

林窗大小对马尾松和樟凋落叶质量损失的影响*

李 勋¹ 崔宁洁⁴ 张 健^{1,2,3**} 刘 洋¹ 张 艳¹ 邓长春¹ 张明锦¹ 刘 华¹

¹四川农业大学林学院生态林业研究所 成都 611130

²生态林业工程重点实验室 成都 611130

³长江上游生态安全协同创新中心 成都 611130

⁴四川省林业勘察设计研究院 成都 611130

摘 要 林窗在人工林林分结构优化和调整上具有重要价值。为了解林窗面积对凋落物分解是否有显著影响以及哪种面积林窗下凋落物分解更快,以采伐形成的42年生的马尾松 (*Pinus massoniana*) 人工林7种不同大小的林窗 (G1, 100 m²; G2, 225 m²; G3, 400 m²; G4, 625 m²; G5, 900 m²; G6, 1 225 m²; G7, 1 600 m²) 为研究对象,以林下为对照,采用凋落袋分解实验,探讨不同林窗面积对马尾松 (*Pinus massoniana*) 和樟 (*Cinnamomum camphora*) 凋落叶分解的影响。结果表明: 1) 林窗面积对凋落叶的分解具有显著 ($P < 0.05$) 影响,即Olson经典分解模型拟合凋落叶质量损失的分解系数 k 值比较,马尾松为 $G4 > G1 > CK > G2 > G3 > G5 > G6 > G7$,樟为 $G2 > G4 > G1 > CK > G5 > G6 > G7 > G3$ 。可见中型 (G4: 625 m²) 林窗下马尾松和樟的质量损失率高于其它林窗和林下。2) 马尾松和樟凋落叶 (每30天) 质量损失速率都表现出先升高 (0-90 d) 后降低的趋势。分解一年后,两种凋落叶在3个孔径凋落袋内的质量损失率比较,马尾松为 $0.04 \text{ mm} (35\%) < 0.5 \text{ mm} (43\%) < 3 \text{ mm} (51\%)$,樟为 $0.04 \text{ mm} (42\%) < 0.5 \text{ mm} (49\%) < 3 \text{ mm} (60\%)$,两者的分解95%的平均时间分别为马尾松4.35年和樟3.60年。可见樟凋落叶比马尾松凋落叶分解得更快。综上,林窗面积对凋落物分解有显著影响,在马尾松低效林改造过程中,可利用中型林窗这一显著作用,引入乡土阔叶树种樟,加速马尾松人工林的物质循环,维持林分地力。(图2 表6 参52)

关键词 质量损失; 凋落叶分解; 林窗; 马尾松; 樟; 马尾松人工林

CLC Q148

Mass loss of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* leaf litter in forest gaps of different size*

LI Xun¹, CUI Ningjie¹, ZHANG Jian^{1,2,3**}, LIU Yang¹, ZHANG Yan¹, DENG Changchun¹, ZHANG Mingjin¹ & LIU Hua¹

¹Institute of Ecology & Forestry, College of Forestry, Sichuan Agriculture University, Chengdu 611130, China

²Key Laboratory of Forestry Ecological Engineering in Sichuan, Chengdu 611130, China

³Collaborative Innovation center of Ecological Security in the Upper Reaches of Yangtze River, Chengdu 611130, China

⁴Sichuan Forestry Inventory and Planning Institute, Chengdu 611130, China

Abstract Forest gap plays an important role in optimizing and adjusting the structure of plantation. However, researchers are not clear whether the gap size affects mass loss, or which gap size contributes more to litter decomposition. This research set up a field litterbag experiment to study the effects of different forest gap size on mass loss of *Pinus massoniana* (*Pm*) and *Cinnamomum camphora* (*Cc*) leaf litter. The *Pm* plantation was thinned to establish seven different 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); closed canopy was used as the control. The results showed 1) the forest gap size had significant effect on mass loss of *Pm* and *Cc*, with the k value of Olson decomposition model as $G4 > G1 > CK > G2 > G3 > G5 > G6 > G7$ in *Pm*, and $G2 > G4 > G1 > CK > G5 > G6 > G7 > G3$ in *Cc*. Compared with small and large forest gaps, those of medium sized (G4) promoted the mass loss rate of *Cc* and *Pm*. 2) In both *Pm* and *Cc*, the mass loss rate (per 30 days) first increased and then decreased in the 90-day period. After one year decomposition, the mass loss rate in 3 mesh sizes was $0.04 \text{ mm} (35\%) < 0.5 \text{ mm} (43\%) < 3 \text{ mm} (51\%)$ in *Pm*, and $0.04 \text{ mm} (42\%) < 0.5 \text{ mm} (49\%) < 3 \text{ mm} (60\%)$ in *Cc*. The 95% decomposition time was 3.6 years for *Cc* and 4.35 years for *Pm*, showing a higher mass loss rates (per 30

收稿日期 Received: 2015-07-16 接受日期 Accepted: 2015-08-17

*国家自然科学基金项目 (31370628)、国家科技支撑计划项目 (2011BAC09B05)、四川省科技支撑计划项目 (2013SZ0067、2011SZ0239)、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) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (31370628), the Key Sci-tech Project of China (2011BAC09B05), the Sci-tech Project of Sichuan (2013SZ0067, 2011SZ0239), the Project of Applied & Basic Research of Science and Technology Department of Sichuan (2012JY0047), the Science and Technology Innovation Team Program of Sichuan Provincial Department of Education (11TD006)

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

days) in *Pm* than in *Cc*. The results indicated that forest gap size has significant effect on mass loss rate of *Pm* and *Cc* leaf litter. In reconstructing low-function forest, we can take advantage of medium-sized gaps and introduce native broad-leaf tree species *Cc* to accelerate nutrient cycling and maintain the soil fertility of *Pm* plantations.

Keywords mass loss; litter decomposition; forest gap; *Pinus massoniana*; *Cinnamomum camphora*; *Pinus massoniana* plantation

凋落物分解是森林生态系统物质循环与能量流动的关键环节^[1]。凋落物在维持土壤肥力保证植物再生生长养分的可利用性中起着重要作用^[2-3]，同时凋落物分解在维持林地生态系统生产力、净碳储量、土壤有机质的形成以及群落演替等方面具有不可替代的作用^[4-5]，也是生态系统物质循环和能量转换的主要途径。研究表明，凋落物分解受到温度、降水等环境因子以及凋落物质量的调控，同时土壤生物群落对凋落物分解也具有重要贡献^[6-7]。

