

青藏高原主要森林类型凋落物碳储量及空间分布格局

杨 阳 王根绪* 冉 飞 常瑞英

(中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

摘 要 凋落物是森林生态系统的重要组成部分,其作为养分的基本载体,在养分循环中是连接植物与土壤的“纽带”,其碳库直接影响着土壤碳库及森林生态系统的碳库。本文以青藏高原冷杉、云杉、高山松、云南松、高山栎、柏木森林类型为研究对象,采用直接收获法对森林凋落物碳储量进行研究。结果显示:凋落物碳储量随着龄级的增大而增加;凋落物碳储量随海拔的升高而增加,在 3200~3600 m 碳储量最大,随后碳储量开始下降;林芝地区凋落物碳储量最大,其次是山南地区和日喀则地区,最小的是昌都地区。

关键词 西藏; 森林类型; 凋落物; 碳储量; 海拔; 龄级

Litter carbon stock and spatial patterns of main forest types in Tibet. YANG Yang, WANG Gen-xu*, RAN Fei, CHANG Rui-ying (Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610014, China).

Abstract: Litter is an important linkage between plant and soil in nutrient cycles because it is not only a key component consisting of forest ecosystems, but also is the essential carrier for nutrients. Thus, changes of carbon stock in litter can directly affect the carbon stocks in soil and forest ecosystems. In this study *Abies georgei* var. *smithii*, *Picea asperata*, *Pinus densata*, *Pinus yunnanensis*, *Quercus semecarpifolia*, *Cupressus funebris* forests in the Tibetan Plateau were selected as target vegetation types, and a direct harvesting method was employed to collect litter in the study sites. In general, carbon storage of litter showed a tendency of higher values with increasing stand ages. Additionally, the carbon storage of litter firstly increased with increasing elevation, and then a subsequent decrease in carbon storage occurred with increasing elevation. The largest carbon storage value was observed in sites with elevations ranging from 3200 to 3600 m. Spatially, the largest carbon storage value occurred in Linzhi, followed by Shannan and Shigatse, and the lowest in Changdu.

Key words: Tibet; forest type; litter; carbon storage; altitude; stand age.

森林凋落物是森林生态系统功能过程中的重要组成部分,既是林木自身的代谢产物,又是森林土壤养分的重要来源,对土壤肥力、土壤理化性质、植物生产力及森林生态系统碳循环方面具有重要作用,同时凋落物在涵养水源、水土保持等方面具有决定性作用 (Hoorens *et al.* 2003; Fife *et al.* 2008)。因此,森林凋

落物是维持土壤养分库、影响初级生产力、调节森林生态系统物质循环与能量流动的物质基础 (Waring *et al.* 1985; Blagoveshchenskii *et al.* 2006)。

目前,国内外学者已开展的森林凋落物研究主要集中在凋落物量及其动态 (原作强等, 2010; 徐旺明等, 2013; 李忠文等, 2013)、凋落物分解及其影响因素 (Prescott, 2005; Tuomi *et al.*, 2009; Vivanco *et al.* 2011; Moore *et al.* 2011)、凋落物养分归还动态 (Poll *et al.* 2008; Freschet *et al.* 2013; 葛晓改等, 2014; 马文济等, 2014) 等,而对青藏高原森林凋落物碳储量的研究还未见报道。森林凋落物碳储量是指

中国科学院战略性先导科技专项子课题 (XDA05050207)、中国科学院成都山地灾害与环境研究所“一三五”方向性专题 (SDS-135-1201) 和中国科学院重点部署项目-创新团队国际合作伙伴计划 (KZZD-EW-TZ-06) 资助。

收稿日期: 2015-06-29 接受日期: 2015-12-10

* 通讯作者 E-mail: wanggx@imde.ac.cn

单位面积林地上所积累的森林凋落物的碳含量,森林凋落物碳储量研究对认识森林生态系统功能具有十分重要的意义(潘紫重等,2002),更能准确地估算森林生态系统的碳库(Natha *et al.*, 2009)。Raich等(1992)估计全球因枯落物分解释放的CO₂量为68 Gt·a⁻¹,约占全球年C总流通量的70%。我国森林生态系统总碳库为28.116 Gt,其中凋落物层的碳储量为0.892 Gt,占总量的3.2%(周玉荣等,2000)。凋落物碳库值比较高,其动态又直接关系到土壤碳库,因此在生态系统中占有重要的地位(刘刚等,2010)。

青藏高原平均海拔4000 m以上,是青藏高原的主体部分,有着“世界屋脊”之称,西藏是我国重点国有林区之一,森林资源非常丰富。西藏地处青藏高原,受独特地形地貌的影响,气候条件差异较大,水热条件多变,植物种类丰富,森林类型多样,垂直带谱明显(何红艳,2008),但迄今为止,关于青藏高原生态系统特别是林下凋落物碳储量的研究还未见报道,而林下凋落物对整个生态系统的碳储量贡献研究还相当缺乏。本文对青藏高原主要森林类型凋落物碳储量现状及其空间分布格局进行研究,为阐明青藏高原凋落物物质循环及估算青藏高原森林生态系统碳收支提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

青藏高原是青藏高原的主体部分,青藏高原平均海拔4000 m,位于亚洲大陆西南部,26°52′N—36°32′N、78°24′E—99°06′E,总面积约120×10⁴ km²,占全国土地总面积的1/8左右,东临四川,西连可什米尔高原,北靠昆仑山—唐古拉山脉,南部横亘着平均海拔6000 m以上的喜马拉雅山脉。西藏气温地域差异明显,东南部河谷地区气温高,并表现出明显的垂直变化。温度最高的地方分布于雅鲁藏布江大拐弯以南低山区和横断山脉地区的“三江”并流区,年均气温分别在16和10℃以上,最热月均温分别在22和15℃以上;藏西北高原温度低,多数地区年均气温0℃以下,最冷月平均气温低于-10℃,极端最低温度达-44.6℃,一年中月均气温在0℃以下的月份长达6~7个月。西藏降水主要受暖湿西南季风支配,形成年降水量的空间变化规律如下:藏东南低山平原区年降水量达4000 mm以上,是我国降水量最多的地区之一;由此向西北地区

