

不同海拔高度毛竹林凋落量动态分析

唐轶琳¹, 周本智^{1*}, 邓宗付², 唐荣清³, 王小明¹, 葛晓改¹, 曹永慧¹

(1. 中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400; 2. 中国林业科学研究院亚热带林业实验中心, 江西 分宜 336600;
3. 湖南省永州市冷水滩区林业局, 湖南 永州 425000)

摘要: 2008年6月至2011年12月,通过对江西大岗山不同海拔高度(低海拔350 m,高海拔650 m)毛竹林凋落物的定位观测,分析研究了该地区毛竹林的凋落大小年周期、凋落进程以及凋落量受海拔高度的影响等。结果表明:(1)观测的2个海拔高度对毛竹林凋落量的影响不显著。观测期间,高海拔、低海拔年平均凋落量为 $(1\ 695.05 \pm 87.23) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。(2)毛竹林凋落大小年周期与日历年并不吻合,是跨年度的,持续时间12个月左右,周期的分界点在每年的6月前后,且小年的四季变化较大年更明显,仅春夏两季凋落量就占全年总凋落量的68.71%~72.39%。(3)2008年初的特大冰雪灾害对毛竹林产生一定程度的干扰,且对高海拔的干扰相对低海拔更严重;但灾害发生2 a之后,其高海拔、低海拔凋落动态的各项指标均接近于该地区之前对未受灾毛竹林的研究结果。因此,认为冰雪灾害发生2 a之后,即2010年6月前后开始,该地区毛竹林凋落量已逐渐恢复到了灾前的正常状态。

关键词: 毛竹林; 海拔; 凋落周期; 凋落动态

中图分类号: S795 文献标识码: A

Dynamics of Litterfall at Different Altitudes in Moso Bamboo Plantations

TANG Yi-lin¹, ZHOU Ben-zhi¹, DENG Zong-fu², TANG Rong-qing³,
WANG Xiao-ming¹, GE Xiao-gai¹, CAO Yong-hui¹

(1. Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China;
2. Experimental Centre of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Fenyi 336600, Jiangxi, China;
3. Lengshuitan District Forestry Bureau of Yongzhou City, Hu'nan Province, Yongzhou 425000, Hu'nan, China)

Abstract: To assess the effects of altitude on litterfall dynamics and changes of periodic rules on moso bamboo (*Phyllostachys edulis*), the seasonal and annual dynamics at different altitudes (350 m and 650 m) from June 2008 to December 2011 in Mount Dagangshan, Jiangxi Province, were studied. The results showed that: (1) The annual average litter production of moso bamboo plantations at different altitudes during the period was estimated to be $(1\ 695.05 \pm 87.23) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$. The ANOVA analysis suggested that the influence of elevation to litter production was not significant. (2) There existed periodic rules in on-year and off-year, with a length of about 12 months and dividing point of every June. Compared with on-year, the seasonal variation of litter production in off-year was more remarkable. Litter production in spring and summer contributed 68.71% - 72.39% of the total in off-year. (3) The moso bamboo plantations at high elevation site were more seriously affected by the 2008's ice storm disaster compared with that of the low elevation site. Based on the study, it could be concluded that by June, 2010, the

收稿日期: 2012-08-31

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项项目(201104006); “十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD22B05); 中国林科院亚热带林业研究所基本科研业务费项目(RISF6152)

作者简介: 唐轶琳(1989—),女,湖南永州人,硕士研究生,主要从事森林生态学研究。

* 通讯作者: 周本智(1969—),男,安徽宿松人,研究员,博士生导师,主要从事森林生态和森林培育学研究。E-mail: benzhi_zhou@126.com.

moso bamboo plantations may have recovered to be normal.

