

中国森林粗木质残体储量及其影响因素

吕琨珑¹, 饶良懿¹, 李菲菲¹, 李会杰¹, 朱梦洵¹, 朱振亚¹, 周建²

(1. 北京林业大学 水土保持学院 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083; 2. 北京林业大学 自然保护区学院, 北京 100083)

摘要: 粗木质残体(CWD)是森林生态系统的重要组成部分, 在森林生态系统结构组成和功能发挥中扮演重要角色。在收集整理文献资料数据的基础上对长白山、小兴安岭、秦岭、武夷山、鼎湖山、哀牢山等地不同森林生态系统粗木质残体储量的研究结果进行了初步统计和分析。初步结果认为: 中国南、北方森林生态系统的粗木质残体储量存在差异, 北方的粗木质残体储量是针叶林>针阔混交林; 南方的粗木质残体储量是阔叶林>针阔混交林>针叶林。海拔、林分结构、年平均降水量、自然灾害、人为干扰均是影响粗木质残体储量的因子, 枯立木和倒木是中国原始林粗木质残体储量的主要贡献者。研究结果可为中国森林生态系统粗木质残体的进一步深入研究及相应的合理保护和利用提供依据。图2表2参47

关键词: 森林生态学; 粗木质残体; 储量; 森林生态系统; 影响因素

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)01-0114-09

Storage and determinants of coarse woody debris in China's forests

LÜ Kunlong¹, RAO Liangyi¹, LI Feifei¹, LI Huijie¹, ZHU Mengxun¹, ZHU Zhenya¹, ZHOU Jian²

(1. Key Laboratory for Soil and Water Conservation and Desertification Combating of Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. College of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: As an essential structural component of forest ecosystems, coarse woody debris (CWD) plays an important role in a number of aspects of ecosystem functioning. Based on the data from the literature about China forest ecological system's coarse woody debris storage, a preliminary statistical analysis of several sites including Changbai Mountain, Xiaoxing'anling Mountain, Qinling, Wuyi Mountain, Dinghu Mountain and Ailao Mountain was conducted. The results indicated a difference between the storages of CWD in Southern and Northern China. In Northern China, CWD storages were ranked as follows: coniferous forest > mixed coniferous and broad-leaved forest. In Southern China, CWD storages were ranked as follows: broad-leaved forest > mixed coniferous and broad-leaved forest > coniferous forest. The determinants of CWD storages included altitude, stand structure, the average annual rainfall, natural disasters, and human disturbance. Snags and fallen trees were the major contributors to the storage of CWD in the primitive forests in China. The findings can provide reference for the further research on forest ecological system's CWD, and better forest protection and utilization. [Ch, 2 fig. 2 tab. 47 ref.]

Key words: forest ecology; coarse woody debris; storage; forest ecological system; determinants

粗木质残体(coarse woody debris, CWD)是森林生态系统中以枯立木、倒木、枯落大枝和根系等形式存在的死木质物质, 是森林生态系统重要的结构性和功能性组成要素, 在保持森林生态系统的完整性

收稿日期: 2012-02-05; 修回日期: 2012-05-06

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(TD2011-03); 国家自然科学基金资助项目(30500389)

作者简介: 吕琨珑, 从事森林生态系统粗木质残体和生态水文等研究。E-mail: beihai1988@sina.com。通信作者: 饶良懿, 副教授, 博士, 从事森林生态水文、水土保持等研究。E-mail: raoliangyi@bjfu.edu.cn

方面扮演着重要的角色^[1-2]。据统计，粗木质残体储量占到全球森林生物量的 10%以上^[3]，是森林生态系统中不可忽视的碳库^[4]。它也是维系森林生态系统水分循环、养分循环、群落更新的重要纽带，是森林生态系统中其他有机体生境的载体^[5-7]。中国对粗木质残体的研究始于 20 世纪 80 年代^[8]，主要是对粗木质残体的储量及其在水文、碳汇、养分供给、生物多样性维持等方面的功能进行了研究^[9-33]。研究地点主要集中在长白山、小兴安岭、秦岭、武夷山、鼎湖山、哀牢山等地^[9,33]。本研究在搜集整理文献资料的基础上，研究了中国不同类型森林生态系统粗木质残体的储量及其分布特征，并初步分析了不同因素对粗木质残体储量的影响。研究结果可为中国粗木质残体生态水文特性的进一步深入研究及其合理保护、利用提供科学依据。

1 中国不同类型森林生态系统粗木质残体(CWD)储量

目前，中国学者主要针对长白山、小兴安岭、秦岭、武夷山、鼎湖山、哀牢山等地区的森林生态系统粗木质残体储量开展了研究，研究结果如表 1 所示。

表 1 不同类型森林生态系统粗木质残体(CWD)储量
Table 1 Storage of coarse woody debris in different kinds of forest ecological system

