

不同状态下的胡杨木材水分特性对比研究

沈玉林,王喜明*,宁国艳

(内蒙古农业大学 材料科学与艺术设计学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘 要:木材的水分特性对木材的干燥工艺和木材使用具有重要意义,对于胡杨这种珍贵木材,水分是它 3 000 a 不倒的主要影响因素,对比研究胡杨木 3 个不同状态,即活立木、伐倒木、枯倒木的水分特性,对胡杨木的存放、应用具有很重要的意义。选取内蒙古额济纳旗胡杨林保护区的胡杨木作为对象,分别研究初含水率、尺寸稳定性、吸水性、平衡含水率等水分特性,同时利用核磁共振技术探究气干和室干 2 种状态下的木材水分的弛豫特性(T_2 值)。结果表明,初含水率:活立木>伐倒木>枯倒木,线向干缩率:弦向>径向>纵向,体积干缩率:活立木>伐倒木>枯倒木,枯倒木的尺寸稳定性最强。在 T_2 值反演后观察到气干状态下活立木含有 2 种结合水,而伐倒木和枯倒木只有 1 种结合水,活立木中水分与木材的结合能力较强,而伐倒木和枯倒木相对较弱。活立木、伐倒木、枯倒木水容量分别为:128%、156%、153.9%。平衡含水率:活立木 1.94%,伐倒木 1.80%,枯倒木 1.33%。

关键词:胡杨;水分特性;核磁共振;平衡含水率

中图分类号:S792.11 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2018)01-0241-06

A Comparative Study on the Moisture Characteristics of *Populus euphratica* under Different Conditions

SHEN Yu-lin, WANG Xi-ming*, NING Guo-yan

(College of Material Science and Art Design, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: It is of importance to study the characteristics of wood moisture for wood drying and use. Water is the main factor affecting the decay of *Populus euphratica* wood. In this paper, water conditions of three *P. euphratica* trunks were examined, to study the storage conditions of the wood, i. e. living tree (LT), felled tree (FT), and naturally felled and decayed trees (NFT) occurring in Ejina Banner of Inner Mongolia. The water characteristics included initial water content, dimensional stability, water absorption, and equilibrium moisture content, respectively. The relaxation characteristics (T_2 value) of wood moisture of air dried and kiln dried wood were investigated by NMR. The results showed that the initial water content was in the order of LT > FT > NFT. Linear shrinkage ratio was tangential > radial > longitudinal, volume shrinkage ratio was LT > FT > NFT, the dimensional stability of NFT was the strongest. After the T_2 value was retrieved, it was observed that the wood of LT contained two kinds of combined water in the air dried state, and FT and NFT just contained one kind of combined water. The water in LT had a strong ability to combine with the wood, and it was weak in FT and NFT. The water capacities of LT, FT, and NFT were 128%, 156% and 153.9%, respectively, and the equilibrium moisture contents were 1.94%, 1.80%, and 1.33%, respectively.

收稿日期:2017-03-07 修回日期:2017-04-24

基金项目:内蒙古自治区科技创新团队“沙生灌木纤维化能源”(202044);内蒙古自治区草原英才创新团队“沙生灌木纤维化能源开发”(102061)。

作者简介:沈玉林,男,硕士研究生,研究方向:木材干燥。E-mail:imau_shenyulin@126.com

*通信作者:王喜明,男,教授,博士生导师,研究方向:木材科学。E-mail:w_ximing@236.net

Key words: *Populus euphratica*; moisture characteristics; NMR; equilibrium moisture content

胡杨(*Populus euphratica*)又称异性杨,是落叶中型天然乔木,直径可达 1.5 m,木质坚硬,树叶阔大清香。耐旱耐涝,生命力比较顽强,在自然界中属于稀有的树种之一。胡杨对研究亚非荒漠区气候变化、河流变迁、植物区系的演变以及古代经济、文化发展都有着重要的科学价值。

从 20 世纪 50 年代起,各地在发展胡杨方面做了不少工作,通过封滩育林和人工造林,都取得了一定成果。特别是从 1985 年以来,内蒙古的阿拉善盟、鄂尔多斯、巴彦淖尔、包头等地在采种、育苗、造林等各环节都进行了较深入的研究,加快了造林育林进度。目前“胡杨之乡”额济纳旗境内有东、西 2 条季节性河流,沿岸分布的胡杨天然次生林有 2 万多公顷,胡杨和沙枣混交林有将近 0.2 万 hm^2 ^[1-2]。阿拉善盟、鄂尔多斯、巴彦淖尔及包头市已发展人工造林 400 多 hm^2 ^[3]。说明胡杨的生长区域集中,我们要大量开发胡杨的造林技术,而且还要研究胡杨的生物学特性,提高干燥质量,利于合理开发和利用,向节约胡杨资源方向发展。