Key words: moso bamboo plantations; altitude; periodic rules of litterfall; dynamics of litterfall

凋落物也可称为枯落物或有机碎屑,是指森林生态系统内由植物地上部分产生并归还到地表面,作为分解者的物质和能量来源,借以维持生态系统功能的全部有机质的总称。凋落物作为养分的基本载体,在维持土壤肥力,促进森林生态系统正常的物质循环和养分平衡方面发挥着特别重要的作用^[1-3]。因此,在全球变化问题倍受关注的大环境下,森林凋落物及其时空动态的相关研究构成森林生态系统研究的重要内容之一^[4]。

毛竹(*Phyllostachys edulis* (Carr.) H. de Lehaie)是我国南方林区分布最广和经济利用价值最高的生态型经济竹种资源^[5]。近年来,一些学者对毛竹林凋落开展了调查研究^[6-7],对毛竹林凋落量及其动态、凋落峰谷值进行了相关探讨,为毛竹林凋落物研究提供了重要参考,但有关毛竹林凋落量研究也存在一些不足,主要表现在:(1)研究年限较短,基本为1~2 a的短期收集,缺乏2 a以上的长期定位观测;(2)缺乏凋落量与其它影响因子之间相关性的研究;(3)对毛竹林凋落大小年周期的划分都将日历整年作为划分单位,忽略了对其生理特性的考虑。鉴于此,作者于2008年6月至2011年12月,在江西省分宜县通过对不同海拔高度(低海

拔350 m,高海拔650 m)毛竹林凋落物近4 a的定位观测,分析研究了该地区毛竹林凋落大小年周期、凋落进程以及凋落量受海拔的影响等,为该地区今后毛竹林的林分结构调控和其它相关研究提供参考。

1 研究区概况

研究区位于江西省分宜县大岗山乡的中国林科院亚林中心上村试验林场(114°30′~114°45′E, 27°30′~27°50′N),属中亚热带季风湿润气候区,年平均降水量1 591 mm,无霜期265 d;年平均气温15.8~17.7℃,7月份最高气温28.8℃,1月份最低气温-5.3℃;年平均日照时数1 657.0 h,最高为2 047.0 h,最低为1 378.0 h。土壤属长江中下游低山丘陵黄壤类型,该地区的地带性植被为亚热带常绿阔叶林,现存植被类型主要有:天然常绿阔叶林、落叶阔叶林、针阔混交林、毛竹林和杉木(*Cunninghamia lanceolata* (Lamb.) Hook.)人工林等^[8]。毛竹属于异龄林,本研究区域内高海拔、低海拔毛竹林林龄为1~5 a,6龄以上的毛竹被采伐,且大小年明显,年龄结构相对较简单而均衡。大年3—4月份挖笋,每年8—9月份劈山1次。调查样地毛竹林基本情况见表1。

表1 调查样地毛竹林基本情况

海拔/m	平均树高/m	平均胸径/cm	立竹密度/(株·hm ⁻²)	郁闭度	管理方式
350(低海拔)	12.2	10.7	1 800	0.7~0.8	每年劈山1次,大年挖笋、伐竹
650(高海拔)	12.5	10.1	2 025	0.7~0.8	每年劈山1次,大年挖笋、伐竹

2 研究方法

2.1 凋落物收集

于2008年6月至2011年12月进行定位观测。在研究区域内,分别在低海拔350 m和高海拔650 m处选择立地条件基本一致的3块20 m×20 m毛竹林调查样地。在6块样地内按照“梅花形”布置5个面积为0.5 m²、距离地面1 m的凋落物收集器。为确保试验数据的准确性,定期对凋落物收集器进行检查和维护。每月收集1次凋落物,凋落量相对较多的月份,每月中旬增收1次。收集的凋落物带回实验室,80℃恒温烘干8 h至恒质量,称其质量并记录。

2.2 数据处理

月凋落量数据为同海拔3个样地间的算术平均值,同时计算其标准差、变异系数。数据采用SPSS16.0软件进行统计分析,方差分析采用独立样本的*T*检验和单因子方差分析。

