomum camphora*)落叶丰富, 凋落物养分含量高, 抗酸能力较强, 具有较好的改良土壤作用(冯宗炜等, 1999; 李志勇等, 2007)。红椿(*Toona ciliata*)作为国家Ⅱ级重点保护野生植物, 是我国热带、亚热带地区的珍贵速生用材树种, 且红椿对一些重金属(如Pb)具有很强的耐受性和积累能力(胡方洁等, 2012), 是宜宾珍贵乡土树种。因此, 本研究以四川省宜宾低山丘陵区马尾松人工林为研究对象, 分析了不同大小林窗对林窗中红椿和樟凋落叶分解过程中难降解物质分解的影响, 以期揭示不同大小林窗对人工林生态系统养分循环过程的影响机制, 为马尾松人工林混交树种的选择和科学经营提供理论依据。

## 1 实验方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于四川省宜宾市高县境内(28.60°–28.61° N, 104.56°–104.57° E); 气候类型属中亚热带湿润季风气候, 年平均气温18.1 °C、年降水量1 021.8 mm, 气候温和, 雨量充沛。该研究样地选自来复镇毛坝坳的人工马尾松林, 海拔高度400–550 m, 土壤为山地黄壤。选择地形地貌、海拔、母岩、土壤类型、坡度、坡位等相同或相近的42年生的马尾松人工林为研究样地。马尾松人工林林分结构简单, 乔木以马尾松为主, 林下层物种主要灌木有野梧桐(*Mallotus japonicus*)、梨叶悬钩子(*Rubus pirifolius*)和铁仔(*Myrsine africana*)等, 主要草本有商陆(*Phytolacca acinosa*)、芒萁(*Dicranopteris pedata*)、芒(*Miscanthus sinensis*)、荩草(*Arthraxon hispidus*)、蕨(*Pteridium aquilinum*)和皱叶狗尾草(*Setaria plicata*)等。

### 1.2 样地设置与研究方法

2011年10月在实验区选择林地情况相近、林分密度相似的42年生马尾松人工林, 通过采伐形成7个面积不等的近正方形林窗: G1 (100 m<sup>2</sup>)、G2 (225 m<sup>2</sup>)、G3 (400 m<sup>2</sup>)、G4 (625 m<sup>2</sup>)、G5 (900 m<sup>2</sup>)、G6 (1 225 m<sup>2</sup>)、G7 (1 600 m<sup>2</sup>) (表1)。本研究中, 将这些林窗划分为小型林窗(G1、G2、G3)、中型林窗(G4、G5)、大型林窗(G6、G7), 各林窗边界间距不小于10 m, 同时, 选择距离这些林窗10 m左右且面积大于400 m<sup>2</sup>的马尾松纯林作为对照样地, 每个面积设置3个重复样地。2013年9月下旬收集新鲜、自然凋落

的珍贵乡土树种红椿和樟凋落叶, 风干后装于20 cm × 20 cm、孔径为0.5 mm的尼龙网袋中, 每袋10 g。2013年11月中旬, 沿同一坡向自林窗中央至林下依次按林窗中心、边缘(林窗边缘界定为林冠空隙与周围边界木基部所围成的部分)、林下放置网袋(平铺于土壤表面, 袋间距离≥2 cm)。在凋落物袋中放入纽扣式温湿度记录器, 每2 h记录一次(图1)。放置凋落物袋后1、3、6、9个月取回, 即2013年12月(秋)、2014年2月(冬)、5月(春)、8月(夏), 每次取3袋。凋落物袋取回后去除袋上土粒和杂质, 65 °C下烘干至恒定质量, 粉碎保存用于分析难降解物质含量。

### 1.3 样品分析

各指标的定量分析方法: 木质素和纤维素分析用范氏(van Soest)洗涤纤维法(Graça *et al.*, 2005); 总酚分析用福林酚比色法(Kähkönen *et al.*, 1999); 缩合单宁分析用香草醛-盐酸法(武予清和郭予元, 2000)。全碳分析用重铬酸钾加热法(GB 7657-87); 全氮分析用凯氏定氮法(LY/T 1269-1999); 磷分析用钼锑抗比色法(LY/T 1270-1999)。

### 1.4 数据分析

数据分析采用SPSS 17.0统计软件。林窗面积和采样时间对缩合单宁、总酚、木质素、纤维素含量的影响采用双因素方差分析, 并以Tukey's HSD法进行后续多重比较, 显著性水平为0.05。林窗中心、边缘与林下缩合单宁、总酚、木质素、纤维素含量差异采用Tukey's HSD法进行多重比较。樟和红椿两种凋落叶中各难降解物质含量的差异采用独立样本 $t$ 检验。

表1 样地基本概况(平均值±标准误差)

Table 1 The basic information of sampling plots (mean ± SE)

林窗 Gap	面积 Area (m <sup>2</sup> )	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	土壤全碳 Total C in soil (g·kg <sup>-1</sup> )	土壤全氮 Total N in soil (g·kg <sup>-1</sup> )	pH值 pH value	土壤容重 Bulk density in soil (g·cm <sup>-3</sup> )	土壤最大持水量 Maximum moisture capacity in soil (g·kg <sup>-1</sup> )
G1	100	423	24.5	SW	10.67 ± 3.99	0.60 ± 0.21	4.1 ± 0.1	1.40 ± 0.14	435.5 ± 40.3
G2	225	438	26.0	SE	12.05 ± 3.51	0.58 ± 0.12	4.2 ± 0.3	1.20 ± 0.09	393.7 ± 31.9
G3	400	408	23.5	SE	10.90 ± 0.76	0.56 ± 0.06	4.2 ± 0.2	1.28 ± 0.08	394.1 ± 65.1
G4	625	424	24.0	SE	10.24 ± 1.47	0.53 ± 0.15	4.1 ± 0.1	1.35 ± 0.11	326.1 ± 68.2
G5	900	441	21.5	S	12.44 ± 1.21	0.67 ± 0.12	4.3 ± 0.2	1.41 ± 0.11	388.1 ± 75.1
G6	1 225	418	27.0	SE	16.58 ± 1.54	0.60 ± 0.05	4.4 ± 0.3	1.31 ± 0.17	416.2 ± 32.9
G7	1 600	430	26.0	SE	9.10 ± 1.37	0.53 ± 0.12	4.0 ± 0.1	1.29 ± 0.26	326.6 ± 21.1
CK	—	427	23.0	SE	13.77 ± 4.08	0.66 ± 0.22	4.6 ± 0.2	1.41 ± 0.04	363.0 ± 54.7

CK, 林下对照。

CK, closed canopy as control.

