



# 天宝岩自然保护区长苞铁杉混交林粗木质残体蓄水能力研究

李苏闽<sup>1</sup>,何东进<sup>1\*</sup>,朱乃新<sup>1</sup>,肖石红<sup>1</sup>,游巍斌<sup>1</sup>,刘进山<sup>2</sup>,蔡昌棠<sup>2</sup>

(1 福建农林大学 林学院,福州 350002;2 永安天宝岩国家级自然保护区,福建永安 366032)

**摘要:**选择天宝岩国家级自然保护区内4种不同长苞铁杉混交林(A~D)粗木质残体(CWD)为研究对象,采用自然风干法与室内浸泡法对不同类型(倒木、枯立木、树桩)和不同腐烂程度(I~V级,腐烂由轻到重)CWD的蓄水能力进行测定分析和对比研究。结果显示:(1)CWD有效拦截量在不同长苞铁杉混交林下表现为:长苞铁杉+石栎+马尾松混交林(B,14.21 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉+甜槠+青冈混交林(C,7.78 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉+青冈+深山含笑混交林(D,6.99 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉+猴头杜鹃混交林(A,4.74 t/hm<sup>2</sup>),而在各CWD类型下表现为:倒木(19.579 t/hm<sup>2</sup>)>枯立木(8.494 t/hm<sup>2</sup>)>树桩(5.661 t/hm<sup>2</sup>)。(2)各长苞铁杉混交林CWD的蓄水量和蓄水速率在蓄水过程中都表现为B>D>C>A,而在脱水过程中都表现为B>C>A>D。(3)不同腐烂等级的CWD按其蓄水量、蓄水速率和脱水速率大小排列皆为:Ⅱ级>Ⅵ级>Ⅲ级>Ⅴ级>Ⅰ级。研究表明:CWD蓄水量的大小差异与群落类型、腐烂等级、CWD本身持水性等因素有关,其蓄水和脱水的速率与其持水量、蓄积量以及腐烂等级之间也存在密切的联系;CWD的自然持水率随腐烂等级增加呈增加趋势,而且腐烂等级越高CWD蓄水速率变化也越明显,CWD腐烂等级对其蓄水能力影响较大;倒木具有较好的持水能力,并在蓄积量上远大于树桩和枯立木,对降雨有较强的实际拦截能力。

**关键词:**天宝岩国家级自然保护区;长苞铁杉;混交林;粗木质残体(CWD);蓄水能力

中图分类号:Q948.1

文献标志码:A

## Water Storage Capacity of Coarse Woody Debris in Different *Tsuga longibracteata* Mixed Forests in Tianbaoyan Nature Reserve

LI Sumin<sup>1</sup>, HE Dongjin<sup>1\*</sup>, ZHU Naixin<sup>1</sup>, XIAO Shihong<sup>1</sup>,  
YOU Weibin<sup>1</sup>, LIU Jinshan<sup>2</sup>, CAI Changtang<sup>2</sup>

(1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2 Tianbaoyan National Nature Reserve, Yongan, Fujian 366032, China)

**Abstract:** In the Tianbaoyan National Nature Reserve, with coarse woody debris(CWD) in the four kinds of different *Tsuga longibracteata* mixed forests(A-D) as the research object, by the method of natural wind dry and indoor soak, we carried out CWD quantitative analysis and comparative study for water storage capacity in the process of water and dehydration according to types (fallen woods, snags, stumps) and decay classes(I-V, from slight to severe degrees). The results showed that:(1)different *T. longibracteata* mixed forests arranged order by modified interception amount of CWD: *T. longibracteata*+*Lithocarpus glabra*+*Pinus massoniana* mixed forests(B,14.21 t/hm<sup>2</sup>)>*T. longibracteata*+*Castanopsis eyrei*+*Cyclobalanop-*

收稿日期:2014-05-28;修改稿收到日期:2014-09-11

基金项目:国家自然科学基金项目(31370624);教育部博士学科点基金项目(20103515110005);福建省自然科学基金项目(2011J01071)

作者简介:李苏闽(1990—),男,硕士研究生,主要从事自然地理学研究。E-mail:352016567@qq.com

\*通信作者:何东进,教授,博士生导师,主要从事森林生态学与景观生态学研究。E-mail:fjhdj1009@126.com

*sis glauca* mixed forests(C, 7.78 t/hm<sup>2</sup>)>*T. longibracteata*+*C. glauca*+*Michelia maudiae* mixed forests(D, 6.99 t/hm<sup>2</sup>)>*T. longibracteata*+*Rhododendron simiarum* mixed forests(A, 4.74 t/hm<sup>2</sup>)；The various types of CWD arranged order by modified interception: Fallen woods(19.579 t/hm<sup>2</sup>)>Snags(8.494 t/hm<sup>2</sup>)>Stumps(5.661 t/hm<sup>2</sup>)；(2) In the water-absorption process, arrange the water storage capacity and water-absorption rate of the CWD with different *Tsuga longibracteata* mixed forests according to size: B>D>C>A, while in the water-losing process, arrange the water storage capacity and water-losing rate of the CWD with different *T. longibracteata* mixed forests according to size: B>C>A>D；(3) The CWD of different decay classes according to water storage capacity, water-absorption rate and water-losing rate for size: II>VI>III>V>I. The studies showed that: the size difference of CWD storage of water is connected with the community types, decay classes, water holding capacity of CWD and other factors. The rate of water and dehydration is also closely related to its water-holding capacity, water storage capacity and decay classes. The natural water holdup of CWD is compounded by the increasing decay class. And the decay class of CWD is higher, the change of water storage rate of CWD is more obvious. The differences of decay class of CWD is great influence on its water storage capacity. Fallen woods have the good water-holding capacity, and the total storage of them is much larger than that of snags and stumps, so they have a strong practical ability to intercept rainfall.

