

杉木、木荷纯林及其混交林凋落物量和碳归还量*

杨智杰^{1,2} 陈光水^{1,2} 谢锦升^{1,2} 杨玉盛^{1,2**}

(¹ 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; ² 湿润亚热带生态-地理过程省部共建教育部重点实验室, 福州 350007)

摘要 2005年5月—2007年4月,研究了福建省建瓯市水土保持科教园内19年生杉木人工林、木荷人工林和杉-荷混交林凋落物量和碳归还量.结果表明:3种人工林的年均凋落物量分别为2470.85、4171.96和4285.99 kg·hm⁻²·a⁻¹,不同人工林中凋落物均以落叶为主,占林分年总凋落量的68.62%~87.26%.杉木人工林凋落物量在每年的4—5月、7月和12月出现3次较大峰值,而木荷人工林和杉-荷混交林凋落物量的峰值仅出现在每年的3月份.与人工纯林相比,混交林促进了阔叶树种的单株凋落物量增加,但抑制了针叶树种的凋落物量.落叶是3种人工林凋落物碳归还的主体,人工林碳年归还总量大小顺序与年均凋落量相同,其中杉-荷混交林最高(2.12 t·hm⁻²·a⁻¹),杉木人工林最低(1.19 t·hm⁻²·a⁻¹).与针叶和阔叶人工纯林相比,针阔混交林的凋落量大、碳归还量高,具有良好的碳吸存能力.

关键词 杉木 木荷 混交林 凋落物 碳归还量

文章编号 1001-9332(2010)09-2235-06 **中图分类号** S718.5 **文献标识码** A

Litter fall production and carbon return in *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba*, and their mixed plantations. YANG Zhi-jie^{1,2}, CHEN Guang-shui^{1,2}, XIE Jin-sheng^{1,2}, YANG Yu-sheng^{1,2} (¹College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; ²Province-Ministry Co-construct Ministry of Education Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process, Fuzhou 350007, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2010, 21(9): 2235–2240.

Abstract: From March 2005 to April 2007, an investigation was made on the litter fall production and carbon return of *Cunninghamia lanceolata*, *Schima superba*, and their mixed plantations in the Jian'ou Science and Education Park of Soil and Water Conservation, Fujian. In these three plantations, the mean annual litter fall production was from 2470.85 kg·hm⁻²·a⁻¹ to 4285.99 kg·hm⁻²·a⁻¹, and dominated by leaf litter, accounting for 68.62%–87.26% of the total production. In *C. lanceolata* plantation, the litter fall production peaked in April–May, July, and December; while in *S. superba* and mixed plantations, this production only peaked in March. Comparing with pure plantations, mixed plantation had a higher litter fall production per tree of broadleaved *S. superba* while a lower litter fall production per tree of coniferous *C. lanceolata*. Leaf litter in the three plantations was the main body of the litter falls carbon return, and the total amount of the carbon return was the largest (2.12 t C·hm⁻²·a⁻¹) in mixed plantation and the smallest (1.19 t C·hm⁻²·a⁻¹) in *C. lanceolata* plantation, which was in accordance with the annual litter fall production of the plantations. This study demonstrated that comparing with pure coniferous or broadleaved plantation, coniferous-broadleaved mixed plantation had higher annual litter fall production and carbon return, and thus, higher potential of C sequestration.

Key words: *Cunninghamia lanceolata*; *Schima superba*; mixed plantation; litter fall; carbon return.

受温度、降水和风等气候因素的影响,森林凋落物量具有明显的季节和年际变化^[1].陆地生态系统凋落物每年生产的碳量约6.0 t·C·hm⁻²^[2],而且

森林凋落物中碳的滞留时间小于矿质土壤,易于分解,其对树种组成、经营措施和环境条件变化的响应更为快速^[3–4],因此,森林凋落物的碳归还还是森林碳循环过程的重要环节之一.

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国亚热带

* 国家自然科学基金项目(40901126,30571488)资助.