逐渐减少,藏北羌塘高原100~300 mm,藏西北改则、日土县北部不足100 mm,局部地区只有50 mm左右。研究区域位于整个西藏有林区,各地的气候因子见表1。在研究区域内,根据森林类型、龄级和面积设置代表样点,研究林下凋落物的碳储量和空间分布格局。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 西藏的森林基本上都是山地森林,海拔高差大、空间异质性很强,这给准确的碳评估带来了困难,因此选取样地要全面、具有代表性。在西藏实际控制区域内采用分层抽样,从区—县—乡—镇—村,布置样点,依据3个原则:(1)依据每个县域森林面积和蓄积量的实际分布情况,分配样点数(图1);(2)按不同森林类型的分布,把样点分解到每个县的每一种森林类型;(3)根据每个县实际森林分布,以及森林资源规划设计调查技术规程(GB/T 26424—2010),选取优势种有冷杉(*Abies georgei* var. *smithii*) 76个,云杉(*Picea asperata*) 116个,柏木(*Cupressus funebris*) 16个,高山松(*Pinus densata*) 29个,云南松(*Pinus yunnanensis*) 30个,高山栎

表1 各地区的气候因子

Table 1 Climate factor in different regions

森林类型	气候因子	昌都地区	林芝地区	日喀则地区	山南地区
冷杉	年均气温(℃)	3.70	8.97	3.68	5.40
	年降水量(mm)	567.90	733.06	520.73	356.54
云杉	年均气温(℃)	5.58	8.28		4.90
	年降水量(mm)	461.67	678.24		365.10
柏木	年均气温(℃)	3.59	7.00		5.40
	年降水量(mm)	541.00	619.20		280.10
高山栎	年均气温(℃)	3.70	7.57	3.80	
	年降水量(mm)	567.90	642.17	380.60	

各样点相邻气象站的年均气温和年均降水量等气象资料引自杜军等(2011)。

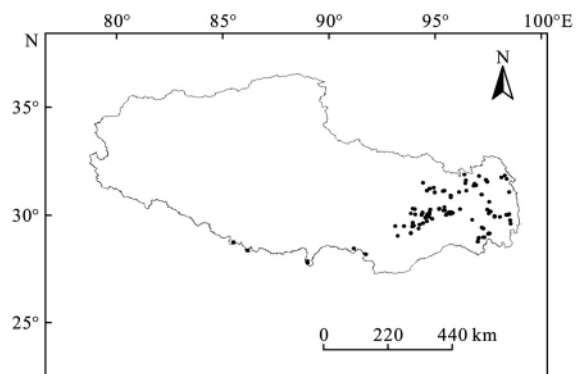


图1 西藏主要森林类型的样点分布示意图

Fig.1 Sampling site distribution of main forest types in Tibet

(*Quercus semecarpifolia*) 14 个, 桦木(*Betula*) 8 个, 这些都属于天然林分。

1.2.2 样方设置样方布设原则 在野外, 每一个样点布置了 3 个重复的 50 m×20 m 样方, 统一采用长方形, 而且样方边长至少大于该地段最高树木的树高。平行等高线方向为长边(50 m), 垂直等高线方向(顺坡)为短边; 样地四角用 PVC 管标记。样方内沿着对角线布设 3 个 1 m×1 m 凋落物样方。西藏主要天然森林类型的调查样方信息如表 2。

1.2.3 凋落物碳储量测定 2011 年 8 月, 将样方内凋落物全部收获, 带回实验室, 烘干后测定其干重, 即可得到凋落物量。如果样方内凋落物量比较

大, 收集整个样方内凋落物并称鲜重, 充分混匀后, 取一个有代表性的子样品称重后, 每个子样品不能少于 300 g, 带回实验室测定其干重, 得到鲜重/干重比换算系数, 将野外测定的每个样方框内的鲜重换成干重, 即可得到样方内凋落物的现存量。将烘干的样品粉碎。用重铬酸钾($K_2Cr_2O_7$) 容量法, 测定碳含量, 进而求出碳储量。选用公式如下(Brown *et al.*, 2005):

$$C = (W_d / W_f \times W_z) / S \times H \times Q$$

式中: C 是凋落物碳储量; W_d 是子样平均烘干重; W_f 是子样平均鲜重; W_z 是样方鲜样总重平均值; S 是样方面积; H 是林分面积; Q 是碳含量。