2 结果

2.1 不同大小林窗中凋落叶分解温度特征

不同大小梯度林窗中心和边缘凋落叶温度均呈现先下降后上升的变化趋势(图1), 即从11月开始逐渐降低, 12月至次年2月处于冬季低温时期, 温度最低, 2–5月气温逐渐回升, 但波动较大, 5–8月气温显著升高。林窗边缘的温度波动较林窗中心大, 林窗内的温度稍高于林下, 但林窗中心、边缘的温度无显著差异(表2)。

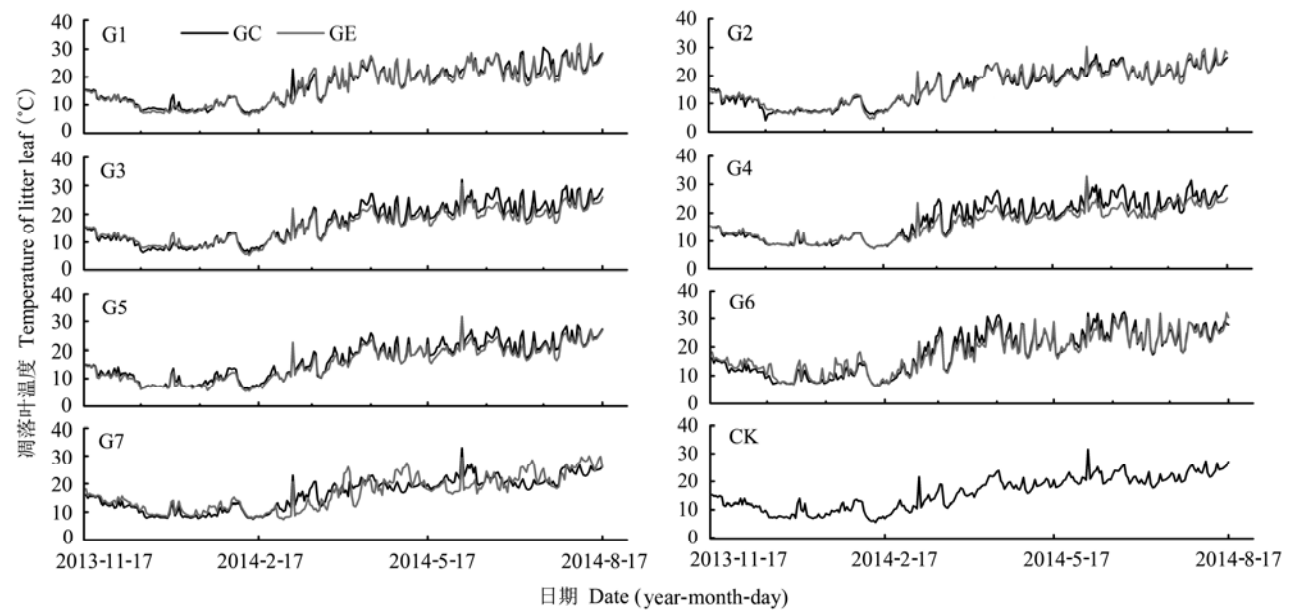


图1 四川省宜宾市研究区域内样地凋落叶的温度动态。CK, 林下对照; G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7分别代表100 m<sup>2</sup>、225 m<sup>2</sup>、400 m<sup>2</sup>、625 m<sup>2</sup>、900 m<sup>2</sup>、1 225 m<sup>2</sup>、1 600 m<sup>2</sup>的林窗。GC, 林窗中心; GE, 林窗边缘。  
Fig. 1 Temporal variations of temperature in litterbags for each sampling plot. CK, closed canopy as control; G1, G2, G3, G4, G5, G6, and G7 represent gaps of different sizes in the order of 100 m<sup>2</sup>, 225 m<sup>2</sup>, 400 m<sup>2</sup>, 625 m<sup>2</sup>, 900 m<sup>2</sup>, 1 225 m<sup>2</sup>, and 1 600 m<sup>2</sup>, respectively. GC, gap center; GE, gap edge.

表2 不同分解阶段不同大小林窗凋落叶的平均温度(°C)  
Table 2 The mean temperature in litterbags for different gap sizes at different time periods (°C)

林窗 Gap	2013-11-17 – 2013-12-17		2013-12-17 – 2014-02-17		2014-02-17 – 2014-05-17		2014-05-17 – 2014-08-17	
	GC	GE	GC	GE	GC	GE	GC	GE
CK	11.14	11.14	8.05	8.05	15.85	15.85	21.98	21.98
G1	12.46	12.15	9.04	8.58	17.76	17.97	23.95	22.75
G2	11.41	12.12	7.90	7.83	16.45	16.90	22.15	22.16
G3	11.68	12.40	8.61	8.89	17.77	16.39	23.71	21.32
G4	12.43	12.92	9.40	9.63	18.90	16.30	24.41	21.79
G5	11.92	11.14	8.64	7.90	16.77	15.87	22.75	21.12
G6	12.73	14.33	9.05	10.45	19.85	18.71	24.50	23.96
G7	13.04	14.07	9.34	10.47	16.85	16.19	22.07	22.12

CK, 林下对照; G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7分别代表100 m<sup>2</sup>、225 m<sup>2</sup>、400 m<sup>2</sup>、625 m<sup>2</sup>、900 m<sup>2</sup>、1 225 m<sup>2</sup>、1 600 m<sup>2</sup>的林窗。GC, 林窗中心; GE, 林窗边缘。  
CK, closed canopy as control; G1, G2, G3, G4, G5, G6, and G7 represent gaps of different sizes in the order of 100 m<sup>2</sup>, 225 m<sup>2</sup>, 400 m<sup>2</sup>, 625 m<sup>2</sup>, 900 m<sup>2</sup>, 1 225 m<sup>2</sup>, and 1 600 m<sup>2</sup>, respectively. GC, gap center; GE, gap edge.

2.2 林窗和分解时间对两种凋落叶中难降解物质含量的影响

两种凋落叶的基本养分和难降解物质的初始含量如表3, 樟凋落叶C、N、P初始含量、总酚含量均低于红椿凋落叶, 而缩合单宁、木质素和纤维素的初始含量则明显高于红椿。*t*检验结果表明(表4): 在不同分解阶段林窗内不同位置均表现为除总酚外, 红椿其余难降解物质含量均显著低于樟。而在降解到270天时, 总酚含量表现出樟显著高于红椿。

双因素方差分析结果表明: 无论是林窗边缘还

表3 凋落叶养分和难降解物质初始含量(平均值±标准误差)

Table 3 Initial contents of C, N, P and recalcitrant components in litters (mean ± SE)