马尾松具有耐旱瘠薄、适应能力强等特点，是我国长江上游低山丘陵区退耕还林的主要树种。由于长期采取单一树种纯林经营模式，林地出现地力衰退、森林生产力下降、物种多样性锐减、生态功能下降等现象^[8]。目前，急需对长江上游现有的低效马尾松人工林林分结构进行调控，使其恢复生态系统功能，发挥生态效益。近年来，国内外关于马尾松低效人工林改造在营造混交林等方面已有较多报道^[9-10]。采伐形成的林窗在人工林林分结构优化和调整上具有重要价值。与马尾松纯林相比，针阔混交林不仅能增加林地抗病防虫，阔混交林还能显著增加有机质和土壤养分，防止地力衰退^[11]。林窗的形成，导致林窗内的光环境、微地形、温湿度和土壤理化性质等发生变化，因此林窗形状、大小及位置的不同，表现出不同的微环境特征^[12]。国外有关林窗的研究主要涉及林窗的形成、林窗对森林群落的组成和动态的影响^[13-15]，天然林或次生林林窗特征^[16-17]及环境因子特征^[18-20]等。林窗的形成会影响光照强度和水分，同时也会影响土壤动物和微生物的群落结构和多样性^[21-22]。但哪种林窗面积下凋落物分解更快，目前还没有明确的结论。因此，本研究以四川宜宾来复镇马尾松人工林7个不同面积林窗为研究对象，通过引种乡土阔叶树种樟，形成斑块状混交人工林，探讨不同大小林窗下针叶（马尾松）和阔叶（樟）凋落叶一年的分解特征，以及凋落袋孔径大小对凋落叶有多大影响，旨在为深入认识人工林生态系统物质循环过程，探索马尾松人工纯林的林窗改造效应，提高其整体服务功能提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

四川省宜宾市高县来复镇林区位于四川盆地南缘，高县北部（104°21′-104°48′E，28°11′-28°47′N），地处川云公路中段，宜高路、来沙路在此交汇，海拔高度410-560 m。研究区域属于中亚热带湿润季风气候，雨量充沛，雨热同季；最高气温40.3℃，最低气温-3.7℃，年均气温18.1℃，月均温≥10℃的有278 d，年积温5 881.3℃；年均降水量1 070.4 mm，相对湿度81%，无霜期360 d，全年日照时数1 148 h。

研究区域主要的森林类型是马尾松人工林，郁闭度0.7左右，林下植被盖度约30%，主要灌木有栎栎（*Quercus serrata*）、黄荆（*Vitex negundo*）、黄牛奶（*Symplocos laurina*）、梨叶悬钩子（*Rubus pirifolius*）、野桐（*Mallotus japonicus*）、展毛野牡丹（*Melastoma normale*）等；主要草本有商陆（*Phytolacca acinosa*）、淡竹叶（*Lophatherum gracile*）、蕨（*Pteridium aquilinum*）、马唐（*Digitaria sanguinalis*）、芒（*Miscanthus sinensis*）、芒萁（*Dicranopteris dichotoma*）、皱叶狗尾草（*Setaria plicata*）等。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2011年8月，对试验区域内的植物多样性、土壤理化性质、林分结构等进行初步调查。根据样地调查结果，于2011年10月在试验区选择林地质量相近、林分密度相同的马尾松人工纯林进行采伐，形成7种大小不等、形状近似正方形的林窗各3个（面积分别为：G1, 100 m²；G2, 225 m²；G3, 400 m²；G4, 625 m²；G5, 900 m²；G6, 1 225 m²；G7, 1 600 m²），林窗边界间距大于10 m。未砍伐的纯林作为林下对照（CK），林下、林窗都设置3个重复。样地基本情况见表1。

1.2.2 实验设计与样品处理 2013年10月，在研究地的马尾松林群落内收集新鲜的马尾松和樟凋落叶，将样品带回室内风干，然后分别称取10 g叶片，装入不同孔径的分解袋（20 cm × 20 cm），分解袋采用上层0.04 mm（基本排除土壤动物进

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 *Pinus massoniana* plantations of different gap size

林窗 Forest gap	面积 Area (A/m ²)	pH	土壤全碳 TC (w/g kg ⁻¹)	土壤全氮 TN (w/g kg ⁻¹)	土壤容重 Bulk density (w/g cm ⁻³)	土壤最大持水量 Maximum moisture capacity (w/g kg ⁻¹)	海拔 Altitude (h/m)	坡度 Slope (a/°)	坡向 Aspect
林下对照 CK	-	4.6 ± 0.2	13.77 ± 4.08	0.66 ± 0.22	1.41 ± 0.04	363.0 ± 54.7	427	23	SE
G1	100	4.1 ± 0.1	10.67 ± 3.99	0.60 ± 0.21	1.40 ± 0.14	435.5 ± 40.3	423	24.5	SW
G2	225	4.2 ± 0.3	12.05 ± 3.51	0.58 ± 0.12	1.20 ± 0.09	393.7 ± 31.9	438	26	SE
G3	400	4.2 ± 0.2	10.90 ± 0.76	0.56 ± 0.06	1.28 ± 0.08	394.1 ± 65.1	408	23.5	SE
G4	625	4.1 ± 0.1	10.24 ± 1.47	0.53 ± 0.15	1.35 ± 0.11	326.1 ± 68.2	424	24	SE
G5	900	4.3 ± 0.2	12.44 ± 1.21	0.67 ± 0.12	1.41 ± 0.11	388.1 ± 75.1	441	21.5	S
G6	1225	4.4 ± 0.3	16.58 ± 1.54	0.60 ± 0.05	1.31 ± 0.17	416.2 ± 32.9	418	27	SE
G7	1600	4.0 ± 0.1	9.10 ± 1.37	0.53 ± 0.12	1.29 ± 0.26	326.6 ± 21.1	430	26	SE

入)、0.5 mm (基本排除大型土壤动物进入)和3 mm (允许所有土壤动物进入),下层面均采用0.04 mm孔径尼龙网袋作为分解袋进行试验。另外,分别取相同质量(10 g)风干的马尾松和樟凋落叶9袋在65℃下烘干至恒量,由其推算出网袋内样品的初始干质量。2013年11月17日,分别在人为采伐形成的马尾松(*Pinus massoniana*)人工林7种不同大小林窗以及林下放置0.04 mm、0.5 mm、3 mm孔径的马尾松和樟凋落叶分解袋各120袋,即总袋数为2物种×3重复×(7林型+1林下对照)×5次取样×3孔径=720个凋落物袋。且在对照和每个林窗下调落物袋中分别装设1个纽扣温度记录器(iButton DS1921G, Maxim Com. USA),每个面积林窗设置3个重复,每2 h自动记录一次温度。分别于2013年12月17日、2014年2月17日、2014年5月17日、2014年8月17日、2014年11月17日收集凋落物袋,每次从每个样点内取回马尾松和樟3种孔径分解袋各3袋。将收集的分解袋迅速带回室内,先将袋外泥土去除,然后将袋内分解基质全部取出放置于解剖盘中,之后清除凋落叶上的泥土,将凋落物置65℃下烘干至恒量并称重。

1.2.3 凋落物初始基质质量 将样品中其他凋落物和石子剔除后于65℃烘干后称重以计算残留量^[23],土壤含水量采用铝合烘干法测定(105℃,24 h)。其他初始含量测定方法:全碳—重铬酸钾加热法(GB7657-87);全氮—凯氏定氮法(LY/T1269-1999);可溶性有机碳(DOC)—TOC分析仪(multi N/C 2100, AnalytikJena)^[24-25];木质素和纤维素—范氏(Van Soest)洗涤纤维法^[26]。