表 2 主要森林类型样方信息表

Table 2 Site situation of the investigated forest types

森林类型	龄级	经度(E)	纬度(N)	海拔(m)	郁闭度(°)	群落高度(m)
冷杉	幼龄林	94°34'—98°40'	28°48'—29°34'	3600~4000	0.7~0.9	8~11
	中龄林	88°54'—98°27'	27°23'—29°49'	3300~4000	0.6~0.8	15~19
	近熟林	93°34'—93°35'	29°33'	3800~4000	0.7~0.8	10~18
	成熟林	94°00'—98°40'	28°49'—29°47'	3200~4000	0.5~0.9	15~50
	过熟林	85°18'—97°40'	27°25'—29°59'	2700~4200	0.4~0.9	22~51
云杉	幼龄林	91°07'—98°38'	28°05'—31°35'	3200~4200	0.4~0.9	5~24
	中龄林	94°44'—98°35'	29°44'—31°38'	3400~4200	0.5~0.8	10~26
	近熟林	94°27'—97°37'	29°18'—31°13'	3200~4200	0.4~0.8	15~35
	成熟林	94°27'—97°29'	29°18'—31°22'	3200~4300	0.4~0.7	9~40
	过熟林	94°03'—97°36'	29°45'—30°52'	3200~4200	0.6~0.8	25~68
高山松	中龄林	93°32'—97°21'	28°19'—29°43'	2900~3300	0.3~0.8	16~25
	近熟林	93°06'—95°53'	29°02'—29°56'	2600~3600	0.4~0.8	20~28
	成熟林	93°06'—95°51'	29°09'—29°56'	2600~3600	0.5~0.7	24~31
	过熟林	93°06'—93°58'	28°19'—29°46'	3200~3600	0.5~0.8	26~34
云南松	幼龄林	97°16'—97°23'	28°05'—28°37'	2100~3200	0.5~0.7	6~14
	中龄林	97°20'—97°21'	28°37'—29°02'	2100~3000	0.5~0.8	14~22
	近熟林	97°09'—97°24'	28°35'—28°37'	1700~2800	0.4~0.6	16~24
	成熟林	97°07'—97°17'	28°34'—29°04'	1700~3000	0.4	27~30
柏木	幼龄林	93°10'	30°12'	4000~4100	0.5~0.6	3~18
	中龄林	93°18'—96°30'	28°41'—31°33'	3500~4400	0.5~0.8	4~19
	近熟林	93°18'—97°42'	28°41'—29°51'	3600~4000	0.5~0.8	8~19
	成熟林	97°41'	29°45'	4100~4200	0.7	10~19
	过熟林	93°10'—97°41'	29°45'—31°33'	4000~4200	0.7~0.8	10~25
高山栎	幼龄林	98°41'	29°14'	4000~4100	0.6~0.8	4~4
	中龄林	93°38'	29°54'	3400~3600	0.7~0.9	12~15
	近熟林	93°39'	30°52'	3200~3300	0.8~0.9	6~10
	成熟林	93°52'—93°53'	29°48'	3300~3400	0.5~0.5	11~15
桦木	幼龄林	93°00'	30°00'	3600~3700	0.5~0.7	9~10
	中龄林	93°6'	29°9'	3500~3700	0.7	15~20
	成熟林	91°43'	27°49'	2800~2900	0.7~0.8	28~31
落叶松	中龄林	94°54'	29°30'	3300~3400	0.8~0.9	20~36
乔松	中龄林	88°20'—88°54'	27°28'—28°23'	2800~3000	0.3~0.8	13~25
铁杉	成熟林	88°58'	27°23'	2800~2900	0.6~0.8	28~47
杨树	幼龄林	95°24'	29°55'	2500~2600	0.6~0.8	11~20
樟木	过熟林	85°59'	27°59'	2600~2700	0.8~0.9	18~20

表3 西藏主要森林类型不同龄级下凋落物碳储量 ($t \cdot hm^{-2}$)

Table 3 Carbon storage of the litter of main forest types with different age classes in Tibet

森林类型	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
冷杉	0.81±0.27 b	1.34±0.56 b	1.78±0.27 ab	2.78±0.46 a	2.68±0.36 a
云杉	0.29±0.02 c	0.62±0.19 bc	1.03±0.52 b	0.91±0.60 bc	2.10±0.60 a
云南松	0.31±0.07 b	0.33±0.08 b	0.62±0.03 a	0.53±0.11 ab	-
高山松	-	1.43±0.48 b	1.96±0.57 ab	3.38±0.66 a	2.77±0.27 ab
柏木	0.24±0.03 b	0.28±0.04 b	0.55±0.33 b	2.25±0.21 a	2.05±0.95 a
高山栎	0.23±0.03 c	3.50±0.17 b	5.79±1.20 ab	6.03±0.91 a	-

不同字母表示不同龄级间差异显著 ($P < 0.05$)，数值为平均值±标准误。

1.2.4 数据处理 利用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 统计软件对结果进行分析,采用单因素方差分析方法 (one-way ANOVA) 比较不同森林类型间或不同龄级间凋落物碳储量的差异性,显著性水平为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 凋落物碳储量

2.1.1 不同龄级下凋落物碳储量 本研究结果显示:在冷杉林下,成熟林和过熟林凋落物碳储量显著高于幼龄林和中龄林 (表3 $P < 0.05$);在云杉林下,过熟林凋落物碳储量显著高于幼龄林、中龄林、近熟林、成熟林 (表3 $P < 0.05$),幼龄林显著低于近熟林 (表3 $P < 0.05$);在云南松林下,近熟林凋落物碳储量显著高于幼龄林和中龄林 (表3 $P < 0.05$);在高山松林下,成熟林凋落物碳储量显著高于中龄林 (表3, $P < 0.05$);在柏木林下,成熟林和过熟林凋落物碳储量显著高于幼龄林、中龄林、近熟林 (表3 $P < 0.05$);在高山栎林下,幼龄林显著低于中龄林、近熟林、成熟林,成熟林显著高于中龄林 (表3 $P < 0.05$)。

根据不同龄级森林类型凋落物单位碳储量和森林类型分布面积,得到了西藏主要森林类型下凋落物的碳库。西藏主要森林类型下凋落物碳库介于 0.004~1.648 Tg C (表4)。总体上,冷杉、云杉、云南松、柏木、高山栎随着龄级的增加,凋落物碳库增加。

表4 西藏主要森林类型不同龄级下凋落物碳库 (Tg C)