物种 Species	C (g·kg <sup>-1</sup> )	N (g·kg <sup>-1</sup> )	P (g·kg <sup>-1</sup> )	总酚 Total phenol (g·kg <sup>-1</sup> )	缩合单宁 Condensed tannins (g·kg <sup>-1</sup> )	木质素 Lignin (g·kg <sup>-1</sup> )	纤维素 Cellulose (g·kg <sup>-1</sup> )
红椿 <i>Toona ciliata</i>	674.51 ± 10.53 <sup>A</sup>	58.14 ± 1.68 <sup>A</sup>	1.67 ± 0.09 <sup>A</sup>	29.60 ± 0.79 <sup>A</sup>	3.67 ± 0.22 <sup>B</sup>	70.1 ± 13.0 <sup>B</sup>	106.7 ± 7.10 <sup>B</sup>
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	554.55 ± 19.14 <sup>B</sup>	36.01 ± 2.61 <sup>B</sup>	0.85 ± 0.01 <sup>B</sup>	14.70 ± 0.96 <sup>B</sup>	14.4 ± 18.0 <sup>A</sup>	214.05 ± 3.61 <sup>A</sup>	189.90 ± 25.5 <sup>A</sup>

同列不同大写字母表示物种间差异极显著( $p < 0.01$ )。Different capital letters in the same column indicate significant differences between two species ( $p < 0.01$ ).表4 不同分解阶段两种凋落叶难降解物质含量的独立样本 $t$ 检验Table 4 Independent sample  $t$ -test analysis on the content of litter recalcitrant components for two species for different decomposition periods

位置 Positions	分解时间 Decomposition time (d)	缩合单宁 Condensed tannins (g·kg <sup>-1</sup> )	总酚 Total phenol (g·kg <sup>-1</sup> )	木质素 Lignin (g·kg <sup>-1</sup> )	纤维素 Cellulose (g·kg <sup>-1</sup> )
GC	30	6.006**	-20.507**	16.402**	7.960**
	90	4.215**	-18.649**	23.926**	6.395**
	180	7.979**	-7.687**	17.272**	6.275**
	270	8.536**	7.344**	2.514**	9.165**
GE	30	7.696**	-19.183**	17.031**	7.593**
	90	0.262**	-22.250**	21.326**	6.054**
	180	6.080**	-10.222**	7.791**	5.069**
	270	2.377**	11.263**	11.122**	9.986**
CK	30	2.994*	-24.952**	-0.436	0.752
	90	0.709	-19.510**	6.972*	1.765
	180	1.035	-5.670*	9.120**	6.819**
	270	0.143	4.042*	20.254**	2.975

CK, 林下对照; GC, 林窗中心; GE, 林窗边缘。\*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ 。  
CK, closed canopy as control; GC, gap center; GE, gap edge. \*\*,  $p < 0.01$ ; \*,  $p < 0.05$ .

是林窗中心, 林窗面积对樟凋落叶中难降解物质含量均无显著影响; 在林窗中心, 林窗面积对红椿凋落叶中除纤维素外的其他3种难降解物质含量均有显著影响; 在林窗边缘, 只对木质素含量有显著影响, 对其他难降解物质均无影响(表5)。两种凋落叶中难降解物质含量随着林窗面积增大而呈现不同的变化趋势: 1)樟凋落叶中4种难降解物质含量随着林窗面积增大无显著变化(图2A、2C、2E、2G); 2)随着林窗面积的增大, 林窗中心红椿凋落叶缩合单宁含量除G2显著低于G6、G7林窗外, 其他面积林窗均无显著差异(图2B); 总酚含量G1–G5无显著变化, G6、G7显著升高(图2D); 木质素含量G1–G6无显著变化, G7则显著升高。林窗边缘缩合单宁和总酚含量随着林窗面积增大无显著差异; 而木质素含量G1–G6无显著变化, G7显著降低(图2F); 纤维素含量则随着林窗面积增加无显著变化(图2H)。

采样时间对两种凋落叶中4种难降解物质含量

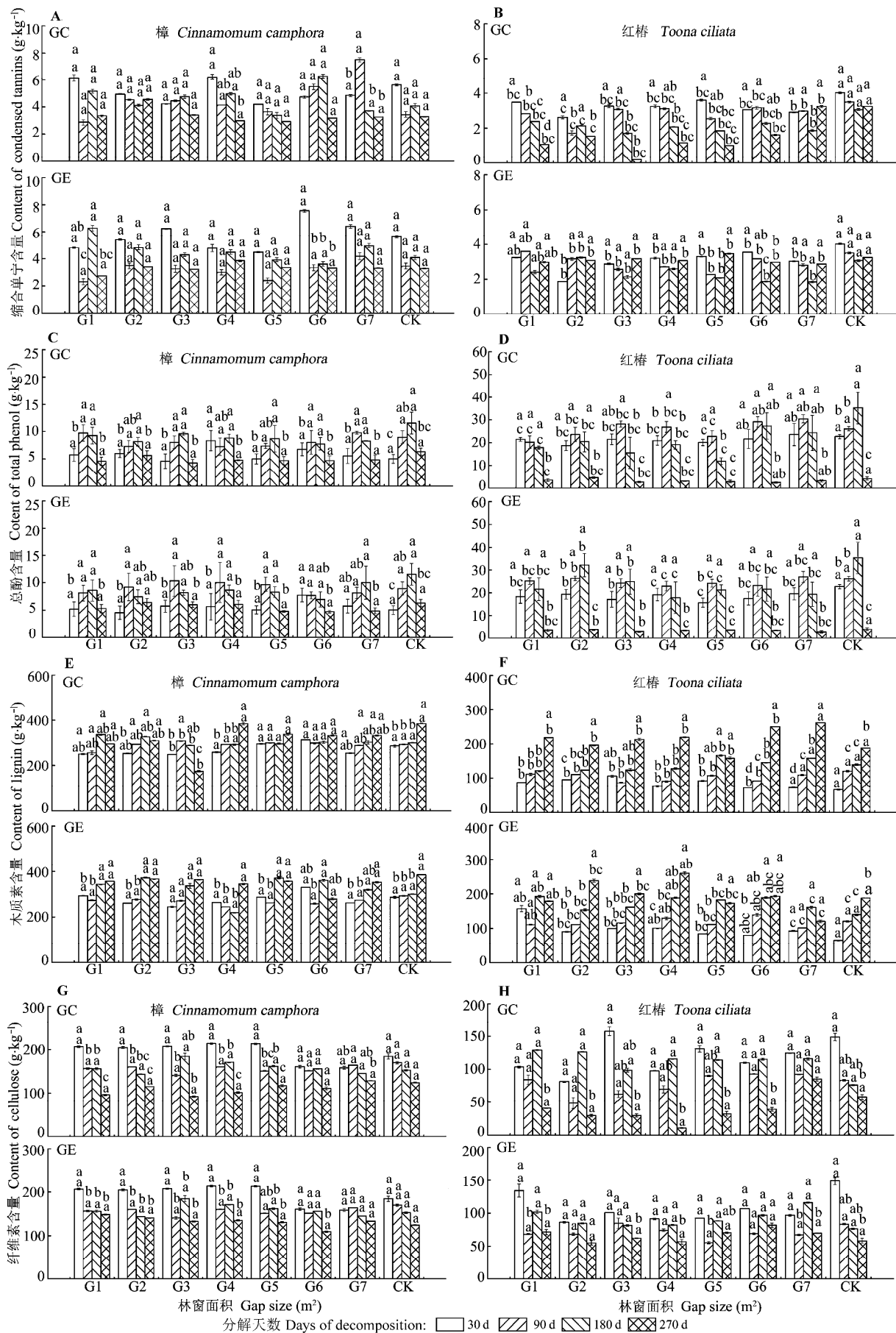
表5 林窗面积、采样时间及交互作用对两种凋落叶难降解物质含量的影响

Table 5 Effects of gap sizes, sampling time, and the interaction of them on the content of litter recalcitrant components for two species