研究区域	森林类型	CWD 储量/(t·hm ⁻²)	降水量/mm	经纬度	海拔/m	参考文献
小兴安岭	阔叶红松林	27.40	610.0	47°10'50"N 128°53'20"E	600	[15]
长白山	红松阔叶林	9.61	632.8~782.4	41°42'N	740	[16]
	阔叶红松林	23.57		127°38'E	700	
长白山	苔藓红松暗针叶林	26.21	782.4~967.3	41°42'N	1 260	[17]
	苔藓岳桦暗针叶林	53.33		127°38'E	1 620	[17]
长白山	阔叶红松林	16.25	632.8~782.4	41°42'N 127°38'E	—	[18]
新疆西天山自然保护区	云杉针叶林	79.8	600.0~800.0	43°03'N 82°51'E	1 680	[19]
青藏高原贡嘎山	冷杉过熟林	91.75	1 900.0	29°20'N	3 020	
	冷杉成熟林	71.72		101°30'E	3 080	[20]
	冷杉中龄林	50.45			3 050	
	冬瓜杨与冷杉混交林	29.03			3 010	
陕西秦岭	冷杉阔叶混交林	15.85	950.0~1 200.0	33°32'N 107°40'E	2 410	[12]
福建武夷山	常绿阔叶林	7.35	2 096.6	27°33'N 117°27'E	1 270	[21]
广东鼎湖山	针叶林	0.09	1 927.0	23°09'21"N	—	[22]
	针阔混交林	7.89		112°30'39"E		
	季风常绿阔叶林	11.97				
广东车八岭国家级自然保护区	迎风坡常绿阔叶林	14.81	1 500.0	24°40'29"N	—	[23]
	背风坡常绿阔叶林	5.66		114°09'04"E		
广州	针叶林	0.59	1 612.0~1 909.0	22°26'N	—	[24]
	针阔混交林	6.49		112°57'E		
	季风常绿阔叶林	10.90				

表 1(续)

研究区域	森林类型	CWD 储量/(t·hm ⁻²)	降水量/mm	经纬度	海拔/m	参考文献
广西大明山	常绿阔叶林	33.142	2 630.0	23°24'N 108°20'E	1 100	[25]
福建万木林自然保护区	亚热带常绿阔叶林	23.18	1 663.8	27°02'28"N 118°08'22"E	234~556	[26]
云南哀牢山	中山湿性绿阔叶林	98.46	1 841.0	24°32'N 101°01'E	2 400~2 600	[27]
西双版纳热带季雨林	热带季节雨林	16.27	1 539.0	21°57'N 101°12'E	640	[28]
福建天宝岩国家级自然保护区	猴头杜鹃阔叶林	45.27	2 039.0	25°50'51"N 117°28'03"E	1 518	[29]
福建灵石山森林公园	常绿次生林	57.10	1 780.0	25°40'N	187	[30]
		76.32		119°13'E	281	
		78.85			332	
		104.10			362	
		37.83			442	
		30.15			542	
		21.35			632	
		16.99			762	
		7.41			842	
福建天宝岩国家级自然保护区	猴头杜鹃阔叶林	25.24	2 039.0	25°50'51"N	1 518	[31]
		11.44		117°28'03"E	1 324	
		8.59			1 218	
	长苞铁杉林	12.53			1 511	
		11.44			1 329	
		8.59			1 121	
	柳杉林	20.22			1 547	
		1.61			1 106	
		6.61			992	

世界上的天然针叶林的粗木质残体(CWD)储量为 30~200 t·hm⁻²，针阔混交林和阔叶林为 8~50 t·hm⁻²。从表 1 中可以看出：中国的针叶林的 CWD 储量为 0.09~91.75 t·hm⁻²，针阔混交林的 CWD 储量为 6.59~29.03 t·hm⁻²，阔叶林的 CWD 储量为 5.66~104.1 t·hm⁻²。可以看出：中国的天然针叶林和针阔混交林的 CWD 储量水平较世界的平均水平低，而阔叶林的 CWD 储量水平相对较高。目前，中国的 CWD 研究还处于初级阶段，研究地集中在中国的偏南和偏北的地方，主要是在天然林生态系统中开展研究，只有掌握更多的 CWD 动态数据，才能更好的保护和利用中国的森林资源。

2 粗木质残体储量影响因素分析

2.1 粗木质残体储量与地域分布

从表 1 中小兴安岭、长白山、西天山、贡嘎山、秦岭等几个北方和高寒区域的研究结果之间的对比可看出：青藏高原贡嘎山的冷杉 *Abies fargesii* 过熟针叶林的粗木质残体储量最大，达到 91.75 t·hm⁻²，

长白山红松 *Pinus koraiensis* 阔叶林储量最小，为 $9.61 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。从表 1 中南方几个区域如鼎湖山、广州、万木林自然保护区、哀牢山等地的研究结果可以看出：云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林的粗木质残体 (CWD) 储量为 $98.46 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，CWD 储量相对于其他南方区域较多，也是目前中国 CWD 储量最多的森林生态系统类型；而广东鼎湖山针叶林的 CWD 储量最少，为 $0.09 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。由此可见：中国南、北方森林生态系统粗木质残体储量存在明显差异，且表 1 中数据显示北方 CWD 储量针叶林 > 针阔混交林；南方 CWD 储量：阔叶林 > 针阔混交林 > 针叶林。同为针叶林生态系统的不同地区，新疆西天山自然保护区云杉 *Picea asperata* 针叶林的 CWD 储量为 $79.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ，相对于杨丽韞等^[17]在长白山针叶林研究得出的 CWD 储量高出了许多，这说明中国森林生态系统 CWD 储量因纬度不同存在差异性。