** 通讯作者. E-mail: geoyys@fjnu.edu.cn

2010-03-03 收稿,2010-07-02 接受.

地区特有的优良、速生乡土用材树种,广泛分布于我国南方 16 个省(区),是南方集体林区的主要森林类型之一. 随着杉木林连栽代数 and 连栽面积逐渐增加,杉木纯林地力衰退现象十分明显^[5]. 与针叶林相比,乡土阔叶树种在涵养水源和维护生物多样性等方面具有重要的作用^[6],而且其凋落物量大,养分归还量高,分解和腐殖化进程快^[7];其中杉-阔混交林被认为是维持杉木人工林长期生产力的较好途径之一^[5]. 因此,通过调整树种结构,研究不同经营类型人工林凋落物的动态变化及碳归还量对保持林地的长期生产力具有重要的科学意义^[8]. 本研究以福建省建瓯市水土保持科教园内 1987 年同期造林的杉木人工林、木荷人工林和杉木-木荷人工混交林为对象,通过定位监测,研究不同树种组成人工林凋落物产量及其组分动态、凋落物 C 年归还量,以期为人工林的科学经营管理和选择最佳碳吸存措施提供科学数据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究地概况

试验地位于福建省建瓯市东门牛坑垅(27°04' N, 118°23' E),地处武夷山脉东南,鹫峰山脉西北,为低山丘陵地貌. 该地区属中亚热带海洋性季风气候,年平均气温 18.7℃,最高气温 41.4℃,最低气温-7.3℃,年平均降水量为 1663.7 mm,降雨多集中在 3-8 月,蒸发量 1327.3~1605.4 mm,年平均湿度 80%,年均日照时数 1812.7 h. 土壤为白垩纪钙质、泥质砂砾岩发育的山地红壤.

试验林地的前身均为杂木林地,坡向相同,1986 年 10 月皆伐. 1987 年 2 月分别用木荷和杉木统一规格苗造林,挖穴造林,穴长×宽×深为 40 cm×40 cm×40 cm,株行距均为 2 m×2 m,3 种人工林地的管理措施相同,混交林比例为阔叶树与针叶树 1:1,杉

木人工林林地坡度 23.5°,保留密度为 2500 株·hm⁻²,平均胸径和树高分别为 11.22 cm 和 9.14 m;木荷人工林林地坡度 26.5°,保留密度 2350 株·hm⁻²,平均胸径和树高分别为 9.66 cm 和 10.20 m;杉木-木荷混交林林地坡度为 23.5°,杉木保留密度为 1520 株·hm⁻²,平均胸径和树高分别为 11.35 cm 和 9.68 m,木荷保留密度为 1200 株·hm⁻²,平均胸径与树高分别为 10.23 cm 和 10.94 m. 林下植被灌木以短尾越橘(*Vaccinium carlesii*)、黄瑞木(*Adinandra millettii*)、乌药(*Lindera aggregate*)、山胡椒(*Lindera glauca*)、白花龙(*Styrax faberi*)、乌饭树(*Vaccinium bracteatum*)和金樱子(*Rosa laevigata*)等为主;草本以芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)为主(占 70%),另有少量狗脊蕨(*Woodwardia japonica*)、乌蕨(*Stenoloma chusana*)分布. 土壤基本理化性质见表 1.

1.2 研究方法

在 3 种人工林中分别设立 3 个 20 m×20 m 标准地,按随机加局部控制的原则(兼顾密度、坡向和坡位),在每个标准地内分别布设 5 个 0.5 m×1 m 的收集框,离地 20~25 cm 水平置放,收集框上的尼龙网布孔径为 1 mm. 2005 年 5 月至 2007 年 4 月月末(28 日)收集每个框架内的凋落物,同时观测林内外湿度、气温、地温和土壤含水量等. 每个收集框内的凋落物按叶、枝(包括树皮和枝皮)、花、球果(包括脱落的种子)、其他叶(目的树种外的叶片组织)、其他枝(目的树种外的枝条组织)和其他组分(主要为虫鸟粪、蛹、小动物残体等)分成 5 个组分,于 80℃下烘干后称量. 按组分将每个标准地内 5 个收集框中的样品混合(混交林中凋落物按不同树种各组分凋落物量占总凋落量的比例分别取样,然后混合),将样品磨碎,过 60 目筛后贮存于广口瓶中,备用. 凋落物 C 含量采用 CN 元素分析仪(Elementar Vario EL III, 德国)测定. 由于样品量较少,将其他