两种凋落叶的基本养分和难降解物质的初始含量见表2,马尾松凋落叶C、N、DOC、DOC/C初始值均低于樟凋落叶,而C/N、木质素和纤维素的初始值则明显高于樟凋落叶。

1.2.4 数据处理和统计分析各孔径内凋落物的绝对失重率(L_t)、(每30天)质量损失速率(V_t)计算^[23,27]:

$$L_t = (M_{t-1} - M_t) / X_0 \times 100\%$$

$$V_t = (M_{t-1} - M_t) / D_{\Delta t} \times 30$$

采用修正的Olson指数衰减模型^[28-29]计算凋落叶分解系

$$数k: y = ae^{-kt}$$

式中: M_{t-1} 为前一次凋落物残留量; M_t 为当次凋落物残留量; X_0 为凋落物初始质量; $D_{\Delta t}$ 为相邻采样时间间隔天数; y 为凋落物经时间 t 后的残留率(%); k 为凋落物分解常数; a 为修正系数; t 为分解时间。

采用SPSS 20.0和Excel软件作统计分析,用origin8.5软件作图,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)多重比较不同大小林窗对不同孔径凋落袋内两种凋落叶的质量损失率的影响,以及不同分解阶段质量损失速率的影响。

2 结果与分析

2.1 分解温度、湿度动态

由表3可知:1)时间上,凋落物日均温与不同季节气温变化规律相同。即从2013年11月开始逐渐降低,12月达到最低温度,之后开始上升,次年5-8月中旬达到采样期间的最高温度。2)总体上看,不同面积林窗之间的日均温无显著差异。即除了2014年2月-11月各林窗日均温高于林下以及G4、G6林窗温度高于其他林窗外,不同面积林窗之间温度无显著差异。各林窗土壤含水率(表4)表明:1)时间上,土壤含水率受不同季节降雨量影响。即2013年11月-2014年2月最低,3-5月开始升高,5-11月达到最高值。2)总体上看,土壤含水率随林窗面积增大,先升高后降低。即中型林窗(G3、G4、G5)>大型林窗(G6、G7)>小型林窗和林下(CK、G1、G2)。降雨主要集中在2014年的3月和5-10月(图1)。

2.2 凋落袋孔径对凋落叶质量损失率的影响

计算可知,经过一年的分解,不同孔径凋落物分解袋内凋落叶的平均质量损失率分别为马尾松0.04 mm (35%)<0.5 mm (43%)<3 mm (51%),樟0.04 mm (42%)<0.5 mm (49%)<3 mm (60%)。樟凋落叶分解得更快。随孔径的增大,凋落叶质量损失率表现为增加的趋势,且3个不同大小孔径内的马尾松凋落叶质量损失率都低于樟凋落叶。

表2 两种凋落叶的初始基质质量(平均值±标准误差)

Tab 2 Initial value of components of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* (mean ± SE)

物种 Species	C (w/g kg ⁻¹)	N (w/g kg ⁻¹)	DOC (w/g kg ⁻¹)	DOC/C (r/%)	C/N	木质素 Lignin (w/g kg ⁻¹)	纤维素 Cellulose (w/g kg ⁻¹)
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	455.00 ± 16.83	13.36 ± 1.03	15.22 ± 2.27	3.34 ± 0.23	34.06	301.07 ± 16.37	216.17 ± 19.59
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	554.55 ± 19.14	36.01 ± 2.61	40.34 ± 3.17	6.74 ± 0.48	16.61	214.05 ± 3.61	189.90 ± 25.51

表3 不同分解阶段各林窗凋落物分解的日平均温度(θ/℃)

Table 3 Daily average temperature of different sampling date in different forest gaps (θ/℃)

林窗 Forest gap	17 Nov.2013-17 Dec.2013	17 Dec.2013-17 Feb.2014	17 Feb.2014-17 May.2014	17 May.2014-17 Aug.2014	17 Aug.2014-17 Nov.2014
CK	12.21 ± 0.82Ad	8.75 ± 0.82Ae	15.96 ± 1.92Cc	23.20 ± 1.21Ca	20.15 ± 1.22Bb
G1	12.56 ± 0.94Ad	9.04 ± 1.11Ae	17.90 ± 1.12ABc	24.69 ± 0.12ABa	20.93 ± 1.54ABb
G2	11.53 ± 1.23Ad	7.90 ± 0.29Ae	17.49 ± 0.96ABc	24.65 ± 1.34ABa	20.69 ± 1.17ABb
G3	11.80 ± 1.84Ad	8.61 ± 1.34Ae	17.88 ± 2.21ABc	24.68 ± 1.46ABa	22.23 ± 1.19Ab
G4	12.53 ± 1.46Ad	9.40 ± 0.92Ae	19.02 ± 1.27Ac	26.02 ± 1.37Aa	22.34 ± 1.67Ab
G5	12.02 ± 1.27Ad	8.64 ± 0.82Ae	16.96 ± 1.92Bc	27.08 ± 2.61Aa	22.33 ± 0.76Ab
G6	12.82 ± 1.28Ad	9.05 ± 1.26Ae	19.04 ± 1.43Ac	26.61 ± 1.25Aa	22.09 ± 0.82Ab
G7	13.11 ± 1.36Ad	9.34 ± 0.35Ae	16.83 ± 1.11BCc	23.36 ± 1.82Ca	20.59 ± 1.12ABb

不同大写字母表示不同林窗之间差异显著($P < 0.05$),不同小写字母表示不同分解阶段之间差异显著($P < 0.05$)。

Different capital letters indicate significant difference among forest gaps of different size ($P < 0.05$); different lowercase letters indicate significant difference among different decomposing stages ($P < 0.05$).

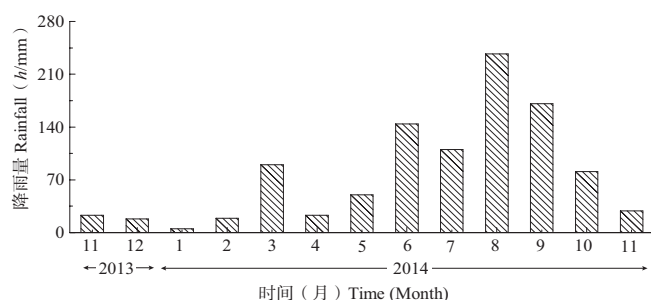


图1 马尾松人工林不同时期降雨量。

Fig. 1 Rainfall of different months in the sampling plantation.