物种 Species	位置 Positions	影响因素 Impact factors	缩合单宁 Condensed tannins		总酚 Total phenol		木质素 Lignin		纤维素 Cellulose	
			$F$	$p$	$F$	$p$	$F$	$p$	$F$	$p$
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	GC	G	1.794	0.117	0.850	0.537	1.565	0.127	1.559	0.176
		T	7.769	<0.01	53.553	<0.01	4.986	<0.01	67.587	<0.01
		G × T	2.331	<0.01	2.260	<0.05	3.377	<0.01	2.760	<0.01
	GE	G	0.825	0.554	0.674	0.671	1.928	0.092	0.464	0.832
		T	14.704	<0.01	31.162	<0.01	13.840	<0.01	9.240	<0.01
		G × T	1.050	0.424	1.324	0.209	1.558	0.105	1.653	0.078
红椿 <i>Toona ciliata</i>	GC	G	2.500	<0.05	6.126	<0.01	15.176	<0.01	0.909	0.495
		T	44.060	<0.01	215.101	<0.01	206.146	<0.01	25.992	<0.01
		G × T	3.360	<0.01	2.581	<0.01	16.608	<0.01	1.165	0.321
	GE	G	1.261	0.290	2.673	0.052	3.639	<0.01	0.795	0.578
		T	13.987	<0.01	196.983	<0.01	49.604	<0.01	7.018	<0.01
		G × T	3.740	<0.01	1.721	0.063	2.433	<0.01	0.393	0.983

GC, 林窗中心; GE, 林窗边缘; G, 林窗面积; T, 采样时间。×, 影响因子之间的交互作用。

G, gap size; GC, gap center; GE, gap edge; T, sampling time. ×, interaction of two factors.



也有极显著的影响(表5)。两种凋落叶中缩合单宁、纤维素含量随着分解时间延长显著降低, 木质素含量持续升高, 总酚含量先升高(分解第30–180天)后降低(图2)。林窗和时间交互作用对林窗中心樟的4种难降解物质含量和红椿中除纤维素外的其他难降解物质含量有显著影响, 而在林窗边缘只对红椿中缩合单宁和木质素含量有显著影响(表5)。

### 2.3 林窗内不同位置及林下两种凋落叶中难降解物质含量的差异

Tukey多重比较结果(表6)表明, 樟凋落叶中只有林窗中心木质素含量显著低于林下, 其余难降解物质含量在林窗中心、林窗边缘和林下均无显著差异; 红椿凋落叶中除纤维素含量, 其他3种难降解物质含量在林窗中心和边缘均显著低于林下。而林窗不同位置只有红椿凋落叶中缩合单宁含量林窗中心显著低于林窗边缘, 其余难降解物质含量和樟凋落叶4种难降解物质含量均无显著差异。

## 3 讨论

本研究表明: 林窗大小对林窗中心红椿凋落叶中缩合单宁、总酚、木质素含量有显著影响, 对纤维素含量无显著影响; 对香樟凋落叶中4种难降解物质含量均无显著影响。其原因可能是: 林窗的形成改变了马尾松人工林的小生境, 而温暖及湿润的

环境因素更有利于酸不溶性组分等难分解的高分子结构体在群落结构丰富且活跃的微生物作用下更快速地降解(刘瑞龙等, 2014; 李晗等, 2015), 林窗面积不同导致林窗中心的光照和降水量不同(Ritter, 2005), 显著影响着不同大小林窗中心凋落叶缩合单宁、总酚、木质素等酸不溶性组分等难分解的高分子物质的降解。而在降解过程中纤维素受到木质素-纤维素复合体的束缚而降解缓慢(Austin & Ballaré, 2010), 以致纤维素的含量变化对不同大小林窗的干扰响应并不显著。随着林窗面积增大, 林窗中心红椿凋落叶纤维素含量无显著变化, 其余3种难降解物质含量中小型林窗(G1–G5)低于大型林窗(G6、G7)。可见, 中小型林窗(G1–G5)较有利于凋落叶中难降解物质的降解。林窗大小实际上是通过调控林窗内环境的变化来影响凋落物中难分解物质分解动态的, 并且这种效应依赖于初始凋落物质量。林窗形成后, 上层林冠疏开, 改变了林下光照辐射条件和气流, 使林窗内的温度和湿度发生变化, 不同大小林窗之间的温度、湿度差异导致林窗之间的微环境差异(Arunachalam & Arunachalam, 2000)。同时, 凋落物中难降解物质的降解主要是分解者缓慢作用的过程。林窗内植被类型由以乔木为主变为以草本为主, 草本植物丰富的根系为微生物提供了较多的能源物质, 有利于土壤微生物的生长与繁殖

表6 马尾松人工林林窗中心、边缘和林下两种凋落叶难降解物质含量的比较(平均值±标准误差)

Table 6 Contents of litter recalcitrant components for two species at gap center, edge and under closed canopy (mean ± SE)

物种 Species	位置 Position	缩合单宁 Condensed tannins (g·kg <sup>-1</sup> )	总酚 Total phenol (g·kg <sup>-1</sup> )	木质素 Lignin (g·kg <sup>-1</sup> )	纤维素 Cellulose (g·kg <sup>-1</sup> )
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	GC	4.431 ± 1.50 <sup>a</sup>	6.896 ± 2.06 <sup>a</sup>	295.056 ± 47.16 <sup>b</sup>	156.247 ± 41.23 <sup>a</sup>
	GE	4.157 ± 1.80 <sup>a</sup>	7.141 ± 2.19 <sup>a</sup>	305.455 ± 60.37 <sup>ab</sup>	155.730 ± 48.89 <sup>a</sup>
	CK	4.140 ± 1.49 <sup>a</sup>	7.266 ± 2.71 <sup>a</sup>	315.632 ± 46.46 <sup>a</sup>	174.366 ± 76.70 <sup>a</sup>
红椿 <i>Toona ciliata</i>	GC	2.369 ± 0.93 <sup>c</sup>	17.308 ± 9.46 <sup>b</sup>	143.995 ± 80.54 <sup>b</sup>	89.303 ± 45.93 <sup>a</sup>
	GE	2.824 ± 0.62 <sup>b</sup>	17.136 ± 9.16 <sup>b</sup>	147.101 ± 52.99 <sup>b</sup>	82.573 ± 30.67 <sup>a</sup>
	CK	3.459 ± 0.50 <sup>a</sup>	22.029 ± 11.79 <sup>a</sup>	186.601 ± 71.29 <sup>a</sup>	91.674 ± 44.52 <sup>a</sup>

CK, 林下对照; GC, 林窗中心; GE, 林窗边缘。同列不同小写字母表示不同位置间差异显著( $p < 0.05$ )。

CK, closed canopy as control; GC, gap center; GE, gap edge. Different lowercase letters in the same column indicate significant differences ( $p < 0.05$ ).