**Key words:** Tianbaoyan National Nature Reserve; *Tsuga longibracteata*; mixed forests; coarse woody debris (CWD)

粗木质残体(coarse woody debris, CWD)是指森林生态系统中以枯立木、树桩、倒木、地下粗根残体和大凋落枝等形式存在的死木质物质<sup>[1]</sup>。CWD作为组成森林生态系统的重要单元,是构成森林生态系统中功能性和结构性的重要因素<sup>[2-3]</sup>,亦是维系森林生态系统水分循环、养分循环、能量流动、群落更新等的重要纽带<sup>[4-5]</sup>,不仅为许多微生物和动植物提供了栖息地和生存基质,而且在保护生物多样性、提供有机体生境和减少水土流失等方面发挥着重要的生态功能<sup>[6-7]</sup>。近几年来,随着人们对森林生态系统功能与结构性的深入研究,CWD在森林生态系统中所发挥的重要生态功能已愈来愈引起了广泛关注。

福建省天宝岩国家级自然保护区中的长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*)为冰川期的遗留物种,属于中国古老珍稀植物,其作为中国亚热带地区典型的扁平叶型常绿针叶林之一,是中国特有的濒危物种<sup>[8]</sup>,在维持生态系统平衡稳定、促进森林演替和涵养水源方面发挥着极其重要的作用<sup>[9]</sup>。CWD作为长苞铁杉林的重要组成部分,对长苞铁杉林的维持和生态功能的发挥具有极其重要的作用。本试验拟在课题组前期相关研究的基础上<sup>[10-14]</sup>,选取天宝岩自然保护区4种长苞铁杉典型混交林,通过对它们CWD的蓄水量、蓄水速率和脱水速率等进行测定分析,进而对其CWD的蓄水能力进行比较研究,从而有效揭示CWD在森林生态系统中涵养水源的生态功能。

## 1 研究区概况

天宝岩国家级自然保护区位于福建省永安市境内,地处N25°50'51"~26°01'20",E117°28'03"~117°35'28"的戴云山余脉;保护区总面积达11 015.38 hm<sup>2</sup>,其中核心区为3 402 hm<sup>2</sup>,缓冲区为2 680 hm<sup>2</sup>,实验区为4 936 hm<sup>2</sup>,森林覆盖率高达96.8%。保护区属于中亚热带海洋性季风气候区,全年平均温度15℃左右,气温最高月的平均气温是23℃(7月),气温最低月的平均温度是5℃(1月),年降雨量为2 039 mm,多集中在5~9月,空气相对湿度约达80%。保护区内的土壤多呈酸性,其垂直分布大致为:1 350 m以上的为黄壤,800~1 350 m为黄红壤,800 m以下的为红壤。保护区气候适宜、物种丰富,包含了中国中亚热带地区许多植被类型,其中保留有大面积的猴头杜鹃林、天然柳杉林和长苞铁杉林,极具研究和保护价值<sup>[15-16]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地设置与调查

在全面调查的基础上,于天宝岩国家级自然保护区内选取4种长苞铁杉典型混交林——长苞铁杉+猴头杜鹃混交林(A)、长苞铁杉+石栎+马尾松混交林(B)、长苞铁杉+甜槠+青冈混交林(C)、长苞铁杉+青冈+深山含笑混交林(D),并在每个林分中各设置2块20 m×30 m样地,采用线截抽样法<sup>[17]</sup>对CWD进行调查,记录每个样地的海拔、坡

表 1 样地基本状况  
Table 1 The status of plots

林分类型 Stand type	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/°	坡向 Aspect	郁闭度 Canopy density/%	面积 Area/m <sup>2</sup>
A	1 223	26	NE33°	94	1 200
B	1 274	19	NW70°	90	1 200
C	1 420	23	NE10°	87	1 200
D	1 451	28	NE40°	92	1 200

注:A. 长苞铁杉+猴头杜鹃混交林;B. 长苞铁杉+石栎+马尾松混交林;C. 长苞铁杉+甜槠+青冈混交林;D. 长苞铁杉+青冈+深山含笑混交林;下同。

Note: A. *T. longibracteata*+*Rhododendron simiarum*; B. *T. longibracteata*+*Lithocarpus glabra*+*Pinus massoniana*; C. *T. longibracteata*+*Castanopsis eyrei*+*Cyclobalanopsis glauca*; D. *T. longibracteata*+*C. glauca*+*Michelia maudiae*; The same as below.