研究木材与水分的关系,必须先了解木材中水分存在状态,它的分布规律,以及木材中水分的测定和计算。C. Shaar^[9]认为木材中的水分一般有 3 种状态,即:存在于细胞腔中的自由水、存在于细胞壁中的吸着水和水蒸气。吸着水的变化是木材性质的转折点,木材的各项性质均随吸着水的增减而发生变化。但是自由水的增减不会影响到木材的力学等性质,仅仅影响到木材的重量、电学和热学等性质。木材内水分通道有三:相互连通的细胞腔、细胞间隙、纹孔膜上的小孔,阔叶材的水分移动途径包括导管和导管状管胞、管胞等。

木材的水分特性研究对木材的干燥工艺具有重要意义,与木材防腐、杀虫药剂的浸注,木材制品的油漆、着色、胶合等也都有着密切关系,而对于胡杨这种珍贵木材,对比研究胡杨木 3 个不同状态,即活立木、伐倒木、枯倒木的水分特性,包括初含水率、干缩率、水分弛豫 T_2 值、吸水性和平衡含水率等,对胡杨木的存放和应用具有很重要的意义。也可以解惑胡杨为什么被称为“活化石”。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

额济纳旗的胡杨林保护区冬季寒冷、夏季炎热,温差大,阳光充足。年平均气温 8.3℃,极端高温达到 42.2℃,极端低温达到 -37.6℃,年平均降水量

37.9~49.3 mm,而年蒸发量远远高于年降水量。此地盛行西北风,多风月平均扬沙日数为 21 d,冬春风大且常伴寒流出现。

本研究所用的试验材料采伐自于内蒙古自治区额济纳旗的胡杨林保护区,选择胡杨活立木伐倒后用保鲜膜包起来放在冰箱储存(模拟活立木),伐倒木、枯倒木各一段。活立木及伐倒木有心边材的区分,枯倒木由于时间过长导致心边材区分困难,为了保证研究可靠性,这里不作区别。

1.2 仪器与设备

木材干燥的设备:DZF-6210 型真空干燥箱,上海一恒科学仪器有限公司提供。

核磁共振技术检测仪器:德国布鲁克公司生产的低场核磁共振弛豫仪。

1.3 方法

1.3.1 含水率、干缩性及吸水性的测定 根据 GB/T 1931-2009《木材含水率测定方法》和 GB/T 1932-2009《木材干缩性测定方法》GB/T 1934.1-2009《木材吸水性测定方法》进行试验。

1.3.2 核磁共振技术测定木材中水分的 T_2 值

1)将胡杨的活立木、伐倒木和枯倒木 3 种木材进行气干处理,再用曲心钻钻取直径 10 mm、长度约为 20 mm 的圆柱体,为了防止水分变化影响试验结果,试件在取出时立即用保鲜膜包裹(3 种木材各取 2~3 试件)。

2)将核磁共振仪进行预热,然后将空试管放入磁体内进行信号量测量,将试件放入磁体中,调入 FID-T2. app 程序,调试参数(磁体频率:20 MHz, 90°脉冲宽度:15.02 μs , 180°脉冲宽度:30.7 μs , 弛豫时间:4.8 μs , 循环延迟:2 s, 回波时间:0.5 ms, 扫描次数:16, 回波数:1 500),然后进行测量及采集数据。

3)将同一试件置于(103±2)℃干燥箱中进行绝干处理,绝干后取出放入玻璃干燥器中冷却,然后再放入核磁共振仪磁体中用同一个参数进行测量和采集数据。

4)将所有测出的 T_2 值进行反演处理,进行气干材和室干材对比分析水分存在状态。

1.3.3 平衡含水率测定 用温湿度测量仪测量出实验室内的温度和湿度,根据前人经验^[4],每种木材取试件数 40 个左右进行称重,之后放入铁方盘中(注意试件之间留有一定的空间),之后每隔 4~5 d 拿出 2~3 个试件进行称重,直到重量无变化,试件水分达到一个新的平衡。