Table 4 Carbon pool of the litter of main forest types with different age classes in Tibet

森林类型	幼龄林	中龄林	近熟林	成熟林	过熟林
冷杉	0.004	0.028	0.119	0.849	1.058
云杉	0.027	0.088	0.333	0.792	0.694
云南松	0.006	0.011	0.099	0.152	-
高山松	-	0.077	0.347	1.648	0.406
柏木	0.040	0.044	0.059	0.251	0.217
高山栎	0.027	0.414	0.734	1.059	-

参考第八次全国森林资源清查西藏自治区森林资源清查结果 (2011) 的面积计算出凋落物碳库。

2.1.2 不同森林类型凋落物碳储量 本研究中,暗针叶林包括冷杉、云杉、铁杉;亮针叶林包括云南松、高山松、落叶松、乔松柏木;硬阔叶林包括高山栎;软阔叶林包括桦木、杨树、樟木。对于幼龄林,亮针叶林凋落物碳储量显著高于暗针叶林和硬阔叶林 (图2, $P < 0.05$);对于中龄林凋落物碳储量,硬阔叶林 > 软阔叶林 > 亮针叶林 > 暗针叶林,硬阔叶林与暗针叶林和亮针叶林差异显著 (图2 $P < 0.05$);近熟林和成熟林凋落物碳储量中,硬阔叶林显著高于暗针叶林和亮针叶林 (图2 $P < 0.05$);过熟林中凋落物碳储量,暗针叶林、亮针叶林、硬阔叶林、软阔叶林无显著差异。

2.2 凋落物碳储量空间分布格局

2.2.1 凋落物碳储量海拔分布特征 凋落物碳储量大小与海拔梯度达到显著相关 (图3)。整体上,凋落物碳储量以 3200~3400 和 3400~3600 m 最高,与其他海拔存在显著差异性。研究显示凋落物碳储量随着海拔梯度变化趋势为:0~3600 m 凋落物碳储量随着海拔梯度升高而增大,3600 m 以上凋落物碳储量随着海拔梯度升高而降低。3200~3400 和 3400~3600 m 凋落物碳储量显著高于 3000~3200 m,

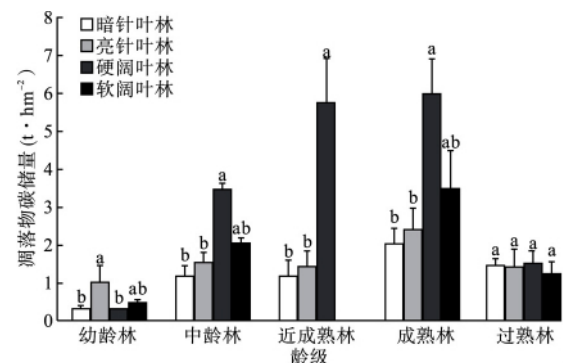


图2 不同森林类型凋落物碳储量

Fig.2 Carbon storage in litter of different forest types

误差线为标准差,柱子上的不同小写字母表示同一龄级下不同森林类型之间的差异显著 ($P < 0.05$)。

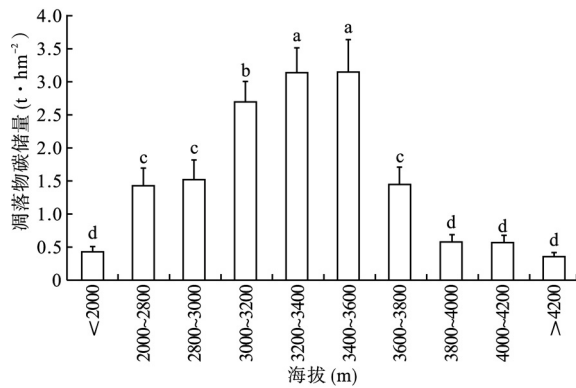


图3 不同海拔梯度凋落物碳储量
Fig.3 Carbon storage of litter in different elevations
碳储量是西藏主要森林类型按海拔梯度的凋落物碳储量。误差线为标准差 柱子上的不同字母表示不同海拔间差异显著($P < 0.05$)。

3000~3200 m 显著高于 3600~3800、2800~3000、2000~2800、3600~3800、2800~3000、2000~2800 m 显著高于 3800~4000、4000~4200、>4200、<2000 m (图3 $P < 0.05$)。

2.2.2 凋落物碳储量坡向分布特征 林下凋落物碳储量坡向分布特征为: 整体表现为阴坡碳储量显著高于阳坡(图4 $P < 0.05$)。阴坡凋落物碳储量是阳坡的1.42倍。本研究中, 不同坡向凋落物生物量从大到小排列为: 半阴坡>阴坡>半阳坡>阳坡, 比较4个坡向上的凋落物碳储量, 半阴坡与阴坡、半阳坡和阳坡差异显著, 阴坡与半阳坡、阳坡差异显著, 但半

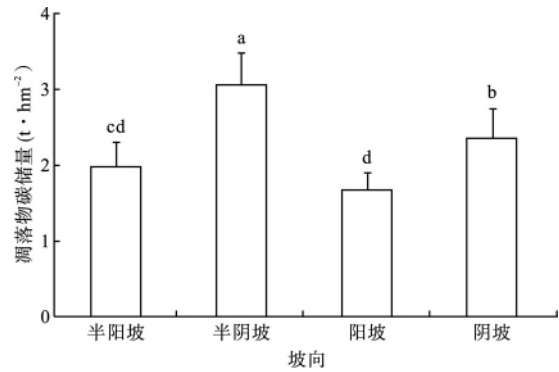


图4 不同坡向凋落物碳储量
Fig.4 Carbon storage of litter in different slopes
误差线为标准差 柱子上的不同字母表示不同坡向间差异显著($P < 0.05$)。