度、坡向、郁闭度、群落类型等环境因子。对样地内调查区域的林木进行调查实测,测量冠幅、树高等,并对直径≥2.5 cm,长≥1.0 m 的 CWD 进行树种鉴定,确定其形态组成和腐烂程度,其中 CWD 的腐烂程度采用闫恩荣等<sup>[18]</sup>的方法分为 5 个腐烂等级,腐烂由轻到重分别用 I、II、III、IV、V 表示。从样地内调查区域中选取一些标准木,从其树干的下、中、上三部进行分段采样,并在现场测取其湿重,将数据记录下来,然后带回实验室。样地基本情况见表 1。

## 2.2 CWD 蓄积量测定方法

将 CWD 标准木样品置于 80 °C 的高温条件下,等其烘干至恒重后,得出其干重。为了得到 CWD 密度值,还需测算体积,而一般采用排水法来测定体积。根据所得的结果,计算出 CWD 标准木以及 4 种长苞铁杉混交林单位面积中的 CWD 蓄积量,公式如下<sup>[19]</sup>:

$$\text{CWD 密度}(\text{t}/\text{m}^3): \rho = \frac{m}{v}$$

$$\text{CWD 蓄积量}(\text{t}/\text{hm}^2): M = \frac{\rho \pi^2}{8L} \sum_{i=1}^n d_i^2 l_i$$

式中,v 为 CWD 标准木的体积( $\text{m}^3$ );m 为 CWD 标准木的干重( $\text{t}$ );L 为边长( $\text{m}$ ); $l_i$  为与线条相截的 CWD 长度( $\text{m}$ ); $d_i$  为与三角形边相截处的 CWD 直径( $\text{m}$ )。

## 2.3 CWD 蓄水速率、脱水速率测定方法

通过测定不同长苞铁杉混交林 CWD 的蓄水过程和脱湿过程,得出相应的蓄水速率、脱水速率及拦蓄量,所用方法为自然风干法和室内浸泡法。(1) CWD 蓄水过程的测定:将采集到的所有 CWD 标准木样品自然风干,并对其称重,接着准备一个细尼龙网袋,并把称重后的 CWD 标准木放入其中,一起浸泡在水里,测定时间分别为 10 min、0.5 h、1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h,每次从水中拿出,悬置 3 min 后称重,将每个标准木样品重复以上步骤 5 次,并取平

均值。每次称重所得的数值减去 CWD 标准木的干重即为 CWD 蓄水量,所得的蓄水量除以浸水时间即为吸水速率。饱和持水量即为浸水 24 h 的 CWD 持水量<sup>[20]</sup>。(2)CWD 脱湿过程的测定:将浸水 24 h 的 CWD 标准木样品进行称重,然后将其自然风干,每隔一定时间称其湿重,测定时间分别为 10 min、0.5 h、1 h、2 h、4 h、8 h、12 h、24 h,浸水 24 h 的 CWD 标准木重量减去某一时段的测定值即为这一时段的脱水量,所得脱水量除以脱水时间即为脱水速率。公式如下<sup>[19]</sup>:

$$\text{CWD 蓄水量}: W_c = R_c \times M$$

$$\text{CWD 蓄水率}(\%): R_c = (W_w - W_d)/t$$

$$\text{CWD 吸水速率}(\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}): V_x = (W_w - W_d)/t$$

$$\text{CWD 脱水速率}(\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}): V_T = (W_{\max} - W_w)/t$$

式中, $W_d$  为 CWD 干重( $\text{t}/\text{hm}^2$ ), $W_w$  为 CWD 湿重( $\text{t}/\text{hm}^2$ ), $M$  为 CWD 蓄积量( $\text{t}/\text{hm}^2$ ), $W_{\max}$  为 CWD 浸水 24 h 的重量, $V_x$  为 CWD 吸水速率( $\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ ), $t$  为时间( $\text{h}$ ), $V_T$  为 CWD 脱水速率( $\text{t}/\text{hm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$ )。

## 2.4 数据处理及分析

使用 Microsoft Excel 2013 整理数据,采用 SPSS 21.0 软件进行方差分析等数据处理。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同长苞铁杉混交林 CWD 蓄积量比较

由于所选林分类型的树种组成、海拔高度、年龄结构、水热状况等因素的不同,导致了各长苞铁杉混交林 CWD 蓄积量的不同。不仅如此,CWD 分解速率还对 CWD 的地表积累速度起着一定影响,这也间接影响到 CWD 蓄积量。运用线截抽样法,并进行一系列测算,得到天宝岩自然保护区 4 种长苞

铁杉混交林不同 CWD 类型的蓄积量(表 2)。

从表 2 可看出,天宝岩国家级自然保护区内不同长苞铁杉混交林 CWD 的蓄积量有着较大差别,调查区的 CWD 总蓄积量是 52.139 t/hm<sup>2</sup>。其中,长苞铁杉十石栎十马尾松混交林(B)的 CWD 蓄积量最大(16.836 t/hm<sup>2</sup>),这是因为该处混交林样地海拔位置较低,带有明显的人为干扰,使得该样地内包含大量人为伐木后剩下的树桩和倒木,因此该样地 CWD 蓄积量明显高于其他样地;长苞铁杉十甜槠十青冈混交林(C)的 CWD 蓄积量为 12.926 t/hm<sup>2</sup>,其中倒木便直接占据该样地 CWD 蓄积量的 84.24%,这是因为倒木是森林中林木死亡后最直观的显现,且该样地地处海拔较高,温度较低,而低温不利于 CWD 分解,所以倒木的蓄积量偏大,而与该混交林 CWD 蓄积量接近的长苞铁杉十青冈十深山含笑混交林(D)中,枯立木占 CWD 蓄积量比重较大也是此原因;长苞铁杉十猴头杜鹃混交林(A)的 CWD 蓄积量最小(10.199 t/hm<sup>2</sup>),由于该混交林样地海拔较低,使得该样地的水热状况非常适宜微生物的繁殖,促进了 CWD 的分解,因而该样地的 CWD 蓄积量偏小。