3 结果与分析

3.1 凋落大小年周期划分

研究显示:该地区毛竹林为大小年毛竹^[6]。图1显示的是观测期间不同海拔高度毛竹林的月均凋落量变化,从曲线的波动趋势可以看出:毛竹林凋落量具有周期性的大小年现象。2009年6月至2010年6月前后凋落量处于一个高峰时期,而相对于该

高峰时期,2008年6月至2009年6月前后,以及2010年6月至2011年6月前后凋落量处于一个相对的低谷时期;但与以往的短期观测将日历整年作为大小年周期不同的是,从图1可以看出:凋落量高峰期与低谷期大致以每年的6月前后为分界点,持续时间在12个月左右。

根据图1,以6月作为划分大小年周期的界点,

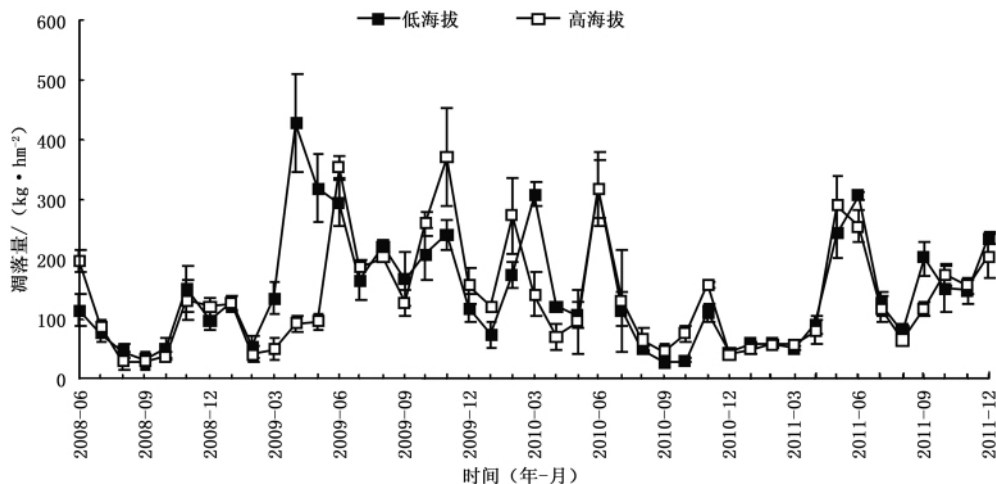


图1 不同海拔高度毛竹林月凋落量动态

3.2 凋落季节动态

毛竹林凋落量存在大小年的差异,因此,在大小年周期划分的基础上,对各个阶段再按季节进行划分:6至8月为夏季,9至11月为秋季,12月至次年2月为冬季,3至5月为春季。图2~5显示的是各个阶段不同海拔高度4个季度的凋落量变化。

第一小年(图2)低海拔春季凋落量占其全年总凋落量的 $54.51\% \pm 9.93\%$,除此以外,其它各个季度的凋落量相当。高海拔4个季度除秋季凋落量最小外,其余3个季度差异不大,但不同海拔高度凋落季节动态并非一致。第二小年(图4)不同海拔高度的凋落量波动基本呈同一规律,无论是高海拔还是低海拔其凋落量最小值均出现在冬季,分别仅占其全年总凋落量的 $10.80\% \pm 0.37\%$ 和 $13.57\% \pm 0.20\%$;最大值均出现在夏季,分别占其全年总凋落量的 $37.57\% \pm 6.64\%$ 和 $40.24\% \pm 7.45\%$ 。2个小年凋落季节动态不相一致,而第二小年与同一研究区域内傅懋毅等^[6]对未受灾毛竹林凋落物的研究结果大致相符,因此推测第一小年不同海拔高度凋落季节动态的不规律性可能与2008年初的冰雪灾害有关。第一大年(图3)高海拔凋落量最小值出现在春季,仅占全年总凋落量的 $13.05\% \pm 2.00\%$,低海