←

图2 不同大小林窗中心、林窗边缘, 樟、红椿凋落叶难降解物质含量动态(平均值±标准误差)。上排不同小写字母表示不同分解阶段之间差异显著( $p < 0.05$ ); 下排不同小写字母表示不同林窗之间差异显著( $p < 0.05$ )。CK、GC、GE、G1、G2、G3、G4、G5、G6、G7分别代表100 m<sup>2</sup>、225 m<sup>2</sup>、400 m<sup>2</sup>、625 m<sup>2</sup>、900 m<sup>2</sup>、1 225 m<sup>2</sup>、1 600 m<sup>2</sup>的林窗。

Fig. 2 Change of recalcitrant components in *Cinnamomum camphora* and *Toona ciliata* foliar litter between gap center and edge (mean ± SE). Different lowercase letters represent significant differences between decomposition periods (upper panel) and gaps (lower panel) ( $p < 0.05$ ). CK, GC, GE, G1, G2, G3, G4, G5, G6, and G7 represent gaps of different sizes in the order of 100 m<sup>2</sup>, 225 m<sup>2</sup>, 400 m<sup>2</sup>, 625 m<sup>2</sup>, 900 m<sup>2</sup>, 1 225 m<sup>2</sup>, and 1 600 m<sup>2</sup>, respectively.

(荣丽等, 2011), 而且相对于大型林窗, 中小型林窗的光照强度和湿度较为适宜, 使得林窗内的环境更适宜土壤动物和微生物生长, 促进凋落物中各组分的分解(郭伟等, 2009; 王成等, 2010); 其次, 面积较大的林窗, 光线可更大程度地照射到地面, 使地表升温, 湿度降低, 从而不利于土壤养分的矿化和养分可利用性的提高, 导致土壤动物和微生物等活性减弱(Denslow & Spies, 1990; Gray *et al.*, 2002)。而且林窗越大, 其地表环境变化越剧烈, 各要素在林窗内部的空间异质性越强(王成等, 2010)。因此, 林窗过大并不利于凋落物中各难降解物质的降解。

相对于林下, 林窗更能接受较充足的光照, 充足的光照能促进土壤动物和微生物活动, 从而促进木质素和纤维素的生物降解(Gallo *et al.*, 2009), 且林下光合作用较弱, 导致高含量的CO<sub>2</sub>抑制了单宁和总酚的降解(Gebauer *et al.*, 1998; Booker & Maier, 2001), 因此林窗内凋落叶难降解物质的降解相对较快。而与降水和光照较充沛的林窗中心相比, 林窗边缘由于受到林冠的遮阴和截流作用导致湿度较低和光照较弱(Ritter, 2005), 不利于难降解物质的降解, 这可能是导致林窗中心缩合单宁含量低于边缘的原因。且林窗边缘由于独特的微环境, 使得林窗边缘植被具有边缘效应, 而林窗大小影响着边缘效应的强度(蔡小英等, 2007)。本研究中随着林窗面积的增大, 林窗边缘红椿凋落叶中木质素含量G1–G6无显著变化, G7显著降低, 其余难降解物质含量无显著变化, 这与林窗中心呈现出不同的变化规律。这可能是因为林窗边缘局部的光照条件改变了局部环境的温、湿度状况, 影响到土壤理化性质, 从而影响凋落物难降解物质的分解(谭辉等, 2007; 何中声等, 2012)。有研究表明光降解能促使木质素中碳的释放, 随着光照的增强, 木质素含量降低且生物降解作用增强(Day *et al.*, 2007), 大型林窗边缘(G7)较充足的光照可能是导致木质素含量较低的主要原因。林窗更新层物种多样性随着年龄逐渐增大(齐代华等, 2001), 而林窗边缘木的特性影响着林窗物种的群落结构、物种的传播和环境因子的变化等, 是衡量林窗边缘效应的一个重要指标, 另外, 边缘木高度和林冠厚度影响着进入到林窗边缘下层的光照(阳含熙和谢海生, 1994), 影响着林窗边缘下层的水热微环境和土壤动物、微生物活动。而本研究中的林窗形成时间较短, 林窗边缘物种多样性不够丰

富, 群落结构简单, 导致不同大小林窗的边缘效应强度差异不显著, 使得不同大小林窗边缘的缩合单宁、总酚和纤维素含量无显著变化。

两种凋落叶相比, 林窗大小对红椿凋落叶中难降解物质含量的变化影响更明显。在不同分解阶段, 林窗内不同位置均表现为: 除总酚外, 樟中其余难降解物质含量均显著高于红椿。而在降解至第270天时, 总酚含量表现出樟显著高于红椿。这应该与凋落叶的基质质量有关。樟和红椿凋落叶物理性质不同, 樟凋落叶厚实宽大、表面的角质层、蜡质层导致凋落叶的透水性能较差, 较硬的质地会影响微生物的分解腐化作用, 降低凋落物的分解速率(田兴军和立石贵浩, 2002; 林波等, 2004)。同时, 樟凋落叶表面的角质层、蜡质层以及较硬的质地都会影响土壤动物对凋落物的粉碎, 从而影响细菌、真菌等微生物在凋落物上的着生、侵入及繁殖, 因此不同大小林窗中樟凋落叶的难降解物质含量无显著差异。红椿凋落叶则因叶片柔软, 叶质较薄, 更易受环境变化的影响, 即使林窗不同位置之间温度差异不大, 缩合单宁和木质素含量也会有明显变化(Jackson *et al.*, 1996)。其次, N和P含量是影响凋落叶分解速率的最重要的变量, 高浓度N和P有利于凋落物分解, 因为N和P是微生物生长繁殖必不可少的营养元素, N和P浓度越高, 微生物的代谢活性越强, 繁殖越快, 凋落物的分解速率随之加快(Polyakova & Billor, 2007; 王意锟等, 2012), 而其C:N高, 耐分解成分也高, 因而分解较慢, 营养释放也慢(Schlesinger & Hasey, 1981; Berendse *et al.*, 1989)。本研究中红椿凋落叶中较高的N、P初始含量以及较低的C:N可能也是导致不同大小林窗红椿凋落叶中4种难降解物质含量降解较樟凋落叶快的主要原因。