由图2可知, 3 mm孔径凋落袋内(G1、G4林窗内的马尾松凋落叶和CK、G1、G2、G3、G4、G7林窗内的樟凋落叶)显著高于0.5 mm和0.04 mm孔径凋落袋内的质量损失率。其他林窗, 凋落袋孔径大小对两种凋落叶的质量损失率无显著影响。同时, 随着分解时间的延长, 两种凋落叶在3个不同孔径凋落袋内质量损失率的差异都不断变大。

2.3 不同分解阶段两种凋落叶(每30天)质量损失速率

由表5可知, 分解前期(0-90 d), 3个孔径中两种凋落叶的质量损失速率都不断增大, 之后(90-360 d)不断减小, 且随着分解时间的延长, 3个孔径凋落袋之间凋落物质量损失速率的差异不断减小。同一分解阶段的相同孔径凋落袋内, 樟凋落叶的质量损失速率大于马尾松凋落叶, 分解后期(270-360 d), 两者之间的差异不断减小。

2.4 两种凋落叶的分解速率和分解时间

用 Olson经典分解模型^[18]拟合不同大小林窗内两种凋落叶的分解过程, 结果如表6所示。模型拟合的质量损失的分解系数 k 值比较, 马尾松为G4 > G1 > CK > G2 > G3 > G5 > G6 >

G7, 樟为G2 > G4 > G1 > CK > G5 > G6 > G7 > G3。通过分解系数得出两物种凋落叶分解一半所需的平均时间为马尾松0.98年、樟0.77年, 分解95%所需的平均时间为马尾松4.35年、樟3.60年。樟凋落叶的分解速率高于马尾松凋落叶。G1、G2、G4马尾松和樟凋落叶半分解时间和分解95%的时间都低于其他林窗。总体上看, 相对于其它林窗和林下, 中型(G4)林窗内凋落叶分解速率更快。

3 讨论

3.1 林窗大小对凋落叶质量损失的影响

凋落物的分解过程是生物因子和非生物因子共同作用的结果, 其分解速率和分解时间取决于凋落叶质量、土壤、气候以及土壤生物的作用^[30]。本项研究中, 马尾松和樟凋落叶质量损失率均表现出明显的林窗效应。总体上看, 中型(G4)林窗内两种凋落叶的质量损失率大于其他林窗。这可能是因为: 第一, 凋落物分解温度是凋落物分解的一个重要影响因子。林窗的形成改变了林窗内的光照、增大了地面蒸发等, 直接影响林窗内分解者的生存环境^[31]。但本研究发现不同面积林窗之间的温度无显著差异(表2), 这与已有的研究结论“林窗面积越大, 温度越高”^[32]不一致。这可能是因为研究区域属中亚热带湿润季风气候, 年均降水量1 070.4 mm, 雨量较为充沛^[9]。虽然大面积林窗内光照强, 但雨、露的蒸发导致林窗内温度的降低^[33], 这将减小其与小面积之间温度差异。第二, 生物因子也是影响凋落物分解的重要因素。前期研究发现, 微生物生物量总体上随林窗增大先升后降^[34]。这是因为不同林窗内微环境的差异影响分解者(土壤动物、微生物等)对凋落物的分解^[35], 干旱的环境不利于分

表4 不同分解阶段各林窗的土壤含水率($r/\%$)Table 4 Soil water content of of forest gaps of different size on the sampling dates ($r/\%$)

林窗 Forest gap	17 Nov.2013–17 Dec.2013	17 Dec.2013–17 Feb.2014	17 Feb.2014–17 May.2014	17 May.2014–17 Aug.2014	17 Aug.2014–17 Nov.2014
CK	14.69 ± 1.11Cab	12.96 ± 1.32Cb	15.25 ± 1.45Bab	16.56 ± 1.45Ba	17.15 ± 1.45Ca
G1	16.23 ± 1.66BCb	15.93 ± 1.85Bb	15.60 ± 1.85Bb	19.05 ± 1.43ABa	20.84 ± 1.93Ba
G2	17.50 ± 2.14Bb	17.17 ± 1.63ABb	16.87 ± 1.71ABb	22.60 ± 3.74Aa	20.88 ± 2.77Bab
G3	21.25 ± 1.98Aab	18.23 ± 1.37Aab	15.21 ± 2.35Ba	21.28 ± 3.45Aab	24.11 ± 1.92ABa
G4	19.84 ± 1.66ABb	16.20 ± 1.29Bc	18.88 ± 2.29Abc	22.23 ± 2.43Aab	25.28 ± 2.72Aa
G5	21.75 ± 2.17Ab	17.24 ± 2.34ABc	17.27 ± 2.51ABc	22.14 ± 1.38Ab	25.63 ± 3.43Aa
G6	19.93 ± 1.92ABab	14.47 ± 2.01BCc	17.26 ± 1.68ABb	20.60 ± 2.03ABa	21.22 ± 1.96Ba
G7	19.05 ± 2.42ABa	14.96 ± 1.25BCb	16.23 ± 1.97ABb	19.59 ± 1.84ABa	18.75 ± 2.76BCa

不同大写字母表示不同林窗之间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同分解阶段之间差异显著($P < 0.05$)。

Different capital letters indicate significant difference among different size of forest gaps ($P < 0.05$); different lowercase letters indicate significant difference among different decomposing stages ($P < 0.05$).

表5 不同分解阶段马尾松和樟凋落叶质量损失速率($V/\text{g } 30\text{days}^{-1}$)Table 5 Mass loss rate per 30 days of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* leaf litter ($V/\text{g } 30\text{days}^{-1}$)

分解阶段 Decomposing stage	马尾松 <i>Pinus massoniana</i>			樟 <i>Cinnamomum camphora</i>		
	3.00 mm	0.50 mm	0.04 mm	3.00 mm	0.50 mm	0.04 mm
0-30 d	0.65 ± 0.12ABa	0.54 ± 0.11Aab	0.50 ± 0.15Ab	0.83 ± 0.31Ba	0.79 ± 0.11Bab	0.67 ± 0.12Ab
30-90 d	0.74 ± 0.12Aa	0.63 ± 0.17Aab	0.55 ± 0.11Ab	1.37 ± 0.12Aa	0.94 ± 0.14Ab	0.71 ± 0.13Ac
90-180 d	0.53 ± 0.16Ba	0.37 ± 0.12ABb	0.34 ± 0.09Bb	0.48 ± 0.14Ca	0.39 ± 0.12Cab	0.32 ± 0.07Bb
180-270 d	0.47 ± 0.18Ba	0.36 ± 0.17ABab	0.32 ± 0.14Bb	0.47 ± 0.08Ca	0.36 ± 0.04Cab	0.23 ± 0.11Cb
270-360 d	0.28 ± 0.13Cb	0.24 ± 0.02Ba	0.16 ± 0.01Ca	0.36 ± 0.11Ca	0.31 ± 0.13Ca	0.23 ± 0.11Ca

不同大写字母表示不同分解阶段之间显著差异($P < 0.05$), 不同小写字母表示不同孔径之间显著差异($P < 0.05$)。

Different capital letters indicate significant difference between different decomposing stages ($P < 0.05$). Different lowercase letters indicate significant difference between different mesh size of litter bags ($P < 0.05$).