2 结果与分析

2.1 含水率及干缩率

2.1.1 含水率 3 种状态胡杨木的初含水率测试结果见表 1,可以看出活立木、伐倒木、枯倒木 3 种木材的初含水率有很大的差异,原因是活立木的边材导管对水分还起着输导作用,所以水分较多,伐倒木在砍伐后一段时间内水分会自然丧失一部分,枯倒木由于枯倒时间过长,密度减小,渗透性增加,水分丧失较多,只留存少部分水分。

比较活立木和伐倒木的边材和心材含水率,心材的含水率有明显的差别,根据心材树种的定义,判定为胡杨属于心材树种。木材在伐倒一段时间后,水分在大自然条件下进行调节,心材由于输导系统阻塞,渗透性降低,密度较大,水分丧失得要比边材慢一些,所以伐倒木心材的含水率要高于边材的含水率。

2.1.2 干缩率和干缩系数 3 种状态胡杨木材的干缩率测试结果见表 2,可以发现,对于 3 种木材线向干缩率都是:弦向>径向>纵向,与其他木材的干缩特性一样,原因是木材具有各向异性,导致木材干缩和湿胀在不同方向上具有差异,且木材干缩还受到次生壁中层微纤丝的排列方向和木射线对径向收缩有抑制作用等因素影响。

由表 3 可知 3 种状态胡杨木材的干缩系数接近。弦向的干缩系数>径向和纵向的干缩系数,干缩系数是衡量木材尺寸稳定性的重要指标,三者干缩系数之所以相近,是因为它们是同一树种,产地相同,且木材的构造稳定,即使伐倒木和枯倒木长时间处于无生命状态,但它们的纹理方向包括细胞壁中各层微纤丝排列方向几乎不发生变化,这些特点决定了三者干缩系数接近,进一步说明胡杨木材尺寸稳定。

由表 4 数据可知,胡杨活立木的差异干缩与其他 8 种杨木相比差异较大,胡杨的差异干缩最小,在干燥失去水分时相比于其他杨木不易造成干缩应力差异,不易开裂。胡杨与其他杨树木材构造比较可知,胡杨天然林木材管孔数目均多于其他各代表树种,导管分子的细胞壁、木纤维的细胞壁的平均厚度较其他各代表树种为厚,因此在杨属木材中干缩稳定性最佳,北京杨最差。

由表 5 可知活立木体积干缩量较大,由于木材干缩发生在含水率降至纤维饱和点以下,随着木材含水率的降低,干缩量随之增大,直至木材含水率降为零,其干缩量达到最大。活立木的含水率高于伐倒木和枯倒木,所以体积干缩量比较大。从伐倒木

和活立木的心边材作比较,可发现心材比边材更容易变形。综上得之,木材的含水率对木材干缩具有一定的影响关系,且枯倒木的尺寸稳定性最佳。

表 1 木材初含水率

Table 1 Initial moisture content of wood			
材种	平均值/%	变幅/%	标准偏差
活立木心材	48.3	40.2~55.6	0.049 457
活立木边材	37.9	32.3~46.3	0.040 919
伐倒木心材	11.6	9.7~14.4	0.013 729
伐倒木边材	9.7	7.4~11.6	0.014 301
枯倒木	6.2	5.2~7.4	0.007 248

表 2 线向干缩率的平均值

Table 2 Average dry shrinkage anisotropy %			
材种	弦向	径向	纵向
活立木心材	7.10	6.09	0.54
活立木边材	7.42	5.20	0.70
伐倒木心材	2.85	2.90	0.66
伐倒木边材	2.46	1.49	0.88
枯倒木	1.52	1.20	0.07

表 3 线向干缩系数

Table 3 Shrinkage coefficients %			
材种	弦向	径向	纵向
活立木心材	0.24	0.203	0.018
活立木边材	0.25	0.17	0.023
伐倒木心材	0.25	0.25	0.057
伐倒木边材	0.25	0.15	0.09
枯倒木	0.245	0.193	0.011

表 4 胡杨与其他几种杨木^[8]差异干缩表

Table 4 Dried shrinkage difference table of <i>Populus</i> and other poplar speices								
材种	胡杨	健杨	大官杨	八里庄杨	蒙阴杨	二杨	北京杨	加杨
差异干缩值	1.16	1.81	1.67	1.61	1.79	1.45	2.74	1.53