樟和红椿凋落叶中缩合单宁、纤维素含量都表现出随分解时间的延长不断降低, 木质素含量不断升高, 总酚含量先升高后降低的趋势。纤维素酶活性高于木质素酶活性, 可先于木质素被微生物降解和被土壤动物摄食(Berg *et al.*, 2000; Fioretto *et al.*, 2005), 所以纤维素损失较快。而木质素与凋落物中的蛋白质形成复杂的物质, 是凋落物中最难降解的组分(Taylor *et al.*, 1989; Austin & Ballaré, 2010; Godoy *et al.*, 2010), 能阻碍分解者活动。因而纤维素含量在4个分解时期表现出缓慢下降的趋势, 木质素



含量则表现出富集而呈缓慢上升的趋势(Klotzbücher *et al.*, 2011)。植物体的总酚与纤维素的形成与碳紧密相关, 而木质素是醇单体聚合物, 缩合单宁是黄烷聚合物。有研究显示: 缩合丹宁在温暖、湿润的环境中分解明显快于在寒冷、干燥的环境中(Chen, 1999)。本研究中, 秋、冬季(第一、二次采样)后气温开始回升, 林窗内蒸腾作用增强导致凋落物含水率降低, 致使植物体中碳水化合物的分配发生了改变, 用于形成酚类化合物的碳源不足, 导致纤维素、缩合单宁和总酚的量明显降低(Shure *et al.*, 1998; Lin *et al.*, 2006), 且此时土壤动物、微生物活动减弱, 不利于难降解物质的降解。因此, 樟和红椿凋落叶中除木质素外, 其他3种难降解物质含量在第4次采样时含量均显著降低。有研究表明: 总酚在植物叶片凋落后即通过淋溶作用缓慢降解, 在分解一段时间后, 总酚的性质基本保持稳定不变(Parfitt & Newman, 2000), 而后期又通过生物降解迅速流失(Lin *et al.*, 2006), 所以总酚含量随着分解时间延长而表现为先升高后降低的趋势。

综上所述, 不同大小林窗对林窗内樟和红椿凋落叶中难降解物质含量产生了不同的影响。本研究中, 中小型林窗(G1-G5)较有利于樟和红椿凋落叶中难降解物质的降解, 林窗内空间异质性和环境变化是调控凋落物中难分解物质分解动态的主要因子, 并且这种效应还依赖于初始凋落物的结构和质量。因此, 在马尾松人工林改造过程中, 可利用中小型林窗(100-900 m<sup>2</sup>)能促进凋落物中难降解物质降解的显著作用, 引入阔叶树种樟和红椿营造混交林, 促进马尾松人工林难降解物质的降解和循环, 维持林地内元素平衡。

**基金项目** 国家自然科学基金(31370628)、国家科技支撑计划项目(2011BAC09B05)、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)和四川省教育厅科技创新团队计划项目(11TD006)。

**致谢** 感谢四川农业大学吴福忠、刘洋老师和王珂、刘华等同学在实验方面对本文作者提供的帮助与指导。

## 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.

- Austin AT, Ballaré CL (2010). Dual role of lignin in plant litter decomposition in terrestrial ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107, 4618-4622.
- Berendse F, Bobbink R, Rouwenhorst G (1989). A comparative study on nutrient cycling in wet heathland ecosystems. II. Litter decomposition and nutrient mineralization. *Oecologia*, 78, 338-348.
- Berg B, Johansson MB, Meentemeyer V (2000). Litter decomposition in a transect of Norway spruce forests: Substrate quality and climate control. *Canadian Journal of Forest Research*, 30, 1136-1147.
- Berg B, Lundmark JE (1987). Decomposition of needle litter in lodgepole pine and Scots pine monocultures—A comparison. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2, 3-12.
- Booker FL, Maier CA (2001). Atmospheric carbon dioxide, irrigation, and fertilization effects on phenolic and nitrogen concentrations in loblolly pine (*Pinus taeda*) needles. *Tree Physiology*, 21, 609-616.
- Cai XY, Fan HL, Hong T, Hong W, Wu CZ, Wang PL, Wang HC, Lin QQ (2007). Edge effect of gaps in *Cunninghamia lanceolata* plantation in Ancaoxia, Fujian Province. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 15, 229-236. (in Chinese with English abstract) [蔡小英, 范海兰, 洪滔, 洪伟, 吴承祯, 王萍兰, 王洪翠, 林琴琴 (2007). 福建安曹下丰产杉木人工林林窗边缘效应的研究. 热带亚热带植物学报, 15, 229-236.]
- Chen H (1999). *Root Decomposition in Three Coniferous Forests: Effects of Substrate Quality, Temperature, and Moisture*. PhD dissertation, Oregon State University, Spokane, USA.
- Couteaux MM, Bottner P, Berg B (1995). Litter decomposition, climate and litter quality. *Trends in Ecology & Evolution*, 10, 63-66.
- Cui NJ, Liu Y, Zhang J, Yang WQ, Ou J, Zhang J, Deng CC, Li JP (2014). Effects of forest gap on plant diversity of *Pinus massoniana* plantations. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 20, 8-14. (in Chinese with English abstract) [崔宁洁, 刘洋, 张健, 杨万勤, 欧江, 张捷, 邓长春, 李建平 (2014). 林窗对马尾松人工林植物多样性的影响. 应用与环境生物学报, 20, 8-14.]
- Day TA, Zhang ET, Ruhland CT (2007). Exposure to solar UV-B radiation accelerates mass and lignin loss of *Larrea tridentata* litter in the Sonoran Desert. *Plant Ecology*, 193, 185-194.
- Denslow JS, Spies T (1990). Canopy gaps in forest ecosystems: An introduction. *Canadian Journal of Forest Research*, 20, 619.
- Duan WB, Wang J, Li Y (2008). Micro climatic characteristics of different size gaps in *Pinus koraiensis*-dominated broad leaved mixed forests. *Chinese Journal of Applied Ecology*,