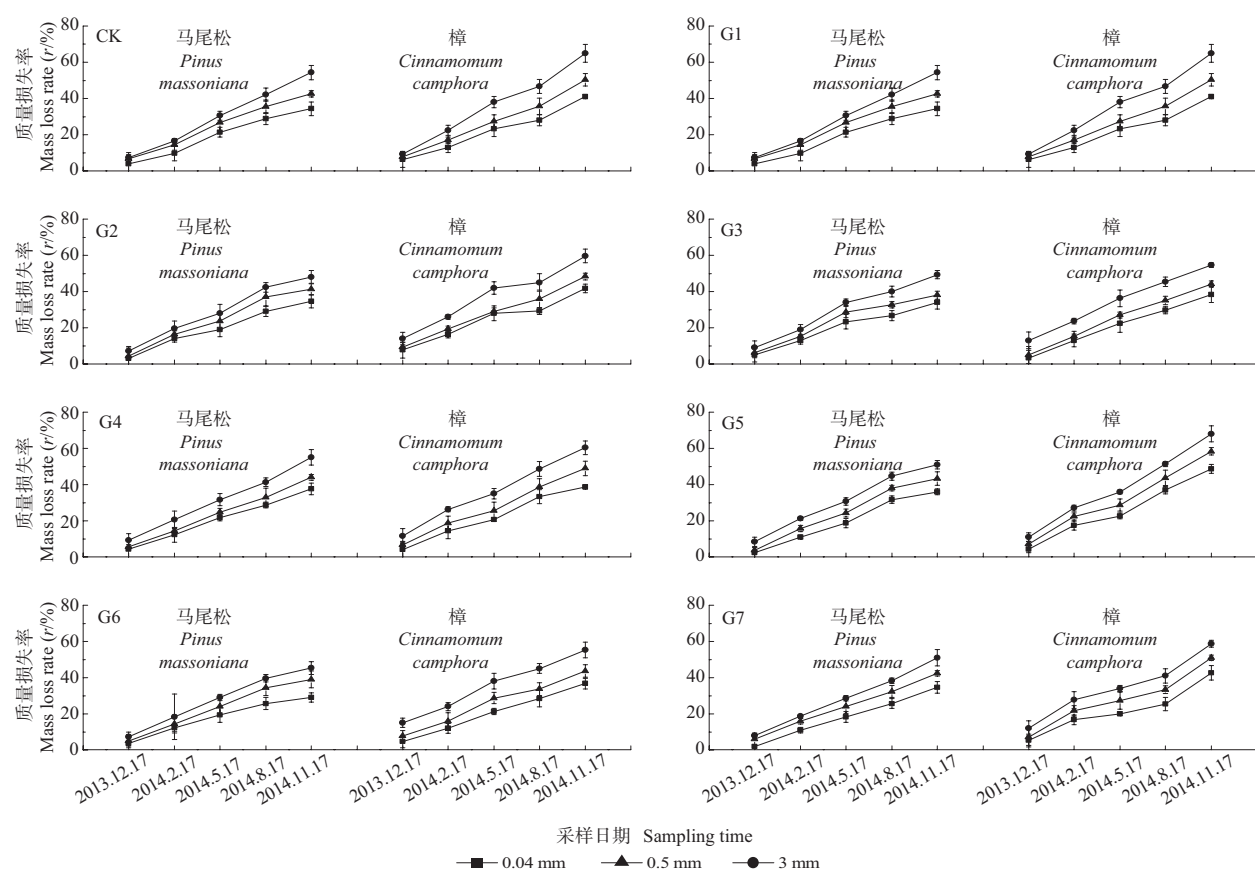


图2 不同大小林窗内凋落叶的累计质量损失率 (平均值±标准误差)。
Fig. 2 Total mass loss rate of leaf litter in forest gaps of different size (mean ± SE).

表6 马尾松和樟凋落叶的分解速率和分解时间
Table 6 Decomposition rate and decomposition time of *Pinus massoniana* and *Cinnamomum camphora* leaf litter in forest gaps of different size

物种 Species	林窗 Forest gap	回归方程 Regression equation	分解系数 <i>k</i>	相关系数 <i>R</i>	半分解时间 <i>T</i> _{0.5}	95%分解时间 <i>T</i> _{0.95}	显著性 <i>P</i>
马尾松 <i>Pinus massoniana</i>	CK	$y = 0.976e^{-0.741t}$	0.741	0.989	0.91	4.01	< 0.0001
	G1	$y = 1.014e^{-0.777t}$	0.777	0.997	0.90	3.87	< 0.0001
	G2	$y = 0.961e^{-0.699t}$	0.699	0.991	0.93	4.23	< 0.0001
	G3	$y = 0.978e^{-0.667t}$	0.667	0.983	1.01	4.46	< 0.0001
	G4	$y = 1.008e^{-0.806t}$	0.806	0.996	0.87	3.73	< 0.0001
	G5	$y = 0.965e^{-0.632t}$	0.632	0.991	1.03	4.68	< 0.0001
	G6	$y = 0.943e^{-0.618t}$	0.618	0.992	1.04	4.75	< 0.0001
	G7	$y = 0.956e^{-0.581t}$	0.581	0.993	1.12	5.08	< 0.0001
樟 <i>Cinnamomum camphora</i>	CK	$y = 0.946e^{-0.835t}$	0.835	0.992	0.76	3.52	< 0.0001
	G1	$y = 0.933e^{-0.900t}$	0.9	0.976	0.72	3.25	< 0.0001
	G2	$y = 0.999e^{-1.060t}$	1.06	0.973	0.65	2.83	< 0.0001
	G3	$y = 0.899e^{-0.688t}$	0.688	0.994	0.86	4.2	< 0.0001
	G4	$y = 0.999e^{-0.964t}$	0.964	0.976	0.69	3.11	< 0.0001
	G5	$y = 0.905e^{-0.773t}$	0.773	0.972	0.77	3.75	< 0.0001
	G6	$y = 0.928e^{-0.737t}$	0.737	0.963	0.84	3.96	< 0.0001
	G7	$y = 0.912e^{-0.695t}$	0.695	0.992	0.85	4.18	< 0.0001

解者的生存繁衍^[36]。研究区域内马尾松平均株高大于16 m, 阻挡了较小林窗 (G1-G3) 和林下 (CK) 的有效光照和降雨, 而对土壤湿度等条件的改善有所抑制进而限制了土壤动物和微生物的活动^[37-38], 致使小型林窗和林下的凋落叶分解受到抑制。相对于中、小林窗, 大林窗 (G5-G7) 内光照强度的空间异质性大, 总辐射强度和有效光合辐射较高, 导致大林窗内昼夜温差大^[9]。同时, 干湿交替过程可能会抑制土壤动物对