表 1 试验地土壤基本理化性质
Tab.1 Physical and chemical characters of soils under different forest types

林 型 Forest type	0~20 cm 土层 0-20 cm soil layer					20~40 cm 土层 20-40 cm soil layer				
	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	全氮 Total N (g·kg ⁻¹)	全磷 Total P (g·kg ⁻¹)	全钾 Total K (g·kg ⁻¹)	容重 Bulk density (g·cm ⁻³)
木荷纯林 <i>S. superba</i> pure forest	29.9	0.94	0.62	6.03	1.08	16.0	0.61	0.45	7.91	1.27
杉木纯林 <i>C. lanceolata</i> pure forest	28.0	0.81	0.40	6.27	1.28	16.8	0.63	0.40	9.38	1.15
混交林 Mixed forest	30.3	0.95	0.66	6.22	1.06	17.3	0.61	0.43	8.21	1.16

叶、其他枝和其他组分 3 个组分合并后,进行 C 含量测定.凋落物 C 年归还量=各组分碳含量×各组分凋落物年归还量的总和.

1.3 数据处理

采用单因素方差分析方法和 LSD 多重比较分析不同林分凋落物组分的月变化、凋落物及各组分年归还量的差异.采用独立样本 *t* 检验方法分析不同年份各林分凋落物及各组分年归还量间的差异.所有分析均在 SPSS 13.0 统计软件上进行,显著性水平定为 $\alpha=0.05$.

2 结果与分析

2.1 不同林型人工林凋落物的年产量

凋落物是森林自我培肥地力的主要来源之一,凋落物数量受气候、林木组成和立地条件等因素的影响.由表 2 可以看出,杉-荷混交林和木荷人工林凋落物年均总量显著高于杉木人工林,但混交林和阔叶林间没有显著差异,3 种人工林 2005 年凋落总量均显著高于 2006 年.杉-荷混交林凋落总量以木荷凋落物为主,达 83.67%,与两种人工纯林相比,阔叶树种凋落物量显著增加,而针叶树种凋落物量减少;2 年间,单位面积混交林中木荷凋落物总量比木荷人工林分别增加 56.82% 和 67.32%,而不同年份混交林中杉木凋落物总量比相邻的杉木人工林分别减少了 37.04% 和 42.01%.因此,混交林有利于提高阔叶树种的凋落物产量,但抑制针叶树种的凋

落物产量.
2.2 不同林型人工林凋落物的组成

森林凋落物的组成主要有落叶、落枝、落花、落果及其他组分等.由表 2 可以看出,不同人工林间的年凋落物量有较大差异,但在组成上均以落叶和落枝为主,其中凋落叶量占总凋落物量的 68.62% ~ 87.26%.杉木人工林凋落叶的比例最小,木荷人工林最大;而凋落枝所占比例则与凋落叶相反,杉木人工林最大(21.48%),木荷最小(5.36%).3 种人工林各组分占年总凋落物量的比例较接近,其大小顺序分别为落叶>落枝>落果>其他组分>落花.

2.3 不同林型人工林凋落物的月变化

在中亚热带地区,常绿乔木林全年内均有凋落物产生,但各月的凋落物组分和数量呈现出不规则的多峰变化.由图 1 可以看出,杉木人工林凋落物总量变化每年均在 4—5 月、7 月和 12 月出现 3 个高峰,以 4—5 月的凋落量最大,占全年总凋落量的 14.35% ~ 54.43%.2006 年 4 月受大风的影响,大量的大枝条凋落,其中杉木人工林凋落叶量占年凋落叶总量的 54% 以上,而枝凋落量占年枝总凋落量的 58%,造成当月凋落叶远高于其他人工林.两年中 10—11 月的凋落量最小,占全年总量的比例 < 0.1%.木荷人工林和杉-荷混交林凋落物总量的变化模式相似,整年中的波动较大,在 3 月达到最高,占年凋落物总量的 20% 以上.