以2008年6月至2009年5月的12个月为第一阶段,2009年6月至2010年5月的12个月为第二阶段,2010年6月至2011年5月的12个月为第三阶段,最后的2011年6至12月的7个月为第四阶段。以第一阶段为第一小年,第二阶段为第一大年,第三阶段为第二小年,第四阶段为第二大年。

拔凋落量最小值出现在冬季,仅占 $16.67\% \pm 2.09\%$,夏秋两季凋落量相当。由图5也可以看出:第二大年不同海拔高度夏秋两季的凋落量相差也不大。

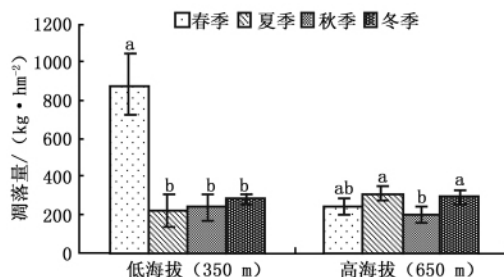


图2 第一小年(2008-06至2009-05)凋落量的季节动态

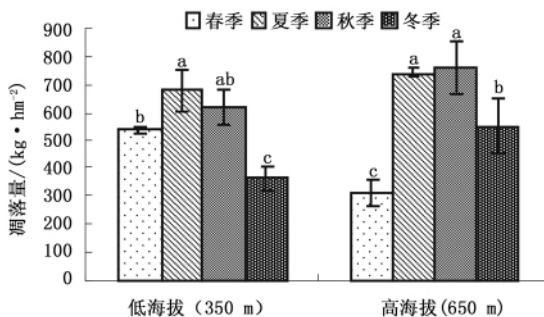


图3 第一大年(2009-06至2010-05)凋落量的季节动态

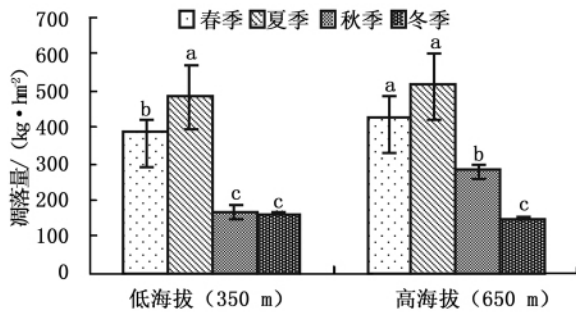


图 4 第二小年(2010-06至2011-05)凋落量的季节动态

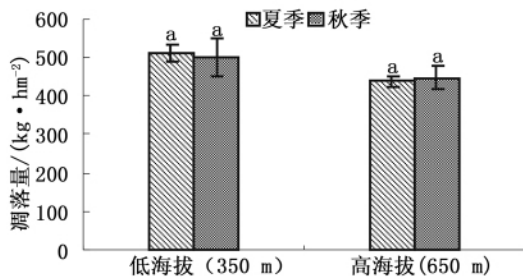


图 5 第二大年(2011-06至2011-12)凋落量的季节动态

由于第一小年可能受冰雪灾害干扰较大,而第二大年 4 个季度的数据不完整,因此在图 6 中采用第一大年和第二小年的数据进行比较。由图 6 看出:小年 4 个季度的变化幅度较大,且春夏两季凋落量较大,占全年总凋落量的 68.71%~72.39%;而大年 4 个季度凋落量的变化相对小年来说较平均,没有明显的季节变化。