### 3.2 不同长苞铁杉混交林 CWD 蓄水能力比较

从表 3 可以看出,不同长苞铁杉混交林 CWD 的最大拦蓄量表现为:长苞铁杉十石栎十马尾松混交林(34.704 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉十青冈十深山含笑混交林(18.718 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉十甜槠十青冈混交林(18.339 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉十猴头杜鹃混交林(12.321 t/hm<sup>2</sup>)。该顺序与各林分 CWD 的蓄积量大小顺序表现出一致性,从而说明 CWD 的最大拦蓄量与蓄积量之间密切关联。同时,各林分 CWD 有效拦蓄量则表现为:长苞铁杉十石栎十马尾松混交林(14.212 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉十甜槠十青冈混交林(7.785 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉十青冈十深山含笑混交林(6.996 t/hm<sup>2</sup>)>长苞铁杉十猴头杜鹃混交林(4.741 t/hm<sup>2</sup>)。而各林分 CWD 的自然持水量从大到小分别为长苞铁杉十石栎十马尾松混交林(20.492 t/hm<sup>2</sup>)、长苞铁杉十青冈十深山含笑混交林(11.722 t/hm<sup>2</sup>)、长苞铁杉十甜槠十青冈混交林(10.553 t/hm<sup>2</sup>)、长苞铁杉十猴头杜鹃混交林(7.580 t/hm<sup>2</sup>)。由于 CWD 自然持水量的不同导致了不同长苞铁杉混交林 CWD 间最大拦蓄量和有效拦蓄量的差异。进一步经方差分析可知:同一类

表 2 不同林分类型长苞铁杉混交林 CWD 的蓄积量

Table 2 The volume of coarse woody debris in different stand types of *T. longibracteata* mixed forests

林分类型 Stand type	CWD 类型 CWD type	蓄积量 Volume/(t/hm <sup>2</sup> )					合计 Total
		I	II	III	IV	V	
A	倒木 Fallen woods	1.590	0.712	3.923	0.623	0.980	7.828
	枯立木 Snags	0.261	0.367	0.185	0.918	0.095	1.825
	树桩 Stumps	0.085	0.134	0.016	0.102	0.210	0.546
	合计 Total	1.936	1.213	4.124	1.642	1.285	10.199
B	倒木 Fallen woods	2.535	0.340	1.472	2.272	1.563	8.182
	枯立木 Snags	0.315	0.172	0.354	1.722	0.247	2.810
	树桩 Stumps	1.009	4.140	0.000	0.695	0.000	5.844
	合计 Total	3.859	4.652	1.826	4.689	0.247	16.836
C	倒木 Fallen woods	0.514	0.527	1.419	3.566	4.863	10.889
	枯立木 Snags	0.550	0.204	0.891	0.032	0.232	1.908
	树桩 Stumps	0.020	0.009	0.000	0.034	0.065	0.129
	合计 Total	1.084	0.740	2.310	3.632	5.160	12.926
D	倒木 Fallen woods	0.763	2.234	0.228	0.309	0.164	3.697
	枯立木 Snags	0.300	5.046	1.195	0.754	0.740	8.035
	树桩 Stumps	0.034	0.234	0.122	0.008	0.048	0.446
	合计 Total	1.096	7.513	1.545	1.071	0.953	12.178

注: I 、 II 、 III 、 IV 、 V 表示长苞铁杉混交林 CWD 按照腐烂程度由低到高划分的 5 个腐烂等级。

Note: I , II , III , IV and V indicate five decay classes that CWD of *T. longibracteata* mixed forests according to the degree of rotting from low to high.

型 CWD 持水能力在不同林分类型条件下存在显著性差异。

CWD 的最大拦蓄量和最大持水率仅能简单表现出 CWD 持水能力的上限,但是无法客观反映出 CWD 在针对降雨方面的实际拦截能力。而有效拦蓄量则能客观反映出 CWD 对降雨的实际拦截能力,在实际应用中可用它来评价 CWD 在降雨方面的实际拦蓄量。因为不同长苞铁杉混交林的 CWD 自然持水量各有不同,所以 CWD 有效拦蓄量也随之不同。

表 3 还显示,在不同长苞铁杉混交林 CWD 构成中,最大持水率及自然持水率平均值从大到小排列皆为树桩、枯立木、倒木,而有效持水率的排列顺序则相反,表现为倒木(65.70%)>枯立木(60.10%)>树桩(53.10%),这说明倒木对降雨具有较强的实际拦截能力。另外,不同长苞铁杉混交林 CWD 构成中,最大拦蓄量和自然持水量在大小上也表现出一致性,皆为倒木>枯立木>树桩,而其有效拦蓄量的总体大小顺序为倒木( $19.579 \text{ t}/\text{hm}^2$ )>枯立木( $8.494 \text{ t}/\text{hm}^2$ )>树桩( $5.661 \text{ t}/\text{hm}^2$ ),出现上述结果的原因是长苞铁杉林中倒木相较其他两者而言具有更好的持水能力和远大于其他两者的蓄积量。