表 2 不同林分凋落物数量及组成
Tab.2 Average dry mass of different fractions of litter in three plantations (mean±SD, kg · hm⁻² · a⁻¹)

林 型 Forest type	木荷纯林 <i>S. superba</i> pure forest			杉木纯林 <i>C. lanceolata</i> pure forest			混交林 Mixed forest		
	2005	2006	平均 Average	2005	2006	平均 Average	2005	2006	平均 Average
叶 Leaf	3991.78± 657.61	3289.38± 538.42	3640.58± 339.24Aa	2260.87± 356.42	1129.88± 789.47	1695.38± 150.61Ab	3910.46± 730.46	3033.89± 357.23	3472.17± 495.42Aa
枝 Branch	211.59± 184.24	235.56± 279.27	223.57± 20.89Bb	753.82± 159.63	307.52± 117.31	530.67± 20.67Ba	540.98± 220.65	622.74± 517.41	581.86± 126.86Ba
花 Flower	16.06± 22.83	85.30± 125.65	50.68± 26.34Ea	14.32± 5.24	13.89± 9.82	14.10± 6.20Fb	29.56± 24.62	62.43± 36.23	45.99± 12.31a
果 Fruit	111.53± 144.62	24.48± 43.21	68.01± 44.19Db	111.44± 68.42	47.38± 33.10	79.41± 33.74Dc	122.04± 58.21	83.73± 38.62	102.88± 18.01Ca
其他叶 Other leaf	148.59± 304.84	101.70± 115.11	125.14± 12.74Ca	74.14± 39.22	140.12± 69.82	107.13± 25.54Ca	19.61± 31.82	42.85± 25.65	31.23± 25.23Eb
其他枝 Other branch	5.96± 7.67	13.67± 23.86	9.82± 8.47Fa	2.22± 3.41	5.84± 11.21	4.03± 1.94Gb	9.81± 2.23	0.56± 1.41	5.18± 1.06Fb
其他组分 Others	71.09± 54.86	37.35± 28.27	54.22± 2.80Ea	49.92± 49.82	30.16± 19.82	40.04± 7.56Eb	44.79± 29.21	48.62± 13.62	46.71± 9.16Db
合计 Sum	4556.54± 701.26	3787.38± 598.63	4171.96± 169.96a	3266.90± 424.83	1674.79± 813.81	2470.85± 193.951b	4677.14± 744.25	3894.84± 637.23	4285.99± 410.26a

同列数据后不同大写字母表示差异显著 ($P<0.05$),同行数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different capital letters in the same column or different small letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

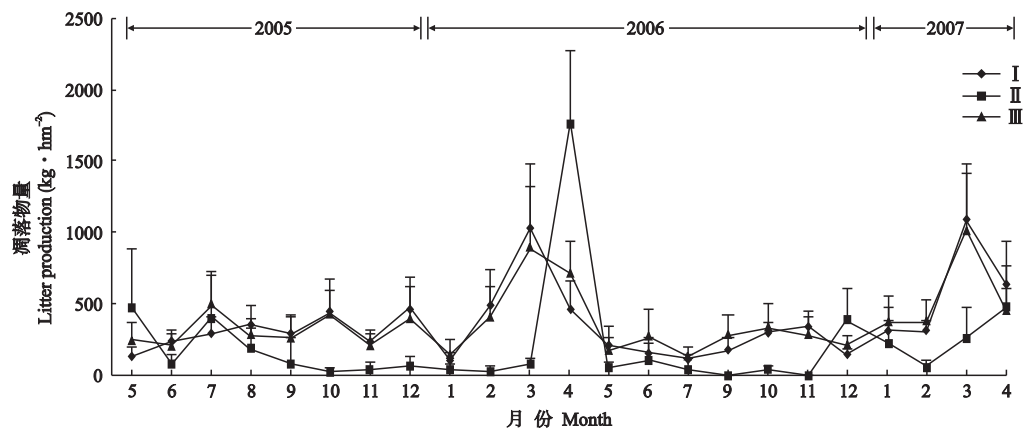


图1 不同林分凋落物季节动态变化

Fig.1 Variation in total litter production for the three plantations (mean±SD).