中国南、北方影响粗木质残体储量的不同环境条件是形成这种纬度差异性的重要条件。北方地区，年平均降水量比较少，积雪、大风和病虫害是导致粗木质残体形成的重要因素，同时寒冷的气候条件使粗木质残体分解缓慢，导致存留了大量粗木质残体^[34]。中国南方，平均温度较高，年平均降水量比较多，林分比较湿润，适宜植物生长，但生长竞争及台风泥石流等自然灾害使大量的粗木质残体产生^[22,26]。

2.2 粗木质残体储量与海拔

通常情况下，由于随着海拔的增高，温度逐渐降低，不利于分解粗木质残体的微生物的存活，所以粗木质残体的分解速率变小，CWD 储量比低海拔立地的高。如何小娟等^[31]在福建天宝岩自然保护区的研究成果显示该地猴头杜鹃 *Rhododendron simiarum* 阔叶林和长苞铁杉 *Tsuga longibracteata* 林的 CWD 储量随着海拔的增大而增大。CWD 储量还受到许多其他因素的制约，这使得 CWD 储量不会随海拔而有规律变化。

图 1 是根据表 1 中的统计数据，得到中国北方针阔混交林、高海拔地区针叶林和南方阔叶林与海拔之间的关系图。

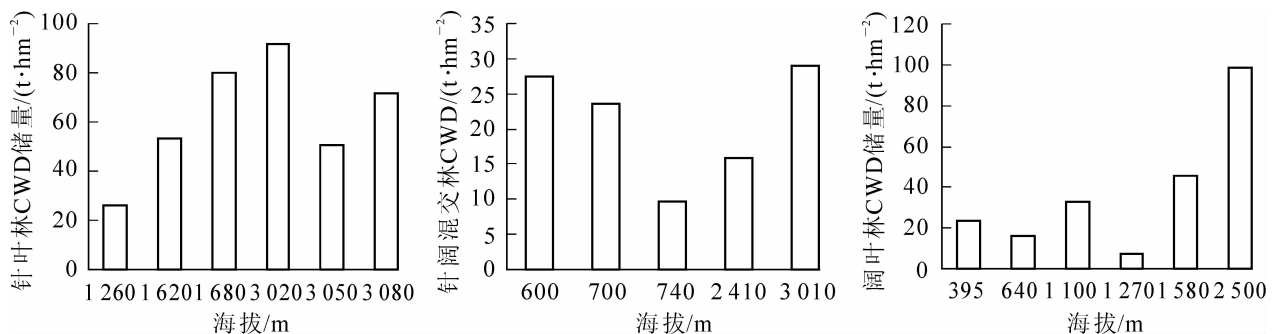


图 1 海拔与 3 种林地类型粗木质残体储量的关系

Figure 1 Relation between altitude and three woodland types' CWD storage

从图 1 中可以看出：中国的针阔混交林、针叶林、阔叶林的 CWD 储量随着海拔的升高，均有增大的趋势，但是因为地区不同、气候差异、树种不同、生态系统稳定性差异、土壤的理化性质^[20]、微生物群落等各种因素的制约，导致 CWD 储量没有随海拔的升高而有规律变化。

海拔对粗木质残体的类型、腐解等级、径级等均有影响，导致不同海拔的 CWD 储量差异。游惠明等^[35]、郑关关等^[30]和何小娟等^[31]通过试验研究均得出，不同的海拔，枯立木、倒木和大枝的分布不同，腐解等级也有很大差异，粗木质残体主要分布在 0~20 cm 的小径级范围内，致使 CWD 储量有很大不同。

2.3 粗木质残体储量与林分结构

CWD 储量与树种、林龄和死木的径级等有着密切的关系^[36-38]。其一，树种不同，其形成木材的生物、物理、化学的性质不同，使得形成和分解粗木质残体的过程不同，进而使得森林生态系统的 CWD 储量存在差异。如表 1 中杨丽韞等的研究成果，同为暗针叶林的 2 块林地，主要树种分别为云杉和冷杉，根据云山冷杉倒木分解的单项指数衰减模型得出云杉倒木的分解比冷杉较慢，造成同一地区 2 块林地的 CWD 储量不同。其二，林龄不同，森林生态系统的 CWD 储量存在明显差异。如表 1 中高甲荣等在西藏贡嘎山的研究，选择了冷杉过熟林、冷杉成熟林、冷杉中龄林作为研究对象，结果显示 CWD 储量是过熟林 > 成熟林 ≥ 中龄林。这与唐旭利等的研究结果一致，Keller 等^[39]研究的巴西亚马逊东部的湿