### 3.3 不同长苞铁杉混交林 CWD 蓄水和脱水特征比较

**3.3.1 CWD 蓄水和脱水量** 4 种不同长苞铁杉混交林 CWD 分别进行浸水和脱水试验的结果表明,在 CWD 的蓄水过程中,降雨前 2 h 内,蓄水速度最快,蓄水量变化较大;随着浸水时间不断推移,各林分类型 CWD 蓄水量的增长速度逐渐趋于平缓,6~8 h 后的 CWD 蓄水量浮动较小。在蓄水过程的各观测时段中,5 种不同腐烂等级的 CWD 按其蓄水量表现为 II 级>VI 级>III 级>V 级>I 级(图 1,a),不同长苞铁杉混交林 CWD 蓄水量则呈现长苞铁杉+石栎+马尾松混交林>长苞铁杉+青冈+深山含笑混交林>长苞铁杉+甜槠+青冈混交林>长苞铁杉+猴头杜鹃混交林的趋势(图 1,b)。

同时,在 CWD 脱水过程中的前 2 h 内,其脱湿速度最快,蓄水量变化较大;随着脱水时间的不断推移,CWD 蓄水量的减少速度逐渐趋于平缓,20 h 后浮动较小。在脱水过程的各观测时段中,5 种不同腐烂等级的 CWD 按其蓄水量大小排列为:II 级>VI 级>III 级>V 级>I 级(图 1,c),而不同长苞铁杉混交林 CWD 蓄水量从大到小为:长苞铁杉+石栎+马尾松混交林>长苞铁杉+甜槠+青冈混交林>长苞铁杉+猴头杜鹃混交林>长苞铁杉+青冈+

表 3 不同林分类型 CWD 的持水能力

Table 3 Water holding ability of coarse woody debris in different stand types

CWD 类型 CWD type	林分类型 Stand type	蓄积量 Volume / $(\text{t}/\text{hm}^2)$	自然持水量 Nature water holding capacity / $(\text{t}/\text{hm}^2)$	有效拦蓄量 The effective retaining content / $(\text{t}/\text{hm}^2)$	最大拦蓄量 The largest retaining content / $(\text{t}/\text{hm}^2)$	自然持水率 Nature water holding rate/%	有效持水率 The effective water holding rate/%	最大持水率 The largest water holding rate/%
倒木 Fallen woods	A	$7.828 \pm 0.069\text{ab}$	$5.765 \pm 0.054\text{ab}$	$3.711 \pm 0.055\text{ab}$	$9.476 \pm 0.070\text{ab}$	$73.65 \pm 0.323\text{b}$	$47.41 \pm 0.05\text{c}$	$121.06 \pm 0.43\text{b}$
	B	$8.182 \pm 0.056\text{ab}$	$7.316 \pm 0.027\text{a}$	$6.551 \pm 0.075\text{a}$	$13.867 \pm 0.127\text{a}$	$89.41 \pm 1.143\text{a}$	$80.06 \pm 0.20\text{a}$	$169.47 \pm 0.16\text{a}$
	C	$10.889 \pm 0.175\text{a}$	$8.672 \pm 0.056\text{a}$	$6.533 \pm 0.072\text{a}$	$15.205 \pm 0.123\text{a}$	$79.64 \pm 0.927\text{b}$	$59.99 \pm 0.17\text{b}$	$139.63 \pm 0.39\text{ab}$
	D	$3.697 \pm 0.032\text{b}$	$3.370 \pm 0.057\text{b}$	$2.784 \pm 0.038\text{ab}$	$6.154 \pm 0.049\text{b}$	$91.17 \pm 0.645\text{a}$	$75.32 \pm 0.10\text{a}$	$166.49 \pm 0.32\text{a}$
枯立木 Snags	A	$1.825 \pm 0.009\text{bc}$	$1.388 \pm 0.016\text{bc}$	$0.656 \pm 0.007\text{b}$	$2.044 \pm 0.013\text{bc}$	$76.06 \pm 0.337\text{b}$	$35.94 \pm 0.46\text{b}$	$112.00 \pm 0.21\text{bc}$
	B	$2.810 \pm 0.017\text{b}$	$3.356 \pm 0.063\text{b}$	$2.526 \pm 0.075\text{ab}$	$5.882 \pm 0.115\text{b}$	$119.45 \pm 0.609\text{a}$	$89.90 \pm 0.59\text{a}$	$209.34 \pm 0.62\text{a}$
	C	$1.908 \pm 0.399\text{bc}$	$1.715 \pm 0.057\text{bc}$	$1.213 \pm 0.075\text{b}$	$2.928 \pm 0.120\text{bc}$	$89.89 \pm 0.639\text{ab}$	$63.56 \pm 0.40\text{ab}$	$153.44 \pm 0.71\text{b}$
	D	$8.035 \pm 0.080\text{a}$	$7.548 \pm 0.060\text{a}$	$4.099 \pm 0.022\text{a}$	$11.647 \pm 0.106\text{a}$	$93.94 \pm 0.293\text{ab}$	$51.01 \pm 0.74\text{ab}$	$144.95 \pm 0.65\text{b}$
树桩 Stumps	A	$0.546 \pm 0.009\text{b}$	$0.427 \pm 0.005\text{b}$	$0.374 \pm 0.009\text{b}$	$0.801 \pm 0.011\text{b}$	$78.14 \pm 0.447\text{bc}$	$68.57 \pm 0.65\text{ab}$	$146.70 \pm 0.46\text{b}$
	B	$5.844 \pm 0.020\text{a}$	$9.820 \pm 0.042\text{a}$	$5.135 \pm 0.039\text{a}$	$14.955 \pm 0.156\text{a}$	$168.03 \pm 1.237\text{ab}$	$87.87 \pm 0.37\text{a}$	$255.90 \pm 0.80\text{a}$
	C	$0.129 \pm 0.003\text{b}$	$0.166 \pm 0.003\text{b}$	$0.039 \pm 0.004\text{b}$	$0.206 \pm 0.005\text{bc}$	$129.42 \pm 1.051\text{b}$	$30.71 \pm 0.56\text{b}$	$160.13 \pm 0.70\text{b}$
	D	$0.446 \pm 0.004\text{b}$	$0.804 \pm 0.035\text{b}$	$0.113 \pm 0.008\text{b}$	$0.917 \pm 0.138\text{b}$	$180.37 \pm 1.388\text{a}$	$25.24 \pm 0.22\text{b}$	$205.61 \pm 1.01\text{ab}$