- 19, 2561–2566. (in Chinese with English abstract) [段文标, 王晶, 李岩 (2008). 红松阔叶混交林不同大小林隙小气候特征. *应用生态学报*, 19, 2561–2566.]
- Feng ZW, Cao HF, Zhou XP (1999). *Effects of Acid Deposition on Ecological Environment and Its Restoration*. China Environmental Science Press, Beijing. 300–312. (in Chinese) [冯宗炜, 曹洪法, 周修萍 (1999). 酸沉降对生态环境的影响及其生态恢复. 中国环境科学出版社, 北京. 300–312.]
- Fioretto A, Di Nardo C, Papa S, Fuggi A (2005). Lignin and cellulose degradation and nitrogen dynamics during decomposition of three leaf litter species in a Mediterranean ecosystem. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 1083–1091.
- 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 understorey 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.
- Gebauer RLE, Strain BR, Reynolds JF (1998). The effect of elevated CO<sub>2</sub> and N availability on tissue concentrations and whole plant pools of carbon-based secondary compounds in loblolly pine (*Pinus taeda*). *Oecologia*, 113, 29–36.
- Graça MAS, Bärlocher F, Gessner MO (2005). *Methods to Study Litter Decomposition: A Practical Guide*. Springer, The Netherlands. 97–120.
- Gray AN, Spies TA, Easter MJ (2002). Microclimatic and soil moisture responses to gap formation in coastal Douglas-fir forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 32, 332–343.
- Godoy O, Castro-Díez P, van Logtestijn RSP, Cornelissen JHC, Valladares F (2010). Leaf litter traits of invasive species slow down decomposition compared to Spanish natives: A broad phylogenetic comparison. *Oecologia*, 162, 781–790.
- Guo W, Zhang J, Huang YM, Liu X, Wang W, Xue L (2009). Research progress on the influencing factors of forest litter. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 37, 1544–1546. (in Chinese with English abstract) [郭伟, 张健, 黄玉梅, 刘旭, 王伟, 薛林 (2009). 森林凋落物影响因子研究进展. *安徽农业科学*, 37, 1544–1546.]
- Hatakka A (2001). Biodegradation of lignin. In: Steinbüchel A, Hofrichter M eds. *Biopolymers: Biology, Chemistry, Biotechnology, Applications, Vol. 1. Lignin, Humic Substances and Coal*. Wiley-VCH, Weinheim, Germany. 129–180.
- He YT, Li GC, Cao M, Tang Y (2003). Regeneration in gaps of the middle-mountain moist evergreen broad-leaved forest of Ailao Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 14, 1399–1404. (in Chinese with English abstract) [何永涛, 李贵才, 曹敏, 唐勇 (2003). 哀牢山中山湿性常绿阔叶林林窗更新研究. *应用生态学报*, 14, 1399–1404.]
- He ZS, Liu JF, Wu CT, Zheng SQ, Hong W, Su SJ, Wu CZ (2012). Effects of forest gaps on some microclimate variables in *Castanopsis kawakamii* natural forest. *Journal of Mountain Science*, 9, 706–714.
- He ZS, Liu JF, Zheng SQ, Su SJ, Hong W, Wu ZY, Xu DW, Wu CZ (2012). Studies on the seeds dispersal and seedlings regeneration in gaps and understory of *Castanopsis kawakamii* natural forest. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 20, 506–512. (in Chinese with English abstract) [何中声, 刘金福, 郑世群, 苏松锦, 洪伟, 吴则焰, 徐道炜, 吴承祯 (2012). 格氏栲天然林林窗和林下种子散布及幼苗更新研究. *热带亚热带植物学报*, 20, 506–512.]
- Hu FJ, Zhang J, Yang WQ, Wu FZ, Liu Y, Liu K, Yan BG, Huang X (2012). Effects of Pb stress on the growth, development and Pb enrichment properties of *Toona ciliata* Roem saplings. *Journal of Agro-Environment Science*, 31, 284–291. (in Chinese with English abstract) [胡方洁, 张健, 杨万勤, 吴福忠, 刘洋, 刘凯, 闫邦国, 黄旭 (2012). Pb胁迫对红椿(*Toona ciliata* Roem)生长发育及Pb富集特性的影响. *农业环境科学学报*, 31, 284–291.]
- Hu R, Lin B, Liu Q (2011). Effects of forest gaps and litter on the early regeneration of *Picea asperata* plantations. *Scientia Silvae Sinicae*, 47(6), 23–29. (in Chinese with English abstract) [胡蓉, 林波, 刘庆 (2011). 林窗与凋落物对人工云杉林早期更新的影响. *林业科学*, 47(6), 23–29.]
- Jackson FS, Barry TN, Lascano C, Palmer B (1996). The extractable and bound condensed tannin content of leaves from tropical tree, shrub and forage legumes. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 71, 103–110.
- Kähkönen MP, Hopia AI, Vuorela HJ, Rauha JP, Pihlaja K, Kujala TS, Heinonen M (1999). Antioxidant activity of plant extracts containing phenolic compounds. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 47, 3954–3962.
- Klotzbücher T, Kaiser K, Guggenberger G, Gatzek C, Kalbitz K (2011). A new conceptual model for the fate of lignin in decomposing plant litter. *Ecology*, 92, 1052–1062.
- Landsberg JJ (1987). A theory of forest dynamics, the ecological implications of forest succession models. *Forest Ecology and Management*, 18, 161–163.
- Li H, Wu FZ, Yang WQ, Xu LY, Ni XY, He J, Chang CH (2015). Effects of the snow cover on acid-soluble extractive and acid-insoluble residue during foliar litter decomposition in an alpine forest. *Acta Ecologica Sinica*, 35, 1–15. (in Chinese with English abstract) [李晗, 吴福忠, 杨万勤, 徐李亚, 倪祥银, 何洁, 常晨晖 (2015). 不同厚度雪被对高山森林6种凋落物分解过程中酸溶性和酸不溶性组分的影响. *生态学报*, 35, 1–15.]