阳坡与阴坡无显著差异(图4 $P < 0.05$)。

2.2.3 凋落物碳储量区域分布特征 凋落物碳储量与纬度存在着相关性, 同样地, 在经度水平上表现出相关性, 这主要通过气候因子表现, 即使同一林分下, 不同地区的凋落物碳储量存在差异: 对于冷杉林凋落物碳储量, 林芝地区最高, 为 $2.68 \pm 0.04 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, 显著高于山南地区和昌都地区, 昌都地区凋落物碳储量最低, 为 $0.23 \pm 0.01 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$; 云杉和柏木林下凋落物碳储量, 林芝地区显著高于山南地区, 山南地区显著高于昌都地区; 高山栎林下凋落物碳储量, 林芝地区显著高于日喀则地区和昌都地区(图5,

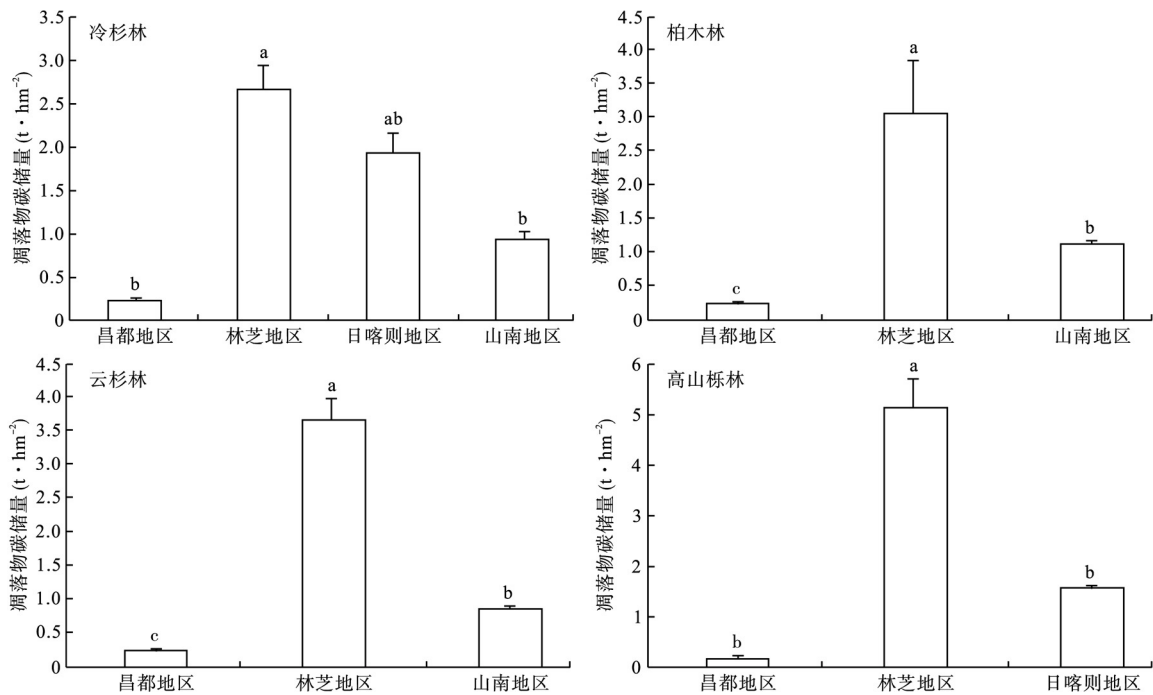


图5 不同地区主要森林类型下凋落物碳储量
Fig.5 Carbon storage of litter of the main forest types in different regions
误差线为标准差 柱子上的不同字母表示相同森林类型在不同地区间差异显著($P < 0.05$)。本研究选择昌都、林芝、山南或日喀则地区都同时分布的森林类型为研究对象。

$P < 0.05$)。整体上,林芝地区凋落物碳储量最大,其次为山南地区和日喀则地区凋落物碳储量,最小的是昌都地区。这主要是因为凋落物碳储量与气温和年降水量有显著相关性($r = 0.226, 0.300, P < 0.01$),从表1可以看出,林芝地区年均气温和年降水量比较高(7~9 °C, 610~740 mm),在这种环境下,森林比较适合生长,新陈代谢快,因此,凋落物碳储量比较高。

3 讨论与结论

3.1 凋落物碳储量

研究发现,凋落物现存量受很多因素的影响,主要由年凋落物量及其分解速率控制,而分解速率受凋落物种类和林地的水热状况限制,不同森林类型其林下凋落物的现存量存在差异(周卫卫等,2009;莫菲等,2009;张增信等,2011)。凋落物在植被原生演替过程中具有改变群落生境的作用,强烈影响种群、群落的结构和动态,物种组成和多样性,其在地表的积累被认为是植被演替的一部分(Kostel-Hughes *et al.*, 1998; Weltzin *et al.*, 2005; Emery *et al.*, 2006; Sayer, 2006)。青藏高原主要森林类型凋落物碳储量为0.23~6.03 t·hm⁻²,低于周玉荣等(2000)估算的我国主要森林生态系统凋落物层平均碳密度8.21 t·hm⁻²,方精云等(2001)和李海奎等(2011)分别估算全国森林凋落物碳密度为6.47和6.17 t·hm⁻²。一般认为,从幼龄到老龄各阶段,森林凋落物的数量会发生明显的改变(马祥庆等,1997)。以往研究结果显示:桧-柏混交林下凋落物碳储量的比重随龄级的增大呈波动性下降(吴鹏飞等,2008);随着龄级的增大,西安落叶松林下枯落物的碳储量呈现逐渐增加的趋势(齐光等,2011);王洪岩等(2012)研究结果表明,落叶松林地凋落物量与林龄表现显著的二次曲线相关;宁晓波等(2009)研究结果显示,杉木凋落物量随林龄而变化,且呈显著的二次曲线相关;马祥庆等(1997)研究发现,杉木随着林龄增加,凋落量也相应增加。同样,本研究中,不同森林类型下凋落物碳储量随龄级增大而产生了不同的波动:冷杉、云南松、高山松、柏木凋落物碳储量随龄级增大呈现先升高后降低趋势;高山栎凋落物碳储量随龄级增大而增加;云杉凋落物碳储量随龄级的增加呈现先升高后降低再升高的趋势。以上研究结果的差异,一方面与林龄和树种有关,另外,自然因素对凋落物干扰也比较大,因为凋落物量