注:同列不同小写字母表示同一类型 CWD 的持水能力在不同林分类型间存在显著性差异( $P < 0.05$ )。

Note: The different normal letters in the same column indicate the water holding ability of the same type of CWD is significantly different within different stand types( $P < 0.05$ ).

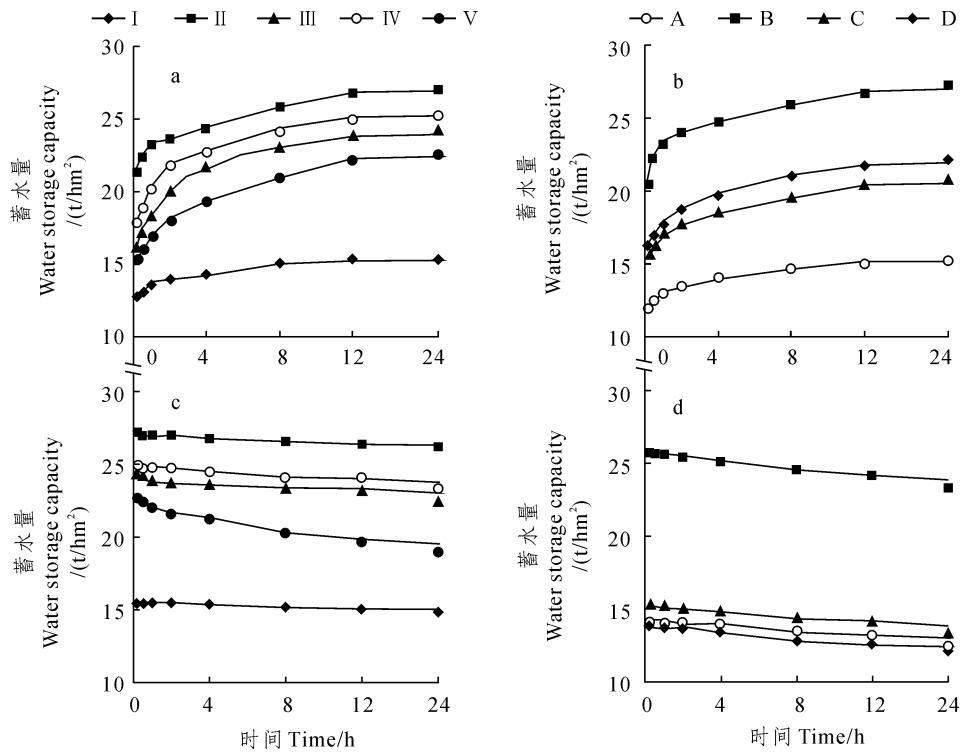


图1 长苞铁杉混交林 CWD 蓄水(a,b)和脱水(c,d)过程中蓄水量与时间的关系

Fig. 1 Relationships between CWD water storage capacity and time in *T. longibracteata* mixed forest during the process of water storage(a,b) and dehydration(c,d)

表4 长苞铁杉混交林 CWD 蓄水和脱水速率的动态变化过程

Table 4 The dynamic process of CWD water-absorption and water-losing rate of *T. longibracteata* mixed forests/(t/hm<sup>2</sup> · h<sup>-1</sup>)