注:差异干缩=弦向干缩系数/径向干缩系数。

表 5 体积干缩率

Table 5 Volume shrinkage ratios			
材种	平均值/%	变幅/%	标准偏差
活立木心材	13.54	9.6~17.17	0.022 124
活立木边材	12.95	4.5~16.1	0.026 607
伐倒木心材	8.03	7.9~18.8	0.034 937
伐倒木边材	4.95	1.8~8.1	0.017 121
枯倒木	3.38	1.5~4.3	0.008 263

2.2 水分弛豫时间

由于胡杨木在自然条件下水分散失较快,在这里只进行气干和室干 2 种状态下水分状态的对比研究。

弛豫时间 T_2 间接表明水分与木材的自由度, T_2 值越小说明水分与木材的结合强度越高,水分越

不容易排出。N. Labbé^[11]等学者认为一般情况 T_2 值 ≤ 10 ms 时,木材中水分状态为结合水,当 T_2 值 ≥ 10 ms 并趋近于 100 ms 时则为自由水,但具体的 T_2 值随着树种、初含水率等条件的不同而不同。

表 6 是根据弛豫时间的长短,将胡杨的活立木、伐倒木和枯倒木 3 种木材在气干和室干 2 种状态下进行区分, T_2 值代表每种状态下水分的弛豫时间。图 1、图 2 和图 3 是每种状态下水分反演图像,我们可以结合 T_2 值和峰面积,对水分状态和水分量的变化进行分析。

表 6 T_2 值分布
Table 6 T_2 value distribution

材种	气干状态下		室干状态下
	T_2 -1	T_2 -2	T_2
活立木	2.59	11	1.7
伐倒木	16.8	—	0.11
枯倒木	10.3	—	0.18

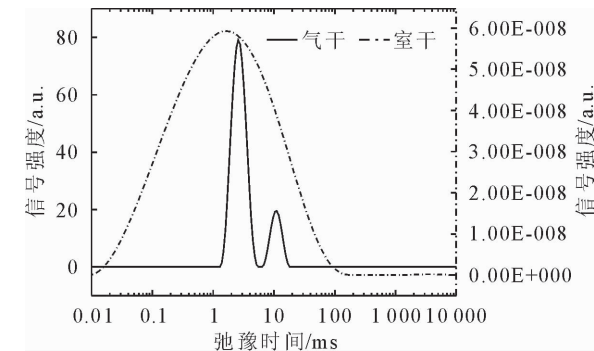


图 1 活立木气干状态和室干状态水分 T_2 分布
Fig. 1 T_2 value distribution of LT woods in air dried and kiln dried state

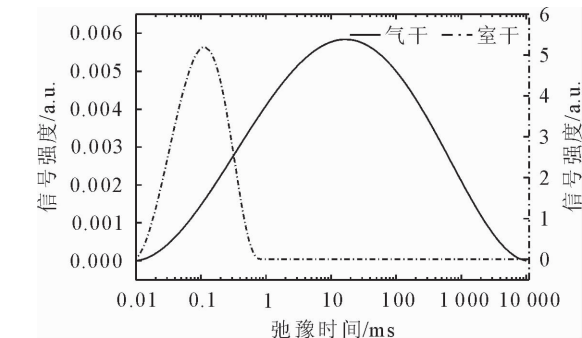


图 2 伐倒木气干状态和室干状态下水分 T_2 分布
Fig. 2 T_2 value distribution of FT woods in air dried and kiln dried state

结合表 6 和图 1 可以看出活立木在气干状态下有 2 种结合水,一种结合水 T_2 值为 2.59,另一种 T_2 值为 11,2 种结合水与木材的结合强度不同, T_2 值为 2.59 的结合水与木材的结合更为紧密,不易排出。室干状态下只存在 1 种结合水, T_2 值为 1.7,

说明与木材结合强度较低的结合水全部排出,结合较为紧密的结合水没有全部排出。

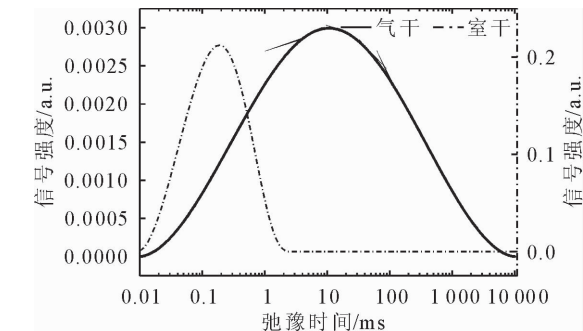


图 3 枯倒木气干状态和室干状态下水分 T_2 分布
Fig. 3 T_2 value distribution of NFT woods in air dried and kiln dried state