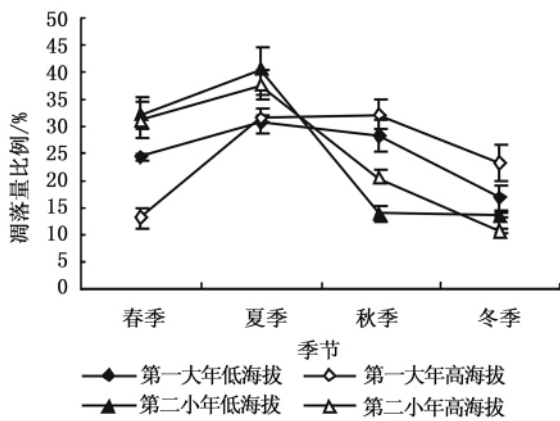


图 6 不同年份不同海拔季节凋落量比例

3.3 凋落量年际差异

由图 7、8 可以看出:第一大年的凋落量是小年凋落量的 2 倍左右,而第二大年仅 7 个月的凋落量与第一小年和第二小年 12 个月的凋落量相当。根据曲线的波动趋势也可以看出:大年各个月份的凋

落量大部分都高于小年各月份,有的甚至高出几倍以上。如低海拔 9 月份的凋落量,第一大年分别为第一小年和第二小年的 5.10 和 6.43 倍,第二大年分别为第一小年和第二小年的 6.14 和 7.74 倍。

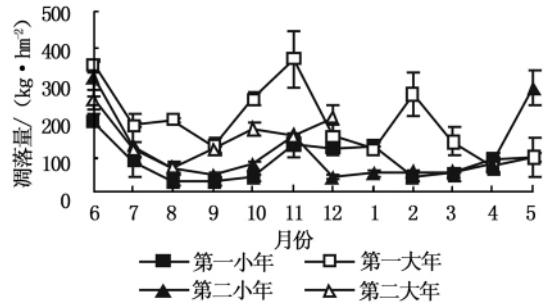


图 7 高海拔(650 m)凋落量年际动态

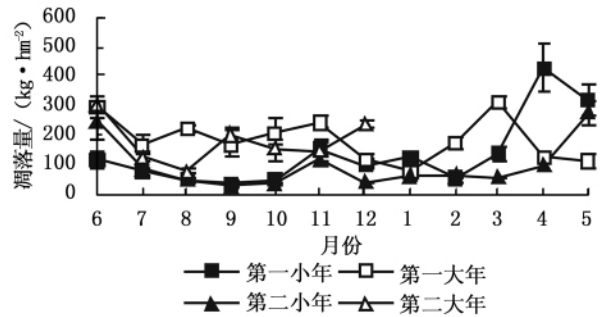


图 8 低海拔(350 m)凋落量年际动态

同时,第二小年的凋落量第一高峰出现在 5—6 月前后,第二高峰出现在 11 月前后,这与同一研究区域内傅懋毅等^[6]对未受灾毛竹林凋落物的研究结果大致相符;而之前的第一小年可能由于距离 2008 年初的冰雪灾害最近,受到了一定程度的干扰,因而没有显示出这一规律性。大年凋落量的波动趋势与小年不同,全年大部分月份的凋落量均处于较高水平,凋落量峰谷值没有小年明显,其变化相对较平缓。

3.4 不同海拔高度凋落动态

2008 年 6 月至 2011 年 12 月,高海拔、低海拔毛竹林凋落量分别为 $(5\ 862.99 \pm 377.58) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $(6\ 284.86 \pm 247.58) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。高海拔、低海拔年平均凋落量分别为 $(1\ 636.18 \pm 105.37)$ 、 $(1\ 753.91 \pm 69.09) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 平均凋落量为 $(1\ 695.05 \pm 87.23) \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

表 2 显示了不同海拔高度毛竹林各个阶段的凋落量。由表 2 看出:高海拔、低海拔间凋落量较为接近,方差分析结果表明,各个阶段高海拔、低海拔凋落量差异均不显著 ($P > 0.05$),因此,可以认为海拔高度对毛竹林凋落量的影响不显著。