过程 Process	项目 Item	观测时段 Observation session								
		0~10 min	10 min~0.5 h	0.5 h~1 h	1 h~2 h	2 h~4 h	4 h~8 h	8 h~12 h	12 h~24 h	
蓄水过程 Water-absorption process	腐烂等级 Decay classe	I	76.32	25.92	13.51	6.95	3.56	1.86	1.27	0.64
		II	127.38	44.04	23.06	11.75	6.10	3.21	2.22	1.12
		III	94.08	34.31	18.04	9.97	5.37	2.86	1.98	1.01
		IV	107.34	37.50	20.23	10.88	5.69	3.02	2.06	1.04
		V	92.04	31.86	16.86	9.06	4.80	2.62	1.83	0.94
	林分类型 Stand type	A	71.22	24.52	12.92	6.72	3.49	1.83	1.25	0.63
		B	122.16	44.37	23.01	11.97	6.16	3.23	2.23	1.13
		C	91.26	32.05	16.76	8.83	4.61	2.45	1.69	0.86
		D	95.64	33.39	17.64	9.37	4.92	2.62	1.81	0.92
脱水过程 Water-losing process	腐烂等级 Decay classe	I	92.88	30.88	15.40	7.69	3.82	1.88	1.25	0.62
		II	162.72	54.02	27.00	13.44	6.69	3.32	2.20	1.08
		III	144.66	47.91	23.87	11.87	5.90	2.92	1.93	0.94
		IV	149.88	49.55	24.69	12.29	6.10	3.01	1.98	0.97
		V	135.42	44.74	22.01	10.84	5.29	2.53	1.63	0.79
	林分类型 Stand type	A	115.50	38.30	19.08	9.50	4.70	2.30	1.51	0.73
		B	184.26	61.17	30.49	15.14	7.50	3.69	2.42	1.18
		C	121.56	40.21	19.97	9.91	4.89	2.39	1.57	0.76
		D	113.76	37.64	18.69	9.27	4.58	2.24	1.47	0.71

深山含笑混交林(图 1,d)。综上所述,在整个蓄水和脱水过程中,CWD 蓄水量的大小差异与外部环境(降雨)及其腐烂等级、本身持水性等因素有关。

**3.3.2 CWD 蓄水和脱水速率** 从表 4 可知,在浸水前的 0~0.5 h 内,不同长苞铁杉混交林 CWD 蓄水速率达到最大,随着蓄水时间的延长,蓄水速率渐呈下降趋势,24 h 后蓄水趋于饱和,其速率趋于零;各观测时段不同长苞铁杉混交林按 CWD 蓄水速率表现为长苞铁杉+石栎+马尾松混交林>长苞铁杉+青冈+深山含笑混交林>长苞铁杉+甜槠+青冈混交林>长苞铁杉+猴头杜鹃混交林,而不同腐烂等级的 CWD 按其蓄水速率大小排列为:Ⅱ 级>Ⅵ 级>Ⅲ 级>Ⅴ 级>Ⅰ 级。在整个蓄水过程中,I 级腐烂的 CWD 蓄水速率变化也非常小,而腐烂等级越高的 CWD,其在蓄水速率上的变化越明显,该结论与前人研究成果大体一致。

而 CWD 的脱水过程,在脱水前期的 0~0.5 h 内,脱水速率呈明显的下降趋势,而后面的脱水速率则是随脱水时间的延长而逐渐减小,出现该现象的原因是 CWD 刚进行脱水时,其内的含水率最高;其后,随着脱水时间的推移,CWD 的脱水速率逐渐趋向零。其中,各观测时段不同长苞铁杉混交林按 CWD 脱水速率的大小排列为:长苞铁杉+石栎+马尾松混交林>长苞铁杉+甜槠+青冈混交林>长苞铁杉+猴头杜鹃混交林>长苞铁杉+青冈+深山含笑混交林,而不同腐烂等级 CWD 按其脱水速率大小排列为:Ⅱ 级>Ⅵ 级>Ⅲ 级>Ⅴ 级>Ⅰ 级。由此可见,在 CWD 的蓄水和脱水过程中,蓄水和脱水的速率与其持水量、蓄积量以及腐烂等级的高低有密切的关系。

## 4 讨 论

CWD 作为构成森林生态系统中功能性和结构

性的重要因素,在森林生态系统的涵养水源功能上发挥着极其重要的作用<sup>[2-3,9]</sup>。前人的研究表明<sup>[3,12]</sup>,在森林生态系统中,CWD 具有一定的蓄水能力。本研究表明:CWD 的蓄水能力各有不同,各类型 CWD 按其有效拦蓄量大小排列为:倒木>枯立木>树桩,倒木具有较好的持水能力以及远大于树桩和枯立木的蓄积量,对降雨有较强的实际拦截能力;CWD 蓄水量的大小差异不仅与外部环境、群落类型、降雨有关,还与腐烂等级、CWD 本身持水性等因素有关;CWD 的自然持水率随腐烂等级增加呈上升趋势,而且腐烂等级越高的 CWD,其在蓄水速率上的变化也越明显。这与前人研究结果<sup>[10-14]</sup>相符。此外,本试验对 4 种典型长苞铁杉混交林 CWD 的蓄水能力进行定量分析和比较研究,这对保护濒危物种长苞铁杉、提高长苞铁杉 CWD 的持水能力、维持长苞铁杉在森林生态系统中的平衡稳定起到了重要的作用。

由于受实验时间和调查样地的限制,仅选取 4 种不同长苞铁杉混交林,并在研究其内 CWD 蓄水能力的过程中,本文仅采用了自然风干法与室内浸泡法对其蓄水和脱水过程进行定量分析,故该实验结果无法全面反映出 CWD 在截留雨水方面的真实数量。此外,CWD 的实际蓄水能力还应涉及降水、海拔梯度、地形、土壤质地、植被类型等多种因素的理论联系、方法运用和相互作用机制,这还有待进一步系统研究。随着 CWD 在森林生态系统中所体现的作用越来越明显,尤其是常易被人忽略的涵养水源、拦蓄降雨的水文生态功能,故在今后的调查研究中,不仅应注重自身 CWD 水文生态功能的研究,而且还应注重对 CWD,尤其是对倒木的研究保护,加强在真实自然条件下的系统模拟,使得实验结果能更趋近于自然的客观规律。