I :木荷纯林 *S. superba* pure forest; II :杉木纯林 *C. lanceolata* pure forest; III :混交林 Mixed forest.

表3 凋落物各组分 C 含量

Tab.3 Carbon content in litterfall fractions (mean±SD, %)

林 型 Forest type	叶 Leaf	枝 Branch	花 Flower	果 Fruit	其他 All others
木荷纯林 <i>S. superba</i> pure forest	49. 46±2. 03	48. 14±1. 45	48. 60±2. 64	48. 79±3. 47	34. 71±6. 99
杉木纯林 <i>C. lanceolata</i> pure forest	49. 96±2. 16	48. 55±1. 74	51. 35±3. 34	50. 59±2. 36	48. 05±5. 39
混交林 Mixed forest	49. 60±1. 98	48. 44±1. 48	49. 00±2. 86	49. 13±3. 21	50. 23±6. 52

2.4 不同林型人工林凋落物 C 年归还量

由表3可以看出,不同人工林凋落物各组分的C含量在34.71%~51.35%,混交林与木荷人工林凋落物C年归还量均显著高于杉木人工林,但混交林与木荷人工林差异不显著.不同人工林凋落物各组分的碳年归还量均以凋落叶碳归还量为主(71.2%~90.8%),其次为凋落枝碳归还量(5.5%~23.2%).其中,木荷人工林凋落叶的C年归还量最高,而杉木人工林中凋落枝C年归还量最高($P<0.05$).

3 讨 论

3.1 树种组成对凋落物产量的影响

本研究中,杉-荷混交林和木荷人工林年均凋落量均显著高于杉木人工林,且杉-荷混交林年凋落物量高于木荷人工林.相同气候条件下,树种组成是影响森林凋落物产量的一个重要因素.与中亚热带常绿阔叶林相比,本研究中杉-荷混交林和木荷人工林的年凋落物总量均低于建瓯万木林细柄阿丁枫(*Altingia gracilipes*)和观光木(*Tsoongiodendron odorum*)群落年凋落物总量(6737和6345 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[9],亦低于福建三明莘口格氏栲(*Castanopsis*

kawakamii)天然林(11008 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、格氏栲人工林(9540 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[10]和木荚红豆(*Ormosia locarpa*)人工林(7846 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[11];同时也小于南亚热马占相思(*Acacia mangium*)、大叶相思(*A. auriculaeformis*)和木荷等人工林年凋落量(5.54~10.43 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)^[12];而与周玉荣等^[13]同一气候带我国主要森林生态系统阔叶树种年凋落物量高于针叶树种,针阔混交林大于针叶纯林的研究结果相似.杨玉盛等^[8]研究认为,杉木-观光木混交林年凋落物量略高于杉木纯林(分别为5.94和5.67 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$);而周东雄^[14]研究表明,杉木-乳源木莲混交林的年凋落物量要比杉木纯林提高3.15倍;林德喜等^[15]发现,在马尾松林下补植阔叶树种营造针阔人工混交林,可以显著提高林分年凋落物量,马尾松纯林的年凋落物量则比混交林低79%~134%;在我国东北主要森林生态系统中,针阔混交林年凋落物量(4.15 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)显著大于落叶针叶林(2.34 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)、常绿针叶林(2.47 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)和落叶阔叶林(3.13 $\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)^[16].