表2 各年份不同海拔高度的凋落量

年份	海拔高度/m	年凋落量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	月均凋落量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	变异系数
第一小年	650(高海拔)	$1\ 045.27 \pm 155.84$	87.10 ± 12.99	0.149
(2008-06至2009-05)	350(低海拔)	$1\ 636.95 \pm 280.49$	136.41 ± 23.37	0.171
第一大年	650(高海拔)	$2\ 355.96 \pm 189.25$	196.33 ± 15.77	0.081
(2009-06至2010-05)	350(低海拔)	$2\ 201.74 \pm 21.51$	183.48 ± 1.79	0.010
第二小年	650(高海拔)	$1\ 370.72 \pm 58.30$	114.23 ± 4.85	0.043
(2010-06至2011-05)	350(低海拔)	$1\ 200.76 \pm 44.43$	100.06 ± 3.70	0.037
第二大年	650(高海拔)	$1\ 091.04 \pm 43.32$	155.86 ± 6.19	0.040
(2011-06至2011-12)	350(低海拔)	$1\ 245.41 \pm 78.81$	177.92 ± 11.26	0.063

图9显示的是不同海拔高度各个季度的凋落动态。由图9看出:2009年春季前后直至2010年夏季前后,不同海拔的2条曲线的波动出现了错位现象,即高海拔凋落量峰谷值的波动比低海拔延迟了1个季度:如低海拔在2009年春季前后出现了凋落量峰值,而高海拔在2009年夏季前后才出现峰值;低海拔凋落量谷值出现在2009年冬季前后,而高海拔的谷值到2010年春季前后才出现;而从2010年夏季前后开始,高海拔、低海拔2条曲线基本按同一趋势波动。

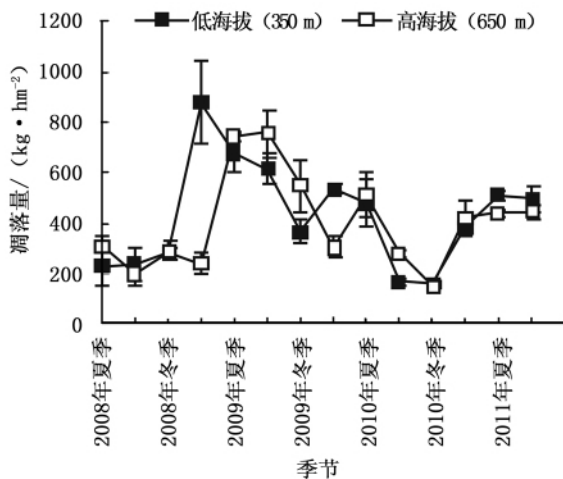


图9 不同海拔高度不同年份凋落量的季节动态

4 结论与讨论

4.1 凋落量大小年及与其它林分的比较

本研究区域内的毛竹林凋落周期存在大小年的差异,但与以往用整年来划分大小年不同的是,本研究显示毛竹林凋落量大小年是跨年度的,以6月前后为分界点,且小年的四季变化较大年更明显,仅春夏两季凋落量就占全年总凋落量的68.71%~72.39%。观测期间,高海拔、低海拔毛竹林年平均凋落量为($1\ 695.05 \pm 87.23$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,年最大凋落量(大年)为($2\ 355.96 \pm 189.25$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是年最小凋落量(小年) ($1\ 045.27 \pm 155.84$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的

2.25倍。

研究显示,森林凋落物年凋落量主要受气候和森林类型的影响^[9-10]。本研究区域内,毛竹林年凋落量为($1\ 045.27 \pm 155.84$)~($2\ 355.96 \pm 189.25$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,低于古田山常绿阔叶林年凋落量($3\ 751.70 \sim 5\ 320.50$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[11],低于九连山2008年冰雪灾害后亚热带常绿阔叶林年凋落量($2\ 875.10 \sim 4\ 173.85$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[12]、热带雨林和南亚热带常绿阔叶林年凋落量($8\ 100.00 \sim 9\ 000.00$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[13-15]和针叶林年凋落量($3\ 490.00 \sim 4\ 020.00$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[16-17]。年最大凋落量(大年) ($2\ 355.96 \pm 189.25$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 高于武夷山毛竹纯林年凋落量($1\ 014.7$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[7]。