结合表 6 和图 2 可以看出,伐倒木在气干状态下有结合水的存在,从峰的面积上看结合水的水分量很多,在室干处理后,大部分的结合水排出,只剩下少部分的结合水存在,且结合强度较高,说明要达到绝干状态极其困难。

结合表 6 和图 3 可以看出,对于枯倒木和伐倒木水分状态是一样的,气干状态下都只有一种结合水,且与木材的结合强度较低。室干处理后可发现,存在结合水的 T_2 值为 0.18,与伐倒木状态接近,说明枯倒木要达到绝干状态也是极其困难的。

综上 3 种木材水分状态的分析可以得出,活立木由于细胞存活状态好,水分在细胞内结合的能力较强;伐倒木和枯倒木在失去生命力的状态下,木材中还有水分结合,说明胡杨在外界环境下对于水分的平衡调节能力很强,客观说明了胡杨不易腐朽的原因。

2.3 吸水性

每个试样在规定的测试吸水时间的吸水率(A)按下列公式计算,准确值至 1%。

$$A = \frac{m - m_0}{m} \times 100\%$$
 (1)

式中, A 表示试样的吸水率(%); m 表示试样吸水后质量(g); m_0 表示试样全干时质量(g)。

2.3.1 水容量分析 在第 8 天认为试样达到了最大含水率,进行取平均值分析,活立木的水容量为 128.3%,伐倒木的水容量为 156%,枯倒木的水容量为 153.9%。利用方差分析(表 7),在 0.05 显著性水平下,伐倒木和枯倒木在木材的水容量上无显著性差异,而活立木的水容量较其他 2 种木材有显著差异。木材的吸水性与木材的密度、构造和内含物状况有关。因为活立木的树材内含有树胶、较多的侵填体或其他的内含物,而且密度也比伐倒木和

枯倒木高,使得活立木的水容量较低。

2.3.2 吸水率的动态变化 根据每种木材的试件在规定吸水时间的吸水率,将其绘制成吸水曲线图(图 4),活立木吸水过程大致可以分为 3 段:0~1、1~5、5~8 d,吸水速率逐渐下降,在 8 d 基本趋于水平并且几乎不再吸收水分。而对于伐倒木和枯倒木,在 6 h 内吸水量>活立木,它们的吸水速率变化比较平缓,在 7 d 时已经开始趋于稳定,表明伐倒木和枯倒木达到吸水平衡用时少于活立木,它们之间水容量差异主要在 0~1 d 体现。就吸水速度而言,木材原有含水率越高,其吸水速度显然低于原有含水率低的状况。由于活立木原有的含水率也较高,所以在前 6 h,相同的时间段内活立木的水容量低于伐倒木和枯倒木。但在 72 h 发现活立木的吸水速度快于伐倒木和枯倒木,因为由于伐倒木和枯倒木的密度低,细胞中内含物减少,使得吸水速度非常快,6 h 几乎接近于饱和,导致之后的吸水速度下降。徐峰^[13]等对 20 多种木材进行吸水性研究,就吸水速度而言,木材密度大小不是吸水快慢的主要因素,它主要受木材细胞的大小及纹孔的大小、细胞中的内含物等因素影响,我们通过化学试验分析发现,他们的抽提物含量差异较大,这是三者吸水速度不同的主要原因。

表 7 方差分析表
Table 7 ANOVA table

组间	差异源		
	均方	F 值	Prob>F
活立木 & 伐倒木	0.230 46	14.348 39	0.003 56
活立木 & 枯倒木	0.197 12	15.987 4	0.002 52
伐倒木 & 枯倒木	0.001 3	0.226 6	0.644 29

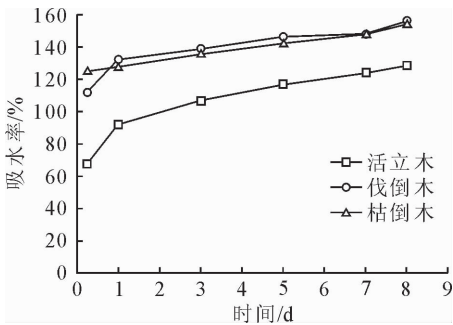


图 4 吸水率的动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of water absorption