本研究中,杉-荷混交林和木荷人工林年凋落量高于高纬度地区的东北主要森林类型(包括落叶针叶林和常绿针叶林、落叶针叶林、常绿针叶林、落叶

阔叶林和针阔叶混交林等,年平均凋落物产量在 $2337 \sim 4146 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ [16]。研究表明,凋落物量与纬度和年平均温度呈极显著负相关 [17], 温度是影响森林凋落量的主要因子 [18]。同时,林分生物量也是影响森林凋落物产量的一个重要因素。本研究中 3 种人工林林分生物量大小顺序为: 杉-荷混交林 ($175.90 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 木荷人工林 ($170.26 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) > 杉木人工林 ($108.23 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) (未发表数据), 与 3 种人工林凋落物数量呈正相关。从林木单株凋落物产量上看, 本研究中, 木荷人工林中木荷单株凋落物产量 ($1.78 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$) 低于杉-荷混交林中阔叶树种的凋落物产量 ($2.91 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$), 且差异显著; 而杉木人工林杉木单株凋落物产量 ($0.99 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$) 显著高于混交林中杉木的凋落物产量 ($0.52 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$), 说明混交林抑制了针叶树种的凋落物产量, 但促进了阔叶树种凋落物产量的增加。

林龄是影响森林凋落物大小的重要因子之一。本研究中, 杉木人工林年均凋落量 ($2.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 低于福建三明 33 年生杉木林 ($5.47 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) [8], 但高于 14 ~ 16 年生杉木人工林 ($1.20 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) [19]。马祥庆等 [20] 研究发现, 杉木幼龄林、中龄林和成熟林的年凋落物总量分别为 1060、3100 和 $4180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 黄承才等 [21] 对浙江省 32 个典型样地杉木生态公益林凋落物调查发现, 幼龄林平均年凋落量为 $562 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 、中龄林、中龄杉木优势林平均年凋落量为 $1215 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 成熟林年凋落物总量为 $3272 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 宁晓波等 [22] 对湖南会同杉木林 20 年的定位观测研究表明, 凋落物量随林龄而变化, 且呈显著的二次曲线相关 ($P < 0.001$)。由此可见, 不同林龄杉木林的年凋落量差异较大。随着林龄增加, 凋落量也相应增加, 表现为成熟林 > 中龄林 > 幼龄林。

3.2 树种组成对凋落物组成的影响

凋落叶是森林凋落物的主要组成部分。本研究中 3 种人工林凋落叶量占总凋落量的 68.62% ~ 87.26%, 中亚热带针叶人工林和天然常绿阔叶林凋落叶占总凋落物的 62% ~ 69% [9], 我国东北主要森林类型凋落叶的比例在 71% [16]; 亚热带 4 种人工林凋落叶所占比例达到 83.2% ~ 93.7% [12]。凋落叶主要受树种组成和气温的影响 [1]。本研究中, 杉-荷混交林与木荷人工林两年的凋落量均以 3 月最高, 占年凋落物总量的 20% 以上; 杉木人工林在 4 月份达到最高。这与春季温度升高、多数常绿树木新叶大量萌发、衰老叶子相继脱落有关 [9]。而凋落枝量随

机性较大, 通常与物候的相关性较低, 而受风等气候因素影响, 不同月份间凋落枝变化极大, 如 2006 年 4 月杉木人工林凋落枝比例占到当月凋落物总量的 25%, 高于其在全年中的平均比例。不同针阔叶树种间生理生态学特征与生长分配策略的差异也是导致不同森林类型之间各组分凋落量差异的主要原因。本研究中, 3 种人工林的繁殖器官存在着明显差异, 杉木人工林落花的比例最小, 而落枝、落果的比例最大。