- Lin B, Liu Q, Wu Y, He H (2004). Advances in the studies of forest litter. *Chinese Journal of Ecology*, 23, 60–64. (in Chinese with English abstract) [林波, 刘庆, 吴彦, 何海 (2004). 森林凋落物研究进展. 生态学报, 23, 60–64.]
- Lin YM, Liu JW, Xiang P, Lin P, Ye GF, Da Sternberg LSL (2006). Tannin dynamics of propagules and leaves of *Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza* in the Jiulong River Estuary, Fujian, China. *Biogeochemistry*, 78, 343–359.
- Li Q, Cheng X, Jiang T, Xu ZQ (2012). Review on studies of forest litter decomposition. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research*, 27, 396–401. (in Chinese with English abstract) [李强, 程旭, 姜韬, 许中旗 (2012). 森林凋落物分解研究进展. 河北林果研究, 27, 396–401.]
- Liu Q, Wu Y (2002). Effects of gap size on regeneration of subalpine coniferous forests in northwest Yunnan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 8, 453–459. (in Chinese with English abstract) [刘庆, 吴彦 (2002). 滇西北亚高山针叶林林窗大小与更新的初步分析. 应用与环境生物学报, 8, 453–459.]
- Liu RL, Yang WQ, Wu FZ, Tan B, Wang WJ (2014). Soil fauna community structure and diversity during foliar litter decomposition in the subalpine/alpine forests of western Sichuan. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 20, 499–507. (in Chinese with English abstract) [刘瑞龙, 杨万勤, 吴福忠, 谭波, 王文君 (2014). 川西亚高山/高山森林凋落物分解过程中土壤动物群落结构及其多样性动态. 应用与环境生物学报, 20, 499–507.]
- Liu WJ, Li QJ, Zhang GM, Shi JP, Bai KJ, Wang CM (2000). The microclimatic differences between and within canopy gaps in the dry-hot season in *Shorea chinensis* forest. *Acta Ecologica Sinica*, 20, 932–937. (in Chinese with English abstract) [刘文杰, 李庆军, 张光明, 施季普, 白坤甲, 王昌命 (2000). 西双版纳望天树林干热季不同林窗间的小气候差异. 生态学报, 20, 932–937.]
- Li ZY, Wang YH, Yu PT, Zhang ZJ (2007). A comparative study of resistance to soil acidification and growth of fine roots between pure stands of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora*. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 5245–5253. (in Chinese with English abstract) [李志勇, 王彦辉, 于澎涛, 张治军 (2007). 马尾松和香樟的抗土壤酸化能力及细根生长的差异. 生态学报, 27, 5245–5253.]
- McLaugherty CA (1983). Soluble polyphenols and carbohydrates in throughfall and leaf litter decomposition. *Acta Oecologica Oecologia Generalis*, 4, 375–385.
- Muscolo A, Sidari M, Mercurio R (2007). Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine (*Pinus laricio*, Poir.) stands. *Forest Ecology and Management*, 242, 412–418.
- Parfitt RL, Newman RH (2000).  $^{13}\text{C}$  NMR study of pine needle decomposition. *Plant and Soil*, 219, 273–278.
- Polyakova O, Billor N (2007). Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands. *Forest Ecology and Management*, 253, 11–18.
- Qi DH, Li XG, Wang ZP, Shi SY, He ZM, Xu WW, Deng XB (2001). Preliminary research on species diversity change of the regeneration layer in gap gradient in a coniferous-broadleaved forest in Jinyun Mountain. *Biodiversity Science*, 9, 51–55. (in Chinese with English abstract) [齐德华, 李旭光, 王周平, 石胜友, 何正明, 许文蔚, 邓先宝 (2001). 缙云山针阔混交林更新层物种多样性林隙梯度变化初探. 生物多样性, 9, 51–55.]
- Rahman MM, Tsukamoto J, Rahman M, Yoneyama A, Mostafa KM (2013). Lignin and its effects on litter decomposition in forest ecosystems. *Chemistry and Ecology*, 29, 540–553.
- Ritter E (2005). Litter decomposition and nitrogen mineralization in newly formed gaps in a Danish beech (*Fagus sylvatica*) forest. *Soil Biology & Biochemistry*, 37, 1237–1247.
- Rong L, Li SJ, Li XW, Zhang J, Wang P (2011). Carbon dynamics of fine root (grass root) decomposition and active soil organic carbon in various models of land use conversion from agricultural lands into forest lands. *Acta Ecologica Sinica*, 31, 137–144. (in Chinese with English abstract) [荣丽, 李守剑, 李贤伟, 张健, 王鹏 (2011). 不同退耕模式细根(草根)分解过程中C动态及土壤活性有机碳的变化. 生态学报, 31, 137–144.]
- Schlesinger WH, Hasey MM (1981). Decomposition of chaparral shrub foliage: Losses of organic and inorganic constituents from deciduous and evergreen leaves. *Ecology*, 62, 762–774.
- Shure DJ, Mooreside PD, Ogle SM (1998). Rainfall effects on plant-herbivore processes in an upland oak forest. *Ecology*, 79, 604–617.
- Swift MJ, Heal OW, Anderson JM (1979). *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. University of California Press, Berkeley, USA.
- Tan H, Zhu JJ, Kang HZ, Hu LL (2007). A research review on forest gap disturbance. *Chinese Journal of Ecology*, 26, 587–594. (in Chinese with English abstract) [谭辉, 朱教君, 康宏樟, 胡理乐 (2007). 林窗干扰研究. 生态学报, 26, 587–594.]
- Taylor BR, Parkinson D, Parsons WFJ (1989). Nitrogen and lignin content as predictors of litter decay rates: A microcosm test. *Ecology*, 70, 97–104.
- Tian XJ, Takeishi T (2002). Relative roles of microorganisms and soil animals on needle litter decomposition in a subalpine coniferous forest. *Acta Phytocologica Sinica*, 26, 257–263. (in Chinese with English abstract) [田兴军,

- 立石贵浩 (2002). 亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶分解的作用. *植物生态学报*, 26, 257–263.]
- Wang C, Pang XY, Bao WK (2010). Short term effects of low intensity thinning simulated by gap on ground microclimate and soil nutrients of pure spruce plantation. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 21, 541–548. (in Chinese with English abstract) [王成, 庞学勇, 包维楷 (2010). 低强度林窗式疏伐对云杉人工纯林地表微气候和土壤养分的短期影响. *应用生态学报*, 21, 541–548.]
- Wang JH, Li JD (2006). Advances in study on forest gaps. *World Forestry Research*, 19(1), 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(1), 27–30.]
- Wang YK, Fang SZ, Qu HH, Tang LZ, Song H (2012). The influence factors of forest litter decomposition. *China Forestry Science and Technology*, 26, 5–9. (in Chinese with English abstract) [王意锟, 方升佐, 曲宏辉, 唐罗忠, 宋浩 (2012). 森林凋落物分解的影响因素. *林业科技开发*, 26, 5–9.]
- Wu YQ, Guo YY (2000). Determination of tannin in cotton plant. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 11, 243–245. (in Chinese with English abstract) [武予清, 郭予元 (2000). 棉花植株中的单宁测定方法研究. *应用生态学报*, 11, 243–245.]
- Xu LY, Yang WQ, Li H, Ni XY, He J, Wu FZ (2014). Effects of forest gap on soluble nitrogen and soluble phosphorus of foliar litter decomposition in an alpine forest. *Journal of Soil and Water Conservation*, 28, 214–221. (in Chinese with English abstract) [徐李亚, 杨万勤, 李晗, 倪祥银, 何洁, 吴福忠 (2014). 高山森林林窗对凋落物分解过程中水溶性氮和磷的影响. *水土保持学报*, 28, 214–221.]
- Yang HX, Xie HS (1994). Study on the reconstruction of disturbance history of *Pinus koraiensis* mixed forest Changbai Mountain. *Acta Phytoecologica Sinica*, 18, 201–208. (in Chinese with English abstract) [阳含熙, 谢海生 (1994). 长白山红松混交林干扰历史的重构研究. *植物生态学报*, 18, 201–208.]

责任编辑: 程 磊 责任编辑: 王 葳