4.2 毛竹林凋落量受海拔高度的影响

许多研究显示凋落量与海拔呈负相关,有学者观测表明,热带雨林凋落量随海拔升高而降低^[18];在夏威夷Mauna Loa热带雨林中,随海拔增加凋落量呈线性显著降低^[19];但也有研究认为,样地在受到较强干扰的情况下,则会引起凋落量随海拔的上升而增加^[20]。本研究显示:观测期间,高海拔毛竹林年均凋落量为($1\ 636.18 \pm 105.37$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,低海拔为($1\ 753.91 \pm 69.09$) $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,不同海拔对毛竹林凋落量的影响并不显著。

2009年春季前后直至2010年夏季前后,出现了高海拔凋落量峰谷值的波动比低海拔延迟1个季度的现象,而从2010年夏季前后开始,高海拔、低海拔两条曲线基本按同一趋势波动。由于海拔对毛竹林本身凋落量的影响不显著,因此推测,这可能是由于不同海拔高度毛竹林受2008年初冰雪灾害干扰程度不一引起。

由小年的凋落季节动态可知:无论是高海拔还是低海拔,春夏两季理应出现凋落高峰,而距离冰雪灾害最近的第一小年(2008年夏季至2009年春季),夏季由于距离冰雪灾害较近,干扰导致其凋落量减少,高海拔、低海拔均没有出现凋落高峰;春季低海拔通

过一段时间恢复后出现凋落高峰,而高海拔的高峰却延迟到夏季才出现,从而导致了高海拔凋落量峰谷值波动较低海拔延后的现象。可以大致认为2008年初的冰雪灾害对高海拔的干扰相对更大。从而可以得出结论,海拔高度对凋落量的影响不显著,但冰雪灾害对高海拔的干扰相对比低海拔大。

4.3 毛竹林雪灾后的恢复状况

干扰(如冰冻、洪水等自然灾害和动物、人类的活动等)被认为是造成森林群落整体结构改变的動力之一。有学者通过对古田山常绿阔叶林2008年冰雪灾害前后凋落量定位观测显示:冰雪灾害后叶凋落量减少极其显著^[11];但也有学者通过对九连山常绿阔叶林凋落量的研究表明,雪灾过后由于“非正常凋落物”的增加,叶凋落量会有所增加^[12]。

2008年冰雪灾害后,大岗山地区约54.48%±17.58%的竹子受到了损害,其中弯曲、折干和根倒分别占17.01%±7.28%、22.37%±11.58%和15.11%±11.54%。死亡竹子的干物质平均为(16.42±7.09) t·hm⁻²,占该地区竹林地上总生物量的37.73%±14.41%^[21]。

由于没有雪灾之前的凋落量数据,定量分析冰雪灾害对该区毛竹林本身凋落量的影响比较困难;但从凋落动态的稳定性来看,无论是季节动态分布,还是凋落量峰谷值出现的时间,相对于之前的各个阶段,距离冰雪灾害时间较远的第二小年,即2010年6月前后开始,其凋落特征更接近于相同区域内未受灾的毛竹林分^[6]。第一大年(2009年6月至2010年5月)虽然显现了其凋落大年一定的规律性,但可能是由于雪灾对高海拔的干扰较低海拔大,高海拔、低海拔间出现了凋落量峰谷值的错位现象,而距离冰雪灾害较久的第二大年(2011年6月至2011年12月)却没有出现这一现象。因此可以认为大致从第二小年,即2010年6月前后开始,该地区毛竹林凋落量已经逐渐恢复到了灾前的正常状态,即高海拔、低海拔间各种动态存在的差异消失。因此,本研究结果也可以作为该地区毛竹林灾后恢复状况的评定指标之一。

参考文献:

- [1] Coronado-Molina C, Alvarez-Guillen H, Day J W *et al.* Litterfall dynamics in carbonate and deltaic mangrove ecosystems in the Gulf of Mexico [J]. *Wetlands Ecology and Management*, 2012, 20(2): 123-136
- [2] Saarsalmi A, Starr M, Hokkanen T *et al.* Predicting annual canopy litterfall production for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 242(2): 578-586
- [3] 林波,刘庆,吴彦等. 森林凋落物研究进展 [J]. *生态学杂志*, 2004, 23(1): 60-64
- [4] Magnani F, Mencuccini M, Borghetti M *et al.* The human footprint in the carbon cycle of temperate and boreal forests [J]. *Nature*, 2007, 447(7146): 849-851
- [5] 江泽慧. 抓住机遇 开创未来 加速推进我国竹产业发展——江泽慧同志在中国竹产业协会第三次会员代表大会暨三届一次理事会上的讲话 [J]. *竹子研究汇刊*, 2002, 21(1): 1-8
- [6] 傅懋毅,方敏瑜,谢锦忠等. 竹林养分循环 I. 毛竹纯林的叶凋落物及其分解 [J]. *林业科学研究*, 1989, 2(3): 207-213
- [7] 廖旭祥. 武夷山毛竹纯林和竹阔混交林凋落物动态 [J]. *林业勘察设计*, 2010(1): 61-63
- [8] 崔向慧,李海静,王兵. 江西大岗山常绿阔叶林生态系统水量平衡的研究 [J]. *林业科学*, 2006, 42(2): 8-12
- [9] Polyakova O, Billor N. Impact of deciduous tree species on litterfall quality, decomposition rates and nutrient circulation in pine stands [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 253(1-3): 11-18
- [10] Pandey R R, Sharma G, Tripathi S K *et al.* Litterfall, litter decomposition and nutrient dynamics in a subtropical natural oak forest and managed plantation in northeastern India [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1): 96-104
- [11] 张磊,王晓荷,米湘成等. 古田山常绿阔叶林凋落量时间动态及冰雪灾害的影响 [J]. *生物多样性*, 2011, 19(2): 206-214
- [12] 毛双燕. 冰雪灾害后九连山常绿阔叶林凋落物量及分解动态 [D]. 北京: 北京林业大学, 2011: 25-26
- [13] Kaspari M, Garcia M N, Harms K E *et al.* Multiple nutrients limit litterfall and decomposition in a tropical forest [J]. *Ecology Letters*, 2008, 11(1): 35-43
- [14] 官丽莉,周国逸,张德强等. 鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物量20年动态研究 [J]. *植物生态学报*, 2004, 28(4): 449-456
- [15] Cuevas E, Lugo A E. Dynamics of organic matter and nutrient return from litterfall in stands of ten tropical tree plantation species [J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 112(3): 263-279
- [16] Tateno R, Tokuchi N, Yamanaka N *et al.* Comparison of litterfall production and leaf litter decomposition between an exotic black locust plantation and an indigenous oak forest near Yanan on the Loess Plateau, China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, 241(1): 84-90
- [17] Li X, Hu Y, Han S *et al.* Litterfall and litter chemistry change over time in an old-growth temperate forest, northeastern China [J]. *Annals of forest science*, 2010, 67(2): 206-213
- [18] Kitayama K, Aiba S I. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo [J]. *Journal of Ecology*, 2002, 90(1): 37-51
- [19] Raich J W, Russell A E, Vitousek P M. Primary productivity and ecosystem development along an elevational gradient on Mauna Loa, Hawaii [J]. *Ecology*, 1997, 78(3): 707-721
- [20] 郑征,李佑荣,刘宏茂等. 西双版纳不同海拔热带雨林凋落量变化研究 [J]. *植物生态学报*, 2006, 29(6): 884-893
- [21] Zhou B, Li Z, Wang X *et al.* Impact of the 2008 ice storm on moso bamboo plantations in southeast China [J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2011, 116: 1-10