3.3 树种组成对凋落物碳归还量的影响

本研究中, 3 种人工林凋落物碳归还量 ($1.19 \sim 2.12 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 均在世界范围内森林生态系统的凋落物碳归还量 ($0.05 \sim 7.50 \text{ t C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 范围之内 [23]。杉木和木荷人工林凋落物 C 年归还量与福建三明杉-荷混交林 ($2.53 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) 和杉木人工林 ($2.50 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) [24] 相近, 小于云南哀牢山木果柯天然林 ($3.24 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) [25] 和广东鼎湖山马尾松-木荷混交林 ($4.02 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$) [26], 这主要与不同林分凋落量的差异有关。不同树种组成引起的凋落量组成差异也是不同森林类型 C 归还差异的原因之一。落叶是凋落物 C 归还的主要组分, 同时, 叶片又是林木最大的养分储存库 [27], 在森林生态系统养分循环中起着重要作用。本研究中, 木荷人工林凋落叶 C 年归还量占到总归还量的 90.78%, 而杉木人工林仅为 71.18%, 杉-荷混交林达到 81.28% (表 2)。我国森林中针叶林、针阔混交林年凋落 C 量均值为 $2.58 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 阔叶树种凋落物 C 年归还量高于针叶树种, 针阔混交林高于针叶纯林 [12]。本研究中, 3 种人工林凋落物 C 年归还量为: 针阔混交林 > 阔叶林 > 针叶林, 均小于我国平均水平, 与我国主要森林生态系统凋落物 C 年归还变化模式基本相似。

参考文献

- [1] Peng S-L (彭少麟), Liu Q (刘 强). The dynamics of forest litter and its responses to global warming. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2002, **22**(9): 1534–1544 (in Chinese)
- [2] Malhi Y, Baldocchi DD, Jarvis PG. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forests. *Plant, Cell and Environment*, 1999, **22**: 715–740
- [3] Gaudinski JB, Trumbore SE, Davidson EA, et al. Soil carbon cycling in a temperate forest: Radiocarbon-based estimates of residence times, sequestration rates, and partitioning of fluxes. *Biogeochemistry*, 2000, **51**: 33–69
- [4] Yang W-Q (杨万勤), Deng R-J (邓仁菊), Zhang J (张 健). Forest litter decomposition and its responses