与纬度、海拔、气温、降水量、土壤等密切相关(Bray *et al.*, 1964; Kakuzawa *et al.*, 1984; Reiners *et al.*, 1987; Fyles *et al.*, 1993)。

森林凋落物的现存量随着森林类型(齐泽民等,2004)和林分因子(Ma *et al.*, 2002)的不同存在显著差异,针叶林与阔叶林之间,暗针叶林与亮针叶林之间,落叶林与常绿森林之间,即使它们的纬度、海拔等环境因子一致,其凋落量也有很大差异。廖军等(2000)研究表明,森林凋落量按照大小排序依次为常绿阔叶林(6.955 t·hm⁻²·a⁻¹) > 针阔叶混交林(5.778 t·hm⁻²·a⁻¹) > 常绿落叶阔叶混交林(5.165 t·hm⁻²·a⁻¹) > 落叶阔叶林(4.773 t·hm⁻²·a⁻¹) > 针叶林(3.5 t·hm⁻²·a⁻¹);周玉荣等(2000)研究表明,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;神农架巴山冷杉林的年凋落物量远远低于阔叶林的凋落物量(刘蕾等,2012);亚热带秀山、鼎湖山等地针叶林的凋落物量显著低于常绿落叶林的凋落物量(刘文耀等,1989;翁轰等,1993)。本研究中,硬阔叶过熟林、成熟林、近成熟林和中龄林凋落物显著高于针叶林,这与Facelli等(1991)研究一致,阔叶林凋落量之所以大于混交林和针叶林,主要是因为阔叶林的叶片面积和质量都远大于针叶林。

3.2 凋落物碳储量空间分布格局

凋落物量是森林生态系统生物量的组成部分,能反映森林生态系统的初级生产力水平,是森林生态系统功能的体现。森林年凋落量的变化主要受纬度和海拔两个因子的限制。海拔因子主要是通过对光、温、水等生态因子的再分配来影响森林的凋落量(王凤友,1989)。一般来说,随着纬度的增加和海拔的升高,森林凋落量逐渐减少(Kakuzawa *et al.*, 1984;程伯容等,1987)。Reiners等(1987)对美国新罕什维尔州白山地区Moosilauke山和Jackson山森林凋落量在海拔梯度上变化的过程和机制研究指出,凋落总量开始是随海拔的升高而迅速减少,尔后趋于平缓,总趋势是逐渐下降。西藏海拔梯度上森林凋落物量随海拔升高而不同,是森林的生物学特性、气候因素及环境因素等多种因素共同作用的结果。森林凋落量是由纬度和海拔因子共同决定,同时,森林类型及森林树种本身的遗传特性等对凋落物量具有显著的影响(王凤友,1989)。综上所述,受树种生物学和生态学特性等内部因素及海拔梯度引起的气候变化等外部因素共同作用的影响,西藏

海拔梯度上森林凋落物碳储量随海拔梯度增加呈现先升高后降低趋势,这与神农架海拔梯度上4种典型森林凋落物年产量研究结果一致(刘蕾等,2012)。

森林凋落物碳密度空间分布格局主要取决于植被类型(刘刚等,2010)和年龄,同时也与气候(袁位高等,2009)等因素有关。研究表明,降水量低,水分输入少,抑制了植物光合作用,从而抑制植物生长,减少了叶和花果的生产量(Zhou *et al.*, 2011),进而降低了凋落物量,同样地,昌都、日喀则、山南地区年降水量比林芝地区低,因此这3个地区冷杉、云杉、柏木、高山栎林下凋落物碳储量显著低于林芝地区。我国凋落物量与年均温度呈显著正相关关系(闫俊华等,2001;郑征等,2005),即随年均温度上升,总凋落量呈线性增加。凋落量随年均温的升高而增加,这主要跟植物生理生态学特性相关。林芝地区年均气温比昌都、日喀则、山南地区高,该区凋落物碳储量比较高(表1)。可能是由于气温高有助于植被的生长(Welp *et al.*, 2007; Grant *et al.*, 2009),植被光合作用强,生产力大,物质循环快,造成凋落物量相对高(陈莎莎等,2010)。另一方面,凋落物碳储量取决于其分解过程,分解越慢,其凋落物碳储量越大,反之,凋落物碳储量小。即可通过温度、水分等环境因子的作用直接影响凋落物的分解速率;同时也可对植物群落结构和植物表型的长期作用影响凋落物数量和质量,从而间接地改变凋落物分解速率(Aerts, 1997)。研究表明,在气温高的样地水分条件可能较差(蒸腾蒸发较大导致土壤水分亏缺),限制了凋落物的分解(Liu *et al.*, 2009),因此,林芝地区凋落物碳储量大。