润常绿浓密森林、Grove 等^[40]研究的澳大利亚低山热带雨林、Harmon 等^[41]研究的北美落叶林和 Spies 等^[42]研究的北美(西海岸)针叶林的粗木质残体(CWD)储量均得出这样的研究规律, 这些研究结果显示 CWD 储量随着森林动态过程有增加的趋势。其三, 死木的径级也能影响 CWD 储量。径级的大小影响粗木质残体的材积和分解率, 同种树木径级越大, 粗木质残体的材积越大, 分解速率越慢, 存在森林生态系统中的时间越长, CWD 储量越大。

2.4 粗木质残体储量与降水分布

降水量的大小在一定程度上影响 CWD 储量。雨水充沛, 空气湿度相对较大, 在很大程度上影响植物的生长, 也使得腐殖质基质适合微生物的生长, 促进粗木质残体的分解, 进而影响 CWD 储量。从表 1 中可以看出: 中国北方地区, 降水量相对较少, 而且降水时伴有大风, 使得 CWD 储量相对较大; 中国南方地区, 降水量较充沛, 使得部分地区的 CWD 储量相对较小, 如张海东等^[24]的研究成果显示 CWD 储量为 0.59~10.9 t·hm⁻²。但是南方的许多林地因为林地的演替进程、台风等因素使得 CWD 储量相对较大, 如受印度洋西南季风影响的哀牢山, 降水丰沛, 年平均降水量达到 1 841 mm, 但由于海拔较高和年平均温度较低导致 CWD 储量高达 98.46 t·hm⁻²。

影响 CWD 储量的因素还有自然灾害和人类干扰等。风灾、雪灾、泥石流、滑坡、火灾、病虫害等环境干扰因子均可引起大量林木死亡而形成粗木质残体^[43]。例如, 唐旭利等^[22]研究的鼎湖山自然保护区最常见的影响 CWD 储量的灾害性环境干扰因子是台风和山体滑坡, 温琳华等^[25]研究的广西大明山和柳泽鑫等^[23]研究的广东省车八岭国家级自然保护区影响 CWD 储量的环境干扰因子均是 2008 年初的特大冰雪灾害, 而万木林自然保护区的环境干扰因子则是病虫害^[26]。采伐、乱砍滥伐及林地清理均会产生大量大枝、树梢、倒木及根等。不适当的人为活动干扰会影响粗木质残体的结构和组成, 抑制粗木质残体功能的充分发挥^[44]。因此, 有效的森林经营管理措施, 对保护和合理利用中国森林生态系统的 CWD 是非常必要的。

通过以上研究分析表明: 森林生态系统粗木质残体储量是多因素共同作用的结果。中国幅员辽阔, 横跨寒带、温带、亚热带和热带, 具有各种各样的森林类型, 但是对于处于不同气候带和不同森林生态系统等条件下的粗木质残体保留多少才能充分发挥其生态及水文等功能^[45], 是我们需要进一步研究的一个重要课题。

3 粗木质残体各组分比例分析

组成 CWD 的各组分包括枯立木、倒木、大枝和根^[21-22]。表 2 是中国部分地区的 CWD 各个组份的量, 由于 CWD 的根一般很难测定, 因此, 许多研究中都没有测定根的量, 只有高甲荣等^[20]在贡嘎山冷杉林 CWD 的研究中测定了根的量。因为大多数的研究没有 CWD 根的测定, 所以 CWD 根的储量的数据

表 2 中国部分地区森林生态系统粗木质残体各组分储量统计

Table 2 Various components statistical storage of CWD in forest ecological system of some areas in China

研究区域及森林生态系统类型	枯立木/(t·hm ⁻²)	倒木/(t·hm ⁻²)	大枝/(t·hm ⁻²)	根/(t·hm ⁻²)	CWD 总储量/(t·hm ⁻²)
福建武夷山常绿阔叶林	4.245	0.308	2.796	—	7.349
云南哀牢山中山湿性常绿阔叶林	8.830	84.450	5.180	—	98.460
小兴安岭阔叶红松林	23.910	1.710	1.790	—	27.400
秦岭巴山冷杉针阔混交林	12.548	2.199	1.101	—	15.848
福建万木林中亚热带常绿阔叶林	5.040	17.910	0.230	—	23.180
贡嘎山冷杉过熟林	15.660	56.860	3.250	15.980	91.250
贡嘎山冷杉成熟林	38.240	22.120	5.100	6.260	71.720
贡嘎山冷杉中龄林	27.480	13.870	4.240	4.860	50.450
贡嘎山冬瓜杨冷杉林	21.440	3.680	2.830	1.080	29.030
西双版纳热带季节雨林	5.300	7.450	3.520	—	16.270

缺失会导致粗木质残体(CWD)储量的测定值偏小。

从表 2 中可以看出：枯立木和倒木在 CWD 中占的比例较大，大枝和根除少数地区稍多一点外，占的比例较小，为 10%~20%。图 2 是不同森林生态系统 CWD 各组份比例图，可以看出：福建武夷山常绿阔叶林大枝较多，约占该地区 CWD 总量的 38%，其余地区大枝均相对较小。倒木和枯立木在 CWD 中也因不同地区不同森林生态系统类型而不同，如在云南哀牢山、福建万木林、西藏贡嘎山中倒木占 CWD 总储量的比例均很大，而其他地区所占的比例较少，特别是在福建武夷山常绿阔叶林中，倒木所占 CWD 总储量的比例还不足 5%。