- to global climate change. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2007, **18** (12): 2889–2895 (in Chinese)
- [5] Yang Y-S (杨玉盛). Studies on the Sustainable Management of Chinese Fir. Beijing: China Forestry Press, 1998 (in Chinese)
- [6] Huang R-Z (黄荣珍), Yang Y-S (杨玉盛), Xie J-S (谢锦升), *et al.* Properties of soil reservoir capacity in different forest land types in Minjiang River upper reaches of Fujian. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2005, **3** (2): 92–96, 101 (in Chinese)
- [7] Wu Z-D (吴志东), Peng F-Q (彭福泉), Che Y-P (车玉萍), *et al.* Characteristics of the biological material cycling of several types of artificial forests and their influence on soils in south subtropical China. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 1990, **27** (3): 251–259 (in Chinese)
- [8] Yang Y-S (杨玉盛), Yu B-N (俞白楠), Xie J-S (谢锦升), *et al.* Amount, composition and seasonal dynamics of litterfall in mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2001, **37** (suppl. 1): 30–34 (in Chinese)
- [9] Guo J-F (郭剑芬), Chen W-S (陈光水), Qian W (钱伟), *et al.* Litter production and nutrient return in two natural forests and a *Cunninghamia lanceolata* plantation in Wanmulin Nature Reserve. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26** (12): 4091–4098 (in Chinese)
- [10] Yang Y-S (杨玉盛), Lin P (林鹏), Guo J-F (郭剑芬). Litter production, nutrient return and leaf-litter decomposition in natural and monoculture plantation forests of *Castanopsis kawakamii* in subtropical China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23** (7): 1278–1289 (in Chinese)
- [11] Lin R-Y (林瑞余), He Z-M (何宗明), Chen G-S (陈光水). Seasonal dynamics of litterfall in *Ormosia xylocarpa* plantation. *Journal of Fujian College of Forestry* (福建林学院学报), 2002, **22** (1): 65–69 (in Chinese)
- [12] Zou B (邹碧), Li Z-A (李志安), Ding Y-Z (丁永楨), *et al.* Litterfall of common plantations in south subtropical China. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26** (3): 715–721 (in Chinese)
- [13] Zhou Y-R (周玉荣), Yu Z-L (于振良), Zhao S-D (赵士洞). Carbon storage and budget of major Chinese forest types. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24** (5): 518–522 (in Chinese)
- [14] Zhou D-X (周东雄). Litter of mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Manglietia yuyuanensis*. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2005, **24** (6): 595–598 (in Chinese)
- [15] Lin D-X (林德喜), Fan H-B (樊后保). Changes in amount, nutrient contents and turnover time of forest litter after interplanting hardwood species under Masson pine stand. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2005, **41** (6): 7–15 (in Chinese)
- [16] Zhang X-P (张新平), Wang X-P (王襄平), Zhu B (朱彪), *et al.* Litter fall reproduction in relation to environmental factors in northeast China forests. *Chinese Journal of Plant Ecology* (植物生态学报), 2008, **32** (5): 1031–1040 (in Chinese)
- [17] Ling H (凌华), Chen G-S (陈光水), Chen Z-Q (陈志勤). Controlling factors of litterfall in China's forest. *Journal of Subtropical Resources and Environment* (亚热带资源与环境学报), 2009, **4** (4): 66–71 (in Chinese)
- [18] Liu CJ, Carl JW, Björn B, *et al.* Variation in litterfall-climate relationships between coniferous and broadleaf forests in Eurasia. *Global Ecology and Biogeography*, 2004, **13**: 105–114
- [19] Fang X (方晰), Tian D-R (田大伦), Xiang W-H (项文化), *et al.* Carbon release ratios in the decomposition process of litter. *Journal of Central South Forestry University* (中南林学院学报), 2005, **25** (6): 12–16 (in Chinese)
- [20] Ma X-Q (马祥庆), Liu C-J (刘春江), Hannu I, *et al.* Biomass, litterfall and the nutrient fluxes in Chinese fir stands of different age in subtropical China. *Journal of Forestry Research*, 2002, **13**: 165–170
- [21] Huang C-C (黄承才), Zhang J (张骏), Jiang B (江波), *et al.* The litter of Chinese fir ecological public-welfare forest in Zhejiang Province and its relationship with plant diversity. *Scientia Silvae Sinicae* (林业科学), 2006, **42** (6): 7–12 (in Chinese)
- [22] Ning X-B (宁晓波), Xiang W-H (项文化), Wang G-J (王光军), *et al.* Litterfall production and dynamic for twenty years of a successive replanting *Cunninghamia lanceolata* plantation at Huitong, Hunan. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29** (9): 5122–5129 (in Chinese)
- [23] Raich JW, Schlesinger WH. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, **44B**: 81–99
- [24] Yang Y-S (杨玉盛), Xie J-S (谢锦升), Wang Y-X (王义祥), *et al.* Carbon stock and carbon sequestration in mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Tsoongiodendron odorum*. *Journal of Beijing Forestry University* (北京林业大学学报), 2003, **25** (5): 10–14 (in Chinese)
- [25] Liu WY, Fox JED, Xu ZF. Biomass and nutrient accumulation in montane evergreen broadleaved forest (*Lithocarpus xylocarpus* type) in Ailao Mountains, SW China. *Forest Ecology and Management*, 2002, **158**: 223–235
- [26] Fang Y-T (方运霆), Mo J-M (莫江明), Huang Z-L (黄忠良), *et al.* Carbon accumulation and distribution in *Pinus massoniana* and *Schima superba* mixed forest ecosystem in Dinghushan Biosphere Reserve. *Journal of Tropical and Subtropical Botany* (热带亚热带植物学报), 2003, **11** (1): 47–52 (in Chinese)
- [27] Miller HG, Cooper JM, Miller JD, *et al.* Nutrient cycles in pine and their adaptation to poor soils. *Canadian Journal of Forest Research*, 1979, **9**: 19–26

作者简介 杨智杰,男,1982年生,硕士,研究实习员.主要从事森林碳循环研究. E-mail: daoyang9@163.com

责任编辑 李凤琴