## 参考文献:

- [1] GUO J F, CHEN G SH, XIE J SH, et al. Patterns of mass, carbon and nitrogen in coarse woody debris in five natural forests in Southern China[J]. *Annals of Forest Science*, 2014, 71(5): 585—594.
- [2] WANG SH ZH(王顺忠), GU H Y(谷会岩), SANG W G(桑卫国). The reserves and the progress of the decomposition of coarse woody debris[J]. *Chinese Journal of Ecology*(生态学杂志), 2014, 33(8): 2 266—2 273(in Chinese).
- [3] WEI SH J(魏书精), SUN L(孙 龙), WEI SH W(魏书威), et al. The research progress of coarse woody debris in forest ecosystem[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*(浙江农林大学学报), 2013, 30(4): 585—598(in Chinese).
- [4] EKATERINA S H, EKATERINA K. Influence of the substrate and ecosystem attributes on the decomposition rates of coarse woody deb-

- ris in European boreal forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2014, **315**(1): 173–184.
- [5] BRIAN W B, HANY H C. Effects of forest type and disturbance on diversity of coarse woody debris in boreal forest[J]. *Ecosystems*, 2008, 11: 1 078–1 090.
- [6] SIITONEN J. Forest management, coarse woody debris and saproxylic organisms: fennoscandian boreal forests as an example[J]. *Ecological Bulletins*, 2001, **49**: 11–42.
- [7] BUDDLE C M. Spiders(Araneae) associated with downed woody material in a deciduous forest in central Alberta, Canada[J]. *Agricultural and Forest Entomology*, 2001, **3**: 241–251.
- [8] LIN J X(林金星), WEI L B(魏令波). The biological characteristics and protection of coarse woody debris of Chinese endemic plants *Tsuga longibracteata*[J]. *Biodiversity Science(生物多样性)*, 1995, **3**(3): 147–152(in Chinese).
- [9] QIU Y J(邱迎君), YI G M(易官美), NING Z L(宁祖林), et al. The geographic distribution and resources present condition and risk factor analysis of endangered plants coarse woody debris[J]. *Journal of Plant Resources and Environment(植物资源与环境学报)*, 2011, **20**(1): 53–59(in Chinese).
- [10] YOU H M, HE D J, YOU W B, et al. Effect of environmental gradients on the quantity and quality of fallen logs in *Tsuga longibracteata* forest in Tianbaoyan National Nature Reserve, Fujian Province, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2013, **10**(6): 1 118–1 124.
- [11] HE D J(何东进), HE X J(何小娟), HONG W(洪伟), et al. The research progress of coarse woody debris in forest ecosystem[J]. *Forest Research(林业科学研究)*, 2009, **22**(5): 715–721(in Chinese).
- [12] YOU H M(游惠明), HE D J(何东进), LIU J SH(刘进山), et al. The water-holding capacity comparison of coarse woody debris that three kinds of typical forest types in Tianbaoyan Nature Reserve[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany(热带亚热带植物学报)*, 2010, **18**(6): 621–626(in Chinese).
- [13] XIAO SH H(肖石红), HE D J(何东进), YOU H M(游惠明), et al. The standing crop research of coarse woody debris of typical forest community in Tianbaoyan Nature Reserve[J]. *Forest Science and Practice(北京林业大学学报)*, 2012, **34**(5): 64–68(in Chinese).
- [14] YOU H M(游惠明), HE D J(何东进), CAI CH T(蔡昌棠), et al. The impact assessment of *Tsuga longibracteata* forests fallen woods for the quality of the soil in Tianbaoyan Nature Reserve[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology(应用与环境生物学报)*, 2013, **19**(1): 168–174(in Chinese).
- [15] HE D J(何东进), HE X J(何小娟), HONG W(洪伟), et al. The quantity characteristic of coarse woody debris of *Rhododendron simiarum* hance forests in Tianbaoyan Nature Reserve[J]. *Journal of Fujian College of Forestry(福建林学院学报)*, 2008, **28**(4): 293–298(in Chinese).
- [16] ZHENG K J(郑开基), HE D J(何东进), HONG W(洪伟), et al. The species diversity of *Cryptomeria fortunei* Hooibrenk ex Otto et Diet that different altitude in Tianbaoyan Nature Reserve[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University(四川农业大学学报)*, 2009, **27**(3): 289–294(in Chinese).
- [17] 国家林业局. 森林生态系统长期定位观测方法(LY/T1952-2011)[S]. 北京:国家林业局, 2011.
- [18] YAN E R(闫恩荣), WANG X H(王希华), HUANG J J(黄建军). The concept and classification of forests, coarse woody debris[J]. *Journal of Resources and Ecology(生态学报)*, 2005, **25**(1): 158–167(in Chinese).
- [19] 朱乃新. 天宝岩自然保护区不同长苞铁杉林的CWD、枯落物及土壤层水文生态功能比较研究[D]. 福州:福建农林大学, 2012.
- [20] THEVENET A, CITTERIO A, PIEGAY H. A new methodology for the assessment of large woody debris accumulations on highly modified rivers(example of two French piedmont rivers)[J]. *Regulated Rivers*, 1998, **14**(6): 467–483.