根据中国学者对 CWD 的研究，目前中国森林生态系统 CWD 储量的主要贡献者是倒木和枯立木，这与国外的一些研究相一致。如 Delaney 等^[46]调查发现委内瑞拉热带森林倒木占整个森林生态系统粗木质残体总储量的 66.5%，Carmona 等^[47]在智利常绿阔叶林森林生态系统的研究发现枯立木约占总粗木质残体储量的 72.8%。

4 结论

粗木质残体(CWD)储量是多因素共同作用的结果。从地域上来看，中国南北方地区森林生态系统 CWD 储量存在较大差异，表现为北方地区 CWD 储量为针叶林>针阔混交林，而南方地区 CWD 储量为阔叶林>针阔混交林>针叶林；海拔、林分结构、年平均降水量、自然灾害、人为干扰均是影响 CWD 储量的因子。就目前的研究而言，枯立木和倒木是中国天然林粗木质残体储量的主要贡献者。

由于 CWD 具有水文、碳汇、养分供给、生物多样性维持等多种生态服务功能，因此，CWD 的合理利用和保护应成为中国森林生态系统可持续经营和管理的一项重要内容。目前，中国已经在部分森林生态系统开展了 CWD 储量、CWD 水文功能等方面的研究，但在 CWD 固碳效应、生物多样性维持、对森林流域河溪生态系统的作用等方面的研究还相对薄弱，应该加强。另外，还应在 CWD 的研究方法、CWD 生态服务功能、CWD 影响因素、CWD 可持续利用等方面加强研究。

参考文献：

- [1] WHILES M R, GRUBAUGH J W. Importance of coarse woody debris to southern forest herpetofauna [G] //McMINN J W, CROSSLEY D A, Jr. *Biodiversity of Coarse Woody Debris in Southern Forests: Effects on Biodiversity Proc Work Coarse Woody Debris in Southern Forests US For Serv Gen Tech Rep SE-94*, 1996: 94 – 100.
- [2] 郝占庆, 吕航. 木质物残体在森林生态系统中的功能评述[J]. 生态学进展, 1989, 6 (8): 79 – 83.
HAO Zhanqing, LÜ Hang. The function review of coarse wood debris (CWD) in forest ecosystem [J]. *Adv Ecol*, 1989, 6 (8): 79 – 83.
- [3] 马伟, 孙玉军. 我国的森林生物量研究[J]. 世界林业研究, 2009, 22 (5): 71 – 76.
MA Wei, SUN Yujun. Forest biomass in China [J]. *World For Res*, 2009, 22 (5): 71 – 76.
- [4] LIU W H, BRYANT D M, HUTYRA L R, et al. Woody debris contribution to the carbon budget of selectively logged and maturing mid-latitude forests [J]. *Oecologia*, 2006, 148: 108 – 117.
- [5] STURTEVANT B R, BISSONETTE J A, LONG J N, et al. Coarse woody debris as a function of age, stand struc-

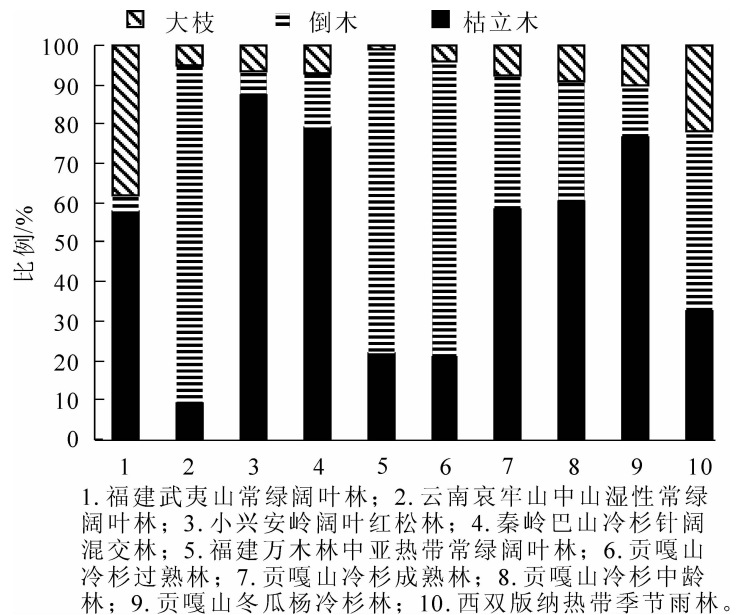


图 2 不同森林生态系统大枝、倒木和枯立木占粗木质残体总储量的比例

Figure 2 Proportion of limbs, logs and snags in total CWD of different forest ecological system