凋落物质量损失的贡献^[39], 而大林窗内蒸腾作用强使凋落的湿度变化更大, 不利于土壤动物和微生物的生长, 进而影响凋落叶分解。前期研究发现, 中型林窗内植物盖度、物种丰富度等高于其他林窗^[10, 37], 因为“林窗太小光照不足不利于耐阴性较小或喜阳性物种的生长, 而林窗太大光照太强又不利于耐阴性较大或阴性物种的更新”, 所以中型林窗生态系统的稳定性更强更适宜土壤动物以及微生物生存, 这将导致

中型林窗内土壤动物对凋落物分解的贡献比大型和小型林窗更大。

3.2 凋落叶质量损失率的变化

3.2.1 凋落袋孔径对凋落叶质量损失的影响 不同孔径凋落物网袋可以对分解者进行排除,能够有效分离不同体型大小的土壤动物,且不同孔径网袋内的微环境差异很小,因此用网袋法来量化土壤动物对凋落物的分解是一种自然可靠的分离途径。1年分解后,凋落物损失率年均值大孔(3 mm) > 中孔(0.5 mm) > (0.04 mm)。这是因为网孔越大,土壤动物破碎的凋落物更容易从分解袋中遗漏(如雨水淋溶,蚯蚓、蚂蚁等的取食和搬运,以及采样渗漏等)^[40];另一方面,网孔的变化会改变分解袋内微气候环境和生物活性,例如孔径大的网袋会允许更多、体型更大的土壤动物进入^[41],因此各时期两种凋落叶质量损失率均随孔径的增大而增加。

3.2.2 凋落叶质量损失的动态变化 环境因子、凋落物基质和生物因子是影响凋落物分解的重要因素,且三者之间常具有密切的相互作用^[30]。本研究发现,3种孔径凋落袋内,两种凋落叶的分解速率都表现为先升高后降低的趋势(表5)。这可能是因为:1)凋落物分解前期,以可溶性有机成分淋溶为主^[42]。在凋落叶分解的过程中,初期可溶性有机成分(DOC等)流失较快,使得凋落物可溶性有机成分越来越低,进而导致分解后期淋溶作用对凋落物的作用减弱,质量损失速率降低^[43]。同时,在秋末落叶期(初次采样时间为12月),土壤动物定居凋落物袋需要一段时间,对凋落物的作用还不明显。新鲜的凋落物叶片尚未破碎,不利于进食,影响了初期凋落物的分解速度^[37,39]。随着分解时间的推移,伴随着降雨的淋溶作用使凋落物结构变得松散,有利于土壤动物和微生物进入,从而导致凋落叶的质量损失率不断增加^[44]。2)第二次采样(2014年2月)后,林窗内温度逐渐升高、湿度增大,土壤动物开始活跃,进入快速繁衍期,该时期的土壤动物种类、数量都不断升高,而土壤动物及其幼虫主要以凋落物为食,导致凋落叶质量损失率不断增加^[38,45]。同时,经过了前几个月的淋溶和其他破坏之后,该时期凋落物破碎程度大,易于分解、生物食用以及养分释放,导致土壤动物对凋落物质量损失的贡献率显著提高^[46]。3)分解后期淋溶作用对凋落物的作用减弱,且随着分解时间的延长,木质素、纤维素等难降解物质的相对含量上升,导致分解速率开始降低。同时,难降解物质相对含量上升也会影响土壤动物对凋落叶的分解,进而抑制凋落物质量损失的不降低^[47]。

3.2.3 两种凋落叶分解速率的差异 由Olson分解系数可以看出,马尾松和樟凋落叶分解一半的平均时间分别为0.98年和0.77年,分解95%的平均时间为4.35年和3.60年。说明樟凋落叶分解得更快。这可能是因为:1)针叶(马尾松)凋落物的叶片多为厚革质,角质层发达,叶片表面积小且质地紧实,含有较多木质素、纤维素等物质,阻碍了微生物对物质的分解,也不利于淋溶作用和土壤动物的机械破坏,使得分解一定时期后还停留在表层。而阔叶凋落物(樟)的木质素、纤维素含量相对较低,且樟凋落叶有着相对更大的表面积,有利于微生物定居其上分解,因此马尾松凋落叶分解速率低于樟^[47-48]。2)N和P含量也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^[49],而其C/N高,耐分解成分也高会抑制微生物的活性^[46],因而分解较慢,营养释放也慢^[50]。本研究中马尾松凋落叶相对较高的C/N和较低的N含量是其分解较慢的原因之一。3)分解温度由冬季(2013年12月-次年2月)的低温转向春、夏季(3月-8月)的高温,经历前期冷热循环等物理破碎之后,凋落叶结构更有利于微生物的附着,而樟凋落叶相对较大的表面积更有利于微生物的附着^[51]。4)土壤动物在凋落物分解过程中发挥重要作用。由于土壤动物食性的差异,不同树种的取食的喜好,这也可能影响了土壤动物对不同凋落物的质量损失的贡献^[52]。

综上所述,当前研究表明林窗大小能显著影响凋落物的分解,中型林窗(G4: 625 m²)下凋落叶分解得更快。马尾松和樟凋落叶的质量损失速率都表现出先升高(前3个月)后降低的趋势,且两种凋落叶分解95%的平均时间分别为4.35年和3.60年,说明樟凋落叶的分解得更快。以上几个研究结论对深入认识林分干扰和凋落物分解的关系具有重要意义,也为深入理解长江上游低山丘陵区马尾松人工林物质循环过程提供了一定的基础数据。

参考文献 [References]

- Liu CJ, Ilvesniemi H, Berg B, Kutsch W, Yang YS, Ma XQ. Above ground litterfall in Eurasian forests [J]. *J For Res*, 2003, **14** (1): 27-34
- 宋新章, 江洪, 张慧玲, 余树全, 周国模, 马元丹, Scott XC. 全球环境变化对森林凋落物分解的影响[J]. 生态学报, 2008, **28** (9): 4414-4423 [Song XZ, Jiang H, Zhang HL, Yu QS, Zhou GM, Ma YD, Scott XC. A review on the effects of global environment change on litter decomposition [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28** (9): 4414-4423]
- Aerts R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes [J]. *J Ecol*, 2006, **94** (4): 713-724
- 杨万勤, 王开运. 森林土壤酶的研究进展[J]. 林业科学, 2004, **40**: 152-159 [Yang WQ, Wang KY. Advances in forest soil enzymology [J]. *Sci Silv Sin*, 2004, **40**: 152-159]
- Zheng YS, Ding YX. Effect of mixed forests of Chinese Fir and Tsoong's tree on soil properties [J]. *Pedosphere*, 1998, **8** (2): 161-168
- Joo SJ, Yim MH, Nakane K. Contribution of microarthropods to the decomposition of needle litter in a Japanese cedar (*Cryptomeria japonica* D. Don) plantation [J]. *For Ecol Manage*, 2006, **234**: 192-198
- Yang XD, Chen J. Plant litter quality influences the contribution of soil fauna to litter decomposition in humid tropical forests, southwestern China [J]. *Soil Biol Biochem*, 2009, **41**: 910-918
- 莫江明, 彭少麟, Sandra, Brown, 方运霆, 孔国辉. 英美鼎湖山马尾松林植物养分积累动态及其对人为干扰的响应[J]. 植物生态学报, 2004, **28**: 810-822 [Mo JM, Peng SL, Sandra, Brown, Fang YT, Kong GH. Nutrient dynamics in response to harvesting practices in a pine forest of subtropical China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2004, **28**: 810-822]
- 崔宁洁, 刘洋, 张健, 杨万勤, 欧江, 张捷, 邓长春, 李建平. 林窗对马尾松人工林植物多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2014, **20** (1): 8-14 [Cui NJ, Liu Y, Zhang J, Yang WQ, Ou J, Zhang J, Deng CC, Li JP. Effects of forest gap on plant diversity of *Pinus massoniana* plantations [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2014, **20** (1): 8-14]