综上所述,青藏高原主要森林类型下凋落物碳储量随龄级变化产生了不同波动,冷杉、云南松、高山松、柏木凋落物碳储量随龄级的波动相同,与高山栎、云杉凋落物碳储量随龄级的波动趋势相反。本研究结果显示,针叶林凋落物碳储量低于阔叶林。一般来说,阔叶树生长比针叶树快,针叶林叶片也细小,有层油质,使水分的蒸腾消耗减弱,冠层的光合固定能力低,生长发育缓慢,生产力低,形成凋落物量少,因此,针叶林碳储量低于阔叶林。对于海拔因子,西藏海拔梯度上森林凋落物碳储量随海拔的升高而增加,海拔范围在3200~3600 m,碳储量最大,随之碳储量开始降低。相比昌都、日喀则、山南地区,林芝地区的降水量与气温比较适合植被生长,新

陈代谢快,生产力大,因此凋落物碳储量相对高于其他3个地方。因此,凋落物碳储量不仅与龄级有关系,还与树种、经纬度、气温、降水、土壤等都有密切关系。

参考文献

- 陈莎莎,刘鸿雁,郭大立. 2010. 内蒙古东部天然白桦林的凋落物性质和储量及其随温度和降水梯度的变化格局. 植物生态学报, 34(9): 1007-1015.
- 程伯容,丁桂芳,许广山,等. 1987. 长白山红松阔叶林的生物养分循环. 土壤学报, 24(2): 160-169.
- 杜军,杨志刚,等. 2011. 西藏自治区县级气候区划. 北京: 气象出版社.
- 方精云,陈安平. 2001. 中国森林植被碳库的动态变化及其意义. 植物学报, 43(9): 967-973.
- 葛晓改,周本智,肖文发. 2014. 马尾松人工林凋落物产量、养分含量及养分归还量特性. 长江流域资源与环境, 23(7): 996-1003.
- 何红艳. 2008. 青藏高原森林生产力格局对气候变化的响应模拟研究(硕士学位论文). 北京: 中国林业科学研究院.
- 李海奎,雷渊才,曾伟生. 2011. 基于森林清查资料的中国森林植被碳储量. 林业科学, 47(7): 7-12.
- 李忠文,闫文德,郑威,等. 2013. 亚热带樟树-马尾松混交林凋落物量及养分动态特征. 生态学报, 33(24): 7707-7714.
- 廖军,王新根. 2000. 森林凋落量研究概述. 江西林业科技, (1): 31-34.
- 刘刚,朱剑云,叶永昌,等. 2010. 东莞主要森林群落凋落物碳储量及其空间分布. 山地学报, 28(1): 69-75.
- 刘蕾,申国珍,陈芳清,等. 2012. 神农架海拔梯度上4种典型森林凋落物现存量及其养分循环动态. 生态学报, 32(7): 2142-2149.
- 刘文耀,荆贵芬,郑征. 1989. 滇中常绿阔叶林及云南松林枯落物的初步研究. 广西植物, 9(4): 347-355.
- 宁晓波,项文化,王光军,等. 2009. 湖南会同连作杉木林凋落物量20年动态特征. 生态学报, 29(9): 5122-5129.
- 马文济,赵延涛,张晴晴,等. 2014. 浙江天童常绿阔叶林不同演替阶段地表凋落物的C:N:P化学计量特征. 植物生态学报, 38(8): 833-842.
- 马祥庆,刘爱琴,何智英. 1997. 杉木幼林生态系统凋落物及八分解作用研究. 植物生态学报, 21(6): 564-570.
- 莫菲,于澎涛,王彦辉,等. 2009. 六盘山华北落叶松林和红桦林枯落物持水特征及其截持降雨过程. 生态学报, 29(6): 2868-2876.
- 潘紫重,杨文化,曲银鹏. 2002. 不同林分类型凋落物的蓄水功能. 东北林业大学学报, 30(5): 19-21.
- 齐光,王庆礼,王新闯,等. 2011. 大兴安岭林区兴安落叶松人工林植被碳储量. 应用生态学报, 22(2): 273-279.
- 齐泽民,王开运,宋光煜,等. 2004. 川西亚高山箭竹群落枯枝落叶层生物化学特性. 生态学报, 24(6): 1230-1236.
- 王凤友. 1989. 森林凋落量研究综述. 生态学进展, 6(2): 82-89.
- 王洪岩,王文杰,邱岭,等. 2012. 兴安落叶松林生物量、地表枯落物量及土壤有机碳储量随林分生长的变化差