- ture, and disturbance in boreal Newfoundland [J]. *Ecol Appl*, 1997, **7** (2): 702 – 712.
- [6] HOU Ping, PAN Cunde. Coarse woody debris and its function in forest ecosystem [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2001, **12** (2): 309 – 314.
- [7] CURRIE W S, JADELHOFFER K N. The imprint of land use history: patterns of carbon and nitrogen in downed woody debris at the Harvard forest [J]. *Ecosystems*, 2002, **5**: 446 – 460.
- [8] HEAL O W, 程伯容. 长白山落叶松和红松树桩分解过程[J]. 森林生态系统研究, 1983 (3): 225 – 234.
HEAL O W, CHENG Borong. The decomposition of stumps of Lolgensis and Korean pine in Changbai Mountain [J]. *For Ecos Res*, 1983 (3): 225 – 234.
- [9] 陈华, 徐振邦. 粗木质物残体生态研究历史、现状和趋势[J]. 生态学杂志, 1991, **10** (1): 45 – 50.
CHEN Hua, XU Zhenbang. History, current situation and tendency of CWD ecological research [J]. *Chin J Ecol*, 1991, **10** (1): 45 – 50.
- [10] 王应军, 鲜骏仁, 杨理艳. 四川王朗自然保护区原始冷杉林粗木质残体的储水潜力评估[J]. 水土保持学报, 2010, **24** (5): 126 – 129.
WANG Yingjun, XIAN Junren, YANG Liyan. Assessment of coarse woody debris water storage potential in primitive fir forestry in Wanglang National Nature Reserve [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, **24** (5): 126 – 129.
- [11] 赵玉涛, 余新晓, 程根伟, 等. 粗木质残体(CWD)的水文生态功能——当前森林水文研究中忽视的重要环节[J]. 山地学报, 2002, **20** (1): 12 – 18.
ZHAO Yutao, YU Xinxiao, CHENG Genwei, *et al.* A slighting tache in field of forestry hydrology research: hydrological effects of coarse woody debris [J]. *J Mount Sci*, 2002, **20** (1): 12 – 18.
- [12] 李凌浩, 党高弟, 汪铁军, 等. 秦岭巴山冷杉林粗死木质残体研究[J]. 植物生态学报, 1998, **22** (5): 434 – 440.
LI Linghao, DANG Gaodi, WANG Tiejun, *et al.* Coarse woody debris in an *Abies fargesii* forest in the Qinling Mountains [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1998, **22** (5): 434 – 440.
- [13] 唐旭利, 周国逸, 周霞, 等. 鼎湖山季风常绿阔叶林粗死木质残体的研究[J]. 植物生态学报, 2003, **27** (4): 484 – 489.
TANG Xuli, ZHOU Guoyi, ZHOU Xia, *et al.* Coarse woody debris in monsoon evergreen broad-leaved forests of Dinghushan Nature Reserve [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2003, **27** (4): 484 – 489.
- [14] 吴家兵, 关德新, 韩士杰, 等. 长白山地区红松和紫椴倒木呼吸研究[J]. 北京林业大学学报, 2008, **30** (2): 14 – 19.
WU Jiabing, GUAN Dexin, HAN Shijie, *et al.* Respiration of fallen trees of *Pinus koraiensis* and *Tilia amurensis* in Changbaishan Mountains, northeastern China [J]. *J Beijing For Univ*, 2008, **30** (2): 14 – 19.
- [15] 刘妍妍, 金光泽, 黎如. 小兴安岭阔叶红松林粗木质残体的储量特征[C]. //中国科学技术协会. 2010 中国科协年会第五分会场全球气候变化与碳汇林业学术研讨会优秀论文集. 北京: 清华同方光盘电子出版社, 2010: 24 – 30.
- [16] 陈华, 徐振邦. 长白山红松针阔混交林倒木站杆树种组成和储量的调查[J]. 生态学杂志, 1992, **11** (1): 17 – 22.
CHEN Hua, XU Zhenbang. Composition and storage of fallen trees and snags in Korean pine deciduous mixed forest at Changbai Mountain [J]. *Chin J Ecol*, 1992, **11** (1): 17 – 22.
- [17] 杨丽韞, 代力民, 张扬建. 蓄所长白山北坡暗针叶林倒木储量和分解的研究[J]. 应用生态学报, 2002, **13** (9): 1069 – 1071.
YANG Liyun, DAI Limin, ZHANG Yangjian. Storage and decomposition of fallen wood in dark coniferous forest on the North Slope of Changbai Mountain [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2002, **13** (9): 1069 – 1071.
- [18] 代力民, 徐振邦, 陈华. 阔叶红松林倒木储量的变化规律[J]. 生态学报, 2000, **20** (3): 412 – 416.
DAI Limin, XU Zhenbang, CHEN Hua. Storage dynamics of fallen trees in the broad leaved and Korean pine mixed forest [J]. *Acta Ecol Sin*, 2000, **20** (3): 412 – 416.
- [19] 刘翠玲, 潘存德, 梁瀛. 鳞毛蕨天山云杉林粗死木质残体储量及其分解动态[J]. 干旱区地理, 2009, **32** (2): 175 – 182.
LIU Cuiling, PAN Cunde, LIANG Ying. Storage and decomposition dynamics of coarse woody debris in *Picea schrenkiana*-*Dryopteris filix-mass* stand [J]. *Arid Land Geogr*, 2009, **32** (2): 175 – 182.