- 10 欧江, 张捷, 崔宁洁, 陈亚梅, 张健, 杨万勤, 刘洋. 采伐林窗对马尾松人工林土壤微生物生物量的初期影响[J]. 自然资源学报, 2014, **29** (12): 2036-2047 [Ou J, Zhang J, Cui NJ, Chen YM, Zhang J, Yang WQ, Liu Y. The early effects of forest gap harvesting on soil microbial biomass in *Pinus massoniana* plantations [J]. *J Nat Resour*, 2014, **29** (12): 2036-2047]
- 11 林英华, 杨德付, 张夫道, 王建修, 白秀兰, 王兵. 栎林凋落层土壤动物群落结构及其在凋落物分解中的变化[J]. 林业科学研究, 2006, **19** (3): 331-336 [Lin YH, Yang DF, Zhang DF, Wang JX, Bai XL, Wang B. Structure of soil animal community of *Oakery* litter and fluctuation during leaf litter decomposition [J]. *For Res*, 2006, **19** (3): 331-336]
- 12 刘文杰, 李庆军, 张光明, 施济普, 白坤甲, 王昌命. 西双版纳望天树林干热季不同林窗间的小气候差异[J]. 植物生态学报, 2000, **20** (6): 932-937 [Liu WJ, Li QJ, Zhang GM, Shi JP, Bai KJ, Wang CM. The microclimatic differences between and within canopy gaps in the dry-hot season in *Shorea chinensis* forest [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2000, **20** (6): 932-937]
- 13 Gray AN, Spies TA. Gaps size, within-gap position and canopy structure effects on conifer seeding establishment [J]. *Ecology*, 1996, **84**: 635-645
- 14 Kenneth PL. Pattern of gap-phase replacement in a subalpine, old growth forest [J]. *Ecology*, 1992, **73**: 657-669
- 15 Landsberg JJ. A theory of forest dynamics, the ecological implications of forest succession models [J]. *For Ecol Manage*, 1987, **18**: 161-163
- 16 Schwartz G, Lopes JCA, Mohren GMJ, Peña-Claros M. Post-harvesting silvicultural treatments in logging gaps: a comparison between enrichment planting and tending of natural regeneration [J]. *For Ecol Manage*, 2013, **293** (2): 57-64
- 17 Whitmore TC. Canopy gaps and the two major groups of forest trees [J]. *Ecology*, 1989, **70**: 536-538
- 18 Osada N, Takeda HK, Pearcy RW. Functional correlates of leaf demographic response to gap release in saplings of a shade-tolerant tree, *Elateriospermum tapos* [J]. *Oecologia*, 2003, **137** (2): 181-187
- 19 Rentch JS, Schuler TM, Nowacki GJ, Beane NR, Ford WM. Canopy gap dynamics of second-growth red spruce-northern hardwood stands in West Virginia [J]. *For Ecol Manage*, 2010, **260** (10): 1921-1929
- 20 Kern CC, Reich PB, Montgomery RA, Strong TF. Do deer and shrubs override canopy gap size effects on growth and survival of yellow birch, northern red oak, eastern white pine, and eastern hemlock seedlings? [J]. *For Ecol Manage*, 2012, **267** (3): 134-143
- 21 刘庆, 吴彦. 滇西北高山针叶林林窗大小与更新的初步分析[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8** (5): 453-459 [Liu Q, Wu Y. Effects of gap size on regeneration of subalpine coniferous forests in northwest Yunnan [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, **8** (5): 453-459]
- 22 Landsberg JJ. A theory of forest dynamics, the ecological implications of forest succession models [J]. *For Ecol Manage*, 1987, **18**: 161-163
- 23 夏磊, 吴福忠, 杨万勤, 谭波. 川西亚高山森林凋落物分解初期土壤动物对红桦凋落叶质量损失的贡献[J]. 应用生态学报, 2012, **23** (2): 301-306 [Xia L, Wu WZ, Yang WQ, Tan B. Contribution of soil fauna to the mass loss of *Betula albosinensis* leaf litter at early decomposition stage of subalpine forest litter in western Sichuan [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23** (2): 301-306]
- 24 Boyer JN, Groffman PM. Bioavailability of water extractable organic carbon fractions in forest and agricultural soil profiles [J]. *Soil Biol Biochem*, 1996, **28** (6): 783-790
- 25 王春阳, 周建斌, 王祥, 夏志敏. 黄土高原区不同植物凋落物可溶性有机碳的含量及生物降解特性[J]. 环境科学, 2011, **32** (4): 1139-1145 [Wang CY, Zhou JB, Wang X, Xia ZM. Contents and biodegradation of soluble organic carbon in different plant residues from the loess plateau [J]. *Environ Sci*, 2011, **32** (4): 1139-1145]
- 26 Graça MAS, Bärlocher F, Gessner MO. Methods to study litter decomposition: a practical guide[M]. Netherlands: Springer Ebooks, 2005
- 27 Xin W, Yin X, Song B. Contribution of soil fauna to litter decomposition in Songnen sandy lands in northeastern China [J]. *J Arid Environ*, 2012, **77**: 90-95
- 28 Olson JS. Energy storage and the balance of producers and decomposers in ecological systems [J]. *Ecology*, 1963, **44** (2): 322-331
- 29 刘增文, 潘开文. Olson 枯落物分解模型存在的问题与修正[J]. 西北农林科技大学学报, 2005, **33** (1): 69-70 [Liu ZW, Pan KW. Problems in Olson's litter decomposition model and its revision [J]. *J Northwest Sci-Tech Univ Agric For (Nat Sci Ed)*, 2005, **33** (1): 69-70]
- 30 窦荣鹏, 江洪, 余树全, 马元丹, 郭培培. 柳杉凋落物在中国亚热带和热带的分解[J]. 生态学报, 2010, **30** (7): 1758-1763 [Dou RP, Jiang H, Yu SQ, Ma YD, Guo PP. Decomposition of *cryptomeria fortunei* leaf litter in subtropical and tropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2010, **30** (7): 1758-1763]
- 31 宋新章, 肖文发. 林隙微生境及更新研究进展[J]. 林业科学, 2006, **42** (5): 114-119 [Song XZ, Xiao FW. Research advances of microsites and regeneration within canopy [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42** (5): 114-119]
- 32 Zhu JJ, Tan H, Li FQ, Chen M, Zhang JX. Microclimate regimes following gap formation on a montane secondary forest of eastern Liaoning Province, China [J]. *J For Res*, 2007, **18**: 167-173
- 33 王进欣, 张一平, 马友鑫, 刘玉洪, 李佑荣. 天橡胶林林窗温度剖面分布特征[J]. 生态科学, 1999, **18** (3): 6-11 [Wang JX, Zhang YP, Ma YX, Liu YH, Li YR. Linear character of the sunshine of the gap in the Rubber Forest [J]. *Ecol Sci*, 1999, **18** (3): 6-11]
- 34 欧江, 张捷, 崔宁洁, 陈亚梅, 张健, 杨万勤, 刘洋. 采伐林窗对马尾松人工林土壤微生物生物量的初期影响[J]. 自然资源学报, 2014, **29** (12): 2036-2047 [Ou J, Zhang J, Cui NJ, Chen YM, Zhang J, Yang WQ, Liu Y. The Early effects of forest gap harvesting on soil microbial biomass in *Pinus massoniana* plantations [J]. *J Nat Resour*, 2014, **29** (12): 2036-2047]
- 35 Pablo GP, Fernando TM, Jens K, Wall DH.. Climate and litter quality differently modulate the effects of soil fauna on litter decomposition across biomes [J]. *Ecol Lett*, 2013, **16**: 1045-105
- 36 郭继勋, 祝廷成. 羊草草原枯枝落叶分解的研究—主要优势植物的分解速率和损失率[J]. 生态学报, 1993, **13** (3): 214-219 [Guo JX, Zhu TC. Study on litter decomposition in *Leymus Chinensis* grassland-decomposition rate and loss rate of dominant plants [J]. *Acta Ecol Sin*, 1993, **13** (3): 214-219]
- 37 崔宁洁, 张丹桔, 刘洋, 张健, 杨万勤, 欧江, 张捷, 宋小艳, 殷睿. 马尾松人工林不同大小林窗植物多样性及其季节动态[J]. 植物生态学报, 2014, **38** (5): 477-490 [Cui NJ, Zhang DJ, Liu Y, Zhang J, Yang WQ, Ou J, Zhang J, Song XY, Yin R. Plant diversity and seasonal dynamics in forest gaps of varying sizes in *Pinus massoniana* plantations. *Acta Phytoecol Sin*, 2014, **38** (5): 477-490]
- 38 Arunachalam A, Maithani K, Pandey H N, Tripathi RS. The impacts of disturbance on detrital dynamics and soil microbial biomass of a *Pinus kesiya* forest in north-east India [J]. *For Ecol Manage*, 1996, **88** (3): 273-282