- 异. 生态学报, **32**(3): 833-843.
- 翁 轰,李志安,屠梦照,等. 1993. 鼎湖山森林凋落物量及营养元素含量研究. 植物生态学与地植物学报, **17**(4): 299-304.
- 吴鹏飞,朱 波,刘世荣,等. 2008. 不同林龄桧-柏混交林生态系统的碳储量及其分配. 应用生态学报, **19**(7): 1419-1424.
- 徐旺明,闫文德,李洁冰,等. 2013. 亚热带4种森林凋落物量及其动态特征. 生态学报, **33**(23): 7570-7575.
- 闫俊华,周国逸,唐旭利,等. 2001. 鼎湖山3种演替群落凋落物及其水分特征对比研究. 应用生态学报, **12**(4): 509-512.
- 袁位高,沈爱华,江 波,等. 2009. 浙江省常绿阔叶林凋落物特征研究. 浙江林业科技, **29**(3): 1-4.
- 原作强,李步杭,白雪娇,等. 2010. 长白山阔叶红松林凋落物组成及其季节动态. 应用生态学报, **21**(9): 2171-2178.
- 张增信,闵俊杰,闫少锋,等. 2011. 苏南丘陵森林枯落物含水量及其影响因素分析. 水土保持通报, **31**(1): 6-10.
- 郑 征,李佑荣,刘宏茂,等. 2005. 西双版纳不同海拔热带雨林凋落量变化研究. 植物生态学报, **29**(6): 884-893.
- 周卫卫,余雪标,王 旭,等. 2009. 海南琼中3种森林枯落物的现存量及持水特性研究. 安徽农业科学, **37**(13): 6236-6239.
- 周玉荣,于振良,赵士洞. 2000. 我国主要森林生态系统碳贮量和碳平衡. 植物生态学报, **24**(5): 518-522.
- Aerts R. 1997. Climate, leaf litter chemistry and leaf litter decomposition in terrestrial ecosystems: A triangular relationship. *Oikos*, **79**: 439-449.
- Blagoveshchenskii YN, Bogatyrev LG, Solomatova EA, et al. 2006. Spatial variation of the litter thickness in the forests of Karelia. *Eurasian Soil Science*, **39**: 925-930.
- Bray JR, Gorham E. 1964. Litter production in forests of the world. *Advance in Ecological Research*, **2**: 101-157.
- Brown S, Pearson T. 2005. Methods Manual for Measuring Terrestrial Carbon. Winrock International.
- Emery SM, Gross KL. 2006. Dominant species identity regulates invisibility of old-field plant communities. *Oikos*, **115**: 549-558.
- Facelli JM, Pickett STA. 1991. Plant litter: Its dynamics and effects on plant community structure. *The Botanical Review*, **57**: 1-32.
- Fife DN, Nambiar EKS, Saur E. 2008. Retranslocation of foliar nutrients in evergreen tree species planted in a Mediterranean environment. *Tree Physiology*, **28**: 187-196.
- Freschet GT, Cornwell WK, Wardle DA, et al. 2013. Linking litter decomposition of above- and below-ground organs to plant-soil feedbacks worldwide. *Journal of Ecology*, **101**: 943-952.
- Fyles JW, Fyles IH. 1993. Interaction of douglas-fir with red alder and salal foliage litter during decomposition. *Canadian Journal of Forest Research*, **23**: 358-361.
- Grant RF, Margolis HA, Barr AG, et al. 2009. Changes in net ecosystem productivity of boreal black spruce stands in response to changes in temperature at diurnal and seasonal time scales. *Tree Physiology*, **29**: 1-17.
- Hoorens B, Aerts R, Stroetenga M. 2003. Does initial litter chemistry explain litter mixture effects on decomposition. *Oecologia*, **137**: 578-586.
- Kakuzawa K, Asai T, Fukuchi M. 1984. Leaf-litter production in a plantation of *Alnus inokumae*. *Journal of Ecology*, **72**: 993-999.
- Kostel-Hughes F, Young TP, Carreiro MM. 1998. Forest leaf litter quantity and seedling occurrence along an urban-rural gradient. *Urban Ecosystems*, **2**: 263-278.
- Liu WX, Zhang Z, Wan SQ. 2009. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. *Global Change Biology*, **15**: 184-195.
- Ma XQ, Liu CJ, Hannu I, et al. 2002. Biomass, litterfall and the nutrient fluxes in Chinese fir stands of different age in subtropical China. *Journal of Forestry Research*, **13**: 165-170.
- Moore TR, Trofymow JA, Prescott CE, et al. 2011. Nature and nurture in the dynamics of C, N and P during litter decomposition in Canadian forests. *Plant and Soil*, **339**: 163-175.
- Natha AJ, Dasb G, Dasa AK. 2009. Above ground standing biomass and carbon storage in village bamboos in North East India. *Biomass and Bioenergy*, **33**: 1188-1196.
- Poll C, Marhan S, Ingwersen J, et al. 2008. Dynamics of litter carbon turnover and microbial abundance in a rye detritusphere. *Soil Biology & Biochemistry*, **40**: 1306-1321.
- Prescott CE. 2005. Do rates of litter decomposition tell us anything we really need to know? *Forest Ecology and Management*, **220**: 66-74.
- Raich JW, Schiesinger WH. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, **44B**: 81-99.
- Reiners WA, Lang GE. 1987. Changes in litterfall along a gradient in altitude. *Journal of Ecology*, **75**: 629-638.
- Sayer EJ. 2006. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems. *Biological Reviews*, **81**: 1-31.
- Tuomi M, Thum T, Järvinen H, et al. 2009. Leaf litter decomposition: Estimates of global variability based on Yasso07 model. *Ecological Modelling*, **220**: 3362-3371.
- Vivanco L, Austin AT. 2011. Nitrogen addition stimulates forest litter decomposition and disrupts species interactions in Patagonia, Argentina. *Global Change Biology*, **7**: 1963-1974.
- Waring RH, Schlesinger WH. 1985. Forest Ecosystems: Concepts and Management. New York: Academic Press.
- Welp LR, Randerson JT, Liu HP. 2007. The sensitivity of carbon fluxes to spring warming and summer drought depends on plant functional type in boreal forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, **147**: 172-185.
- Weltzin JF, Keller JK, Bridgman SD, et al. 2005. Litter controls plant community composition in a northern fen. *Oikos*, **110**: 537-546.
- Zhou X, Ge ZM, Kellomaki S, et al. 2011. Effects of elevated CO₂ and temperature on leaf characteristics, photosynthesis and carbon storage in aboveground biomass of a boreal bioenergy crop (*Phalaris arundinacea* L.) under varying water regimes. *GCB Bioenergy*, **3**: 223-234.

作者简介 杨 阳,1988年生,硕士,主要从事高山生态与全球变化的研究。E-mail: yangyang@imde.ac.cn
责任编辑 张 敏