- [20] 高甲荣, 王敏, 毕利东, 等. 贡嘎山不同年龄结构峨眉冷杉林粗木质残体的储存量及其特征[J]. 中国水土保持科学, 2003, **1** (2): 47 – 51.
- GAO Jiarong, WANG Min, BI Lidong, *et al.* Storage amount and characteristics of coarse woody debris in *Abies fabric forests* in different age stages at the Gongga Mountains [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2003, **1** (2): 47–51.
- [21] 李凌浩, 邢雪荣, 黄大明, 等. 武夷山甜槠林粗死木质残体的储量、动态及其功能评述[J]. 植物生态学报, 1996, **20** (2): 132 – 143.
- LI Linghao, XING Xuerong, HUANG Daming, *et al.* Storage and dynamics of coarse woody debris in *Castanopsis eyrei* forest of Wuyi Mountain, with some considerations for its ecological effects [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 1996, **20** (2): 132 – 143.
- [22] 唐旭利, 周国逸. 南亚热带典型森林演替类型粗死木质残体储量及其对碳循环的潜在影响[J]. 植物生态学报, 2005, **29** (4): 559 – 568.
- TANG Xuli, ZHOU Guoyi. Coarse woody debris biomass and its potential contribution to the carbon cycle in successional subtropical forests of Southern China [J]. *Acta Phytoecol Sin*, 2005, **29** (4): 559 – 568.
- [23] 柳泽鑫, 张璐, 区余端, 等. 冰灾后粤北常绿阔叶林粗死木质残体的组成与结构[J]. 西南林业大学学报, 2011, **31** (4): 18 – 23.
- LIU Zexin, ZHANG Lu, OU Yudian, *et al.* The composition and structure of the coarse woody debris in the evergreen broad leaved forest after ice storm in northern Guangdong Province [J]. *J Southwest For Univ*, 2011, **31** (4): 18 – 23.
- [24] 张海东. 广州3种典型森林粗死木质残体(CWD)储量研究[D]. 广州: 中山大学, 2008.
- ZHANG Haidong. *The Storage Research of Three Typical Forest Coarse Woody Debris (CWD) in Guangzhou* [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2008.
- [25] 温琳华, 梁宏温, 温远光, 等. 大明山常绿阔叶林粗死木质残体储量的初步研究[J]. 广西林业科学, 2010, **39** (4): 197 – 200.
- WEN Linhua, LIANG Hongwen, WEN Yuanguang, *et al.* Preliminary study on storage of coarse woody debris in evergreen broad-leaved forests of Damingshan Mountain Nature Reserve [J]. *Guangxi For Sci*, 2010, **39** (4): 197 – 200.
- [26] 贺旭东, 杨智杰, 郭剑芬, 等. 万木林自然保护区常绿阔叶林木质残体储量及其组成[J]. 亚热带资源与环境学报, 2010, **5** (2): 46 – 55.
- HE Xudong, YANG Zhijie, GUO Jianfen, *et al.* Composition and storage of woody debris in mid-subtropical evergreen broad-leaved forest in Wanmulin Nature Reserve [J]. *J Subtrop Resour Environ*, 2010, **5** (2): 46 – 55.
- [27] 刘文耀, 谢寿昌, 谢克金, 等. 哀牢山中山湿性常绿阔叶林凋落物和粗死木质物的初步研究[J]. 植物学报, 1995, **37** (10): 807 – 814.
- LIU Wenyao, XIE Shouchang, XIE Kejin, *et al.* Preliminary studies of the litter fall and coarse woody debris in mid-mountain humid evergreen broad-leaved forest in Ailao Mountains [J]. *Acta Bot Sin*, 1995, **37** (10): 807 – 814.
- [28] 宋泽伟, 唐建维. 西双版纳热带季节雨林的粗死木质残体及其养分元素[J]. 生态学杂志, 2008, **27** (12): 2033 – 2041.
- SONG Zewei, TANG Jianwei. Coarse woody debris marls and its nutrients stock in tropical seasonal rain forest in Xishuangbanna [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27** (12): 2033 – 2041.
- [29] 何东进, 何小娟, 洪伟, 等. 天宝岩猴头杜鹃林粗死木质残体数量特征[J]. 福建林学院学报, 2008, **28** (4): 293 – 298.
- HE Dongjin, HE Xiaojuan, HONG WEI, *et al.* Quantitative characteristics of coarse woody debris in natural *Rhododendron simiarum* forests in Tianbaoyan National Nature Reserve [J]. *J Fujian Coll For*, 2008, **28** (4): 293 – 298.
- [30] 郑关关. 灵石山常绿次生林木质残体的组成、碳储量及其分解[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- ZHENG Guanguan. *Compositon, Carbon Storage and Decomposition of CWD in Evergreen and Secondary Forest of Lingshi Mts* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.
- [31] 何小娟. 天宝岩3种典型森林类型粗死木质残体生态学特征研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2009.
- HE Xiaojuan. *Study on Ecological Characteristics of Coarse Woody Debris in Three Typical Forest Types in Tianbaoyan National Nature Reserve* [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2009.