- 39 Mema DW, Singh TB, Joymati DL. Monthly changes of collembolan population under the gradients of moisture, organic carbon and nitrogen contents in a sub-tropical forest soil, Manipur [J]. *J Exp Sci*, 2012, **2** (12): 10-12
- 40 王文君, 杨万勤, 谭波, 刘瑞龙, 吴福忠. 四川盆地亚热带常绿阔叶林土壤动物对几种典型凋落物分解的影响[J]. 生态环境学报, 2013, **22** (9): 1488-1495 [Wang WJ, Yang WQ, Tan B, Liu RL, Wu FZ. Contributions of soil fauna to litter decomposition in subtropical evergreen broad-leaved forests in Sichuan basin. *Ecol Environ Sci*, 2013, **22** (9): 1488-1495]
- 41 Bradford MA, Tordoff GM, Eggers T, Jones TH, Newington JE. Microbiota, fauna, and mesh size interactions in litter decomposition [J]. *Oikos*, 2002, **99** (2): 317-323
- 42 李云, 周建斌, 董燕捷, 夏志敏, 陈竹君. 黄土高原不同植物凋落物的分解特性[J]. 应用生态学报, 2012, **23** (12): 3309-3316 [Li Y, Zhou JB, Dong YJ, Xia ZM, Chen ZJ. Decomposition of different plant litters in Loess Plateau of Northwest China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2012, **23** (12): 3309-3316]
- 43 康根丽, 杨玉盛, 司友涛, 刘鑫, 杨智杰. 马尾松与芒萁鲜叶及凋落物水溶性有机物的溶解特征和光谱学特征[J]. 热带亚热带植物学报, 2014, **22** (4): 357- 366 [Kang GL, Yang YS, Si YT, Liu Z, Yang ZJ. Soluble and spectral characteristics of DOM in leaching solution from leaves and litter-fall of *Pinus massoniana* and *Dicranopteris dichotoma* [J]. *Subtrop Plant Sci*, 2014, **22** (4): 357- 366]
- 44 Muscolo A, Sidari M, Mercurio R. Influence of gap size on organic matter decomposition, microbial biomass and nutrient cycle in Calabrian pine (*Pinus laricio* Poir.) stands [J]. *For Ecol Manage*, 2007, **242** (2): 412-418
- 45 Xu GL, Kuster TM, Gunthardt-Goerg MS, Dobbertin M, Li MH. Seasonal exposure to drought and air warming affects soil Collembola and mites [J]. *Pub Lib Sci*, 2012, **7** (8): 1-9
- 46 Cardenas RE, Dangles O. Do canopy herbivores mechanically facilitate subsequent litter decomposition in soil? A pilot study from a Neotropical cloud forest [J]. *Ecol Res*, 2012, **27** (5): 975-981
- 47 田兴军, 立石贵浩. 亚高山针叶林土壤动物和土壤微生物对针叶分解的作用[J]. 植物生态学报, 2002, **26** (3): 257-263 [Tian XJ, Takeishi T. Relative roles of microorganisms and soil animals on needle litter decomposition in a subalpine coniferous forest [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2002, **26** (3): 257-263]
- 48 郭培培, 江洪, 余树全, 马元丹, 窦荣鹏, 宋新章. 亚热带6种针叶和阔叶树种凋落叶分解比较[J]. 应用与环境生物学报, 2009, **15**: 655-659 [Guo PP, Jiang H, Yu SQ, Ma YD, Dou RP, Song XZ. Comparison of litter decomposition of six species of coniferous and broad-leaved trees in subtropical China [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2009, **15**: 655-659]
- 49 Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands [J]. *For Ecol Manage*, 2007, **253**: 11-18
- 50 Schlesinger WH, Hasey MM. Decomposition of chaparral shrub foliage: Losses of organic and inorganic constituents from deciduous and evergreen leaves [J]. *Ecol*, 1981, **62**: 762-774
- 51 Song XZ, Jiang H, Zhang HL, Peng CH, Yu SQ. Elevated UV-B radiation did not affect decomposition rates of needles of two coniferous species in subtropical China [J]. *Eur J Soil Biol*, 2011, **47** (6): 343-348
- 52 Gartner TB, Cardon ZG. Decomposition dynamics in mixed species leaf litter [J]. *Oikos*, 2004, **104**: 230-246