- [32] 闫恩荣, 王希华, 黄建军. 森林粗死木质残体的概念及其分类[J]. 生态学报, 2005, **25** (1): 158 – 167.
YAN Enrong, WANG Xibua, HUANG Jianjun. Concept and classification of coarse woody debris in forest ecosystems [J]. *Acta Ecol Sin*, 2005, **25** (1): 158 – 167.
- [33] 何东进, 何小娟, 洪伟, 等. 森林生态系统粗木质残体的研究进展[J]. 林业科学研究, 2009, **22** (5): 715 – 721.
HE Dongjin, HE Xiaojuan, HONG Wei, *et al.* Research progress of coarse woody debris in forest ecosystems [J]. *For Res*, 2009, **22** (5): 715 – 721.
- [34] VEBLEN T T, ALABACK P B. A comparative review of forest dynamics and disturbance in the temperate rainforests of North and South America [G]. //LaWFORD R G, ALABACK P B, FUENTES E. *High Latitude Rainforest and Associated Ecosystems of the West Coast of the Americas*. New York: Springer Verlag, 1996: 173 – 213.
- [35] 游惠明, 何东进, 洪伟, 等. 海拔对天宝岩长苞铁杉林粗死木质残体分布的影响[J]. 福建农林大学学报: 自然科学版, 2011, **40** (4): 365 – 369.
YOU Huiming, HE Dongjin, HONG Wei, *et al.* Influence of elevation on coarse woody debris in *Tsuga longibracteata* forest in Tianbaoyan National Nature Reserve [J]. *J Fujian Agric For Univ Nat Sci Ed*, 2011, **40** (4): 365 – 369.
- [36] CLARK J W. Comparative decay resistance of some common pines, hemlock, spruce and true fir [J]. *For Sci*, 1957, **3**: 314 – 320.
- [37] SCHEFFER T C, COWLING E B. Natural resistance of wood to deterioration [J]. *Annual Phytopath*, 1966, **4**: 147 – 170.
- [38] ABBOTT D T, CROSSLEY D A. Woody litter decomposition following clear-cutting [J]. *Ecology*, 1982, **63** (1): 35 – 42.
- [39] KELLER M, PALACE M, ASNER G P, *et al.* Coarse woody debris in undisturbed and logged forests in the eastern Brazilian Amazon [J]. *Glob Change Biol*, 2004, **10**: 784 – 795.
- [40] GROVE S J. Extent and decomposition of dead wood in Australian lowland tropical rainforest with different management histories [J]. *For Ecol Manage*, 2001, **154**: 35 – 53.
- [41] HARMON M E, FRANKLIN J F, SWANSON F J, *et al.* Ecology of coarse woody debris in temperate ecosystems [G]. //MACFADYEN A, FORD E D. *Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems*. London: Academic Press, 1986: 133 – 302.
- [42] SPIES T A, FRANKLIN J P, THOMAS T B. Coarse woody debris in Douglas-fir forests of western Oregon and Washington [J]. *Ecology*, 1988, **69** (6): 1689 – 1702.
- [43] 高甲荣, 张东升, 牛健植, 等. 长江上游峨眉冷杉结构特征研究[J]. 应用生态学报, 2003, **24** (1): 20 – 24.
GAO Jiarong, ZHANG Dongsheng, NIU Jianzhi, *et al.* Structural characteristics of *Abies fabri* forests at the upper reach of Yangtze River [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, **24** (1): 20 – 24.
- [44] 谷会岩, 代力民, 王顺忠, 等. 人为干扰对长白山红松阔叶混交林粗木质残体的影响[J]. 林业科学, 2006, **42** (10): 1 – 5.
GU Huiyan, DAI Limin, WANG Shunzhong, *et al.* Effect of human disturbance on coarse woody debris in Korean pine and broad-leaved mixed forest on Changbai Mountain [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, **42** (10): 1 – 5.
- [45] 袁杰, 侯琳, 张硕新. 森林粗木质残体研究进展[J]. 西北林学院学报, 2011, **26** (4): 90 – 98.
YUAN Jie, HOU Lin, ZHANG Shuoxin. Research progress in coarse woody debris [J]. *J Northwest For Univ*, 2011, **26** (4): 90 – 98.
- [46] DELANEY M, BROWN S, LUGO A E, *et al.* The quantity and turnover of dead wood in permanent forest in six life zones of Venezuela [J]. *Biotropica*, 1998, **30**: 2 – 11.
- [47] CARMONA M R, ARMESTO J J, ARAVENA J C, *et al.* Coarse woody debris biomass in successional and primary temperate forests in Chiloé Island, Chile [J]. *For Ecol Manage*, 2002, **164**: 265 – 275.