2.4 平衡含水率

4 月份在实验室内经过 21 d 放置,测量木材重量不再变化,认为木材达到了新的水分平衡,用下列公式算出平衡含水率(E):

$$E=\frac{A-A_0}{A}\times 100 \tag{2}$$

式中,A 为达到新的水分平衡时试件重量(g),A₀ 为试件全干时重量(g)。计算结果见表 8:可以看出,三者平衡含水率存在差异,活立木和伐倒木的平衡含水率相对大一点。

测定胡杨的化学性质时,从不同状态胡杨木材的红外光谱图发现从活立木到伐倒木和枯倒木,木材中的羟基吸收峰的强度在降低,因此羟基数量在减少。因为枯倒木长时间处于干燥状态,分子之间的距离较近,使部分游离态的羟基之间结合成氢键,导致木材中能吸收水分的羟基和自由基数目减少,从而降低了由吸收所达到的平衡含水率。伐倒木和枯倒木的密度较大,水分排出后,所留的空隙较多较大,很多都被空气占据,妨碍了木材对水分的吸收。以上原因导致了三者最终所达到的平衡含水率有所差异。

表 8 胡杨木材的平衡含水率

Table 8 Equilibrium moisture content of *Populus euphratica*

材种	平均值/%	变幅/%	标准偏差
活立木	1.94	0.59~1.22	0.002 491
伐倒木	1.80	1.20~1.91	0.008 413
枯倒木	1.33	0.72~2.10	0.003 303

注:试验地点:实验室内;试验时间:4 月 8 号至 5 月 1 号;温度 14℃;湿度 34%

3 结论与讨论

通过对胡杨活立木、伐倒木和枯倒木的水分特性的对比研究,我们可以了解到胡杨木在 3 种不同材质状态下的初含水率、平衡含水率、水分存在状态、尺寸的稳定性以及吸收水分的状况。

初含水率:活立木(心材:48.3%,边材:37.9%)>伐倒木(心材:11.6%,边材:9.7%)>枯倒木 6.2%。胡杨的心边材颜色和含水率有明显差别,心材含水率>边材含水率,判定胡杨属于心材树种^[5],与其他杨木等阔叶材有所不同。胡杨 3 种木材 3 个方向的干缩率都是:弦向>径向>纵向,与其他的木材干燥特性一样,主要影响因素是次生壁中层微纤维排列方向和木射线抑制作用^[6]。3 种胡杨木材的干缩系数接近,由于胡杨比其他各派代表树种的管孔多,细胞壁厚^[7],因此在杨属木材中稳定性最佳^[8]。由体积干缩率可知胡杨的心材比边材更容易变形,枯倒木的尺寸稳定性最佳,说明含水率对干缩性具有一定的影响^[9]。

在气干状态下,活立木含有 2 种结合水,一种结合水 T₂ 值为 2.59,另一种 T₂ 值为 11,伐倒木和枯倒木只有 1 种结合水,T₂ 值分别为 16.8 和 10.3。在室干状态下,活立木、伐倒木和枯倒木的结合水的 T₂ 值分别为 1.7、0.11、0.18。活立木中的 2 种结

合水与木材的结合强度不同^[10],且与木材结合强度要强于伐倒木和枯倒木。伐倒木和枯倒木达到绝干状态极其困难。

活立木的水容量为 128.3%,伐倒木的水容量为 156%,枯倒木的水容量为 153.9%。伐倒木和枯倒木的水容量>活立木,伐倒木和枯倒木的吸水能力强,而活立木的吸水能力较弱,因为伐倒后的木材吸水性会增强^[12]。吸水速度主要受到木材原有的含水率^[6],以及细胞中的抽提物含量影响^[13]。由于吸水速度较快,说明他们有良好的浸注性^[14]。

平衡含水率,活立木为 1.94%,伐倒木为 1.80%,枯倒木为 1.33%。活立木在新的环境中,最先达到新的水分平衡,其次是伐倒木。说明活立木对环境相应机制最容易适应,也说明活立木有很强吸着和解吸能力。三者平衡含水率有差异,主要原因是能吸收水分的羟基和自由基数目减少,降低了由吸收所达到的平衡含水率^[15],自身材质也是主要的影响因素^[16]。

参考文献：

[1] 刘洪贵. 额济纳旗胡杨封滩育林的调查[J]. 中国沙漠, 1985, (3):30-32.

[2] 王世绩. 胡杨林[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995:129-131.

[3] 武智双. 胡杨造林技术[J]. 内蒙古林业, 1990(5):18-19.

[4] 徐峰, 罗建举. 北京: 木材学实验教程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014:67-70.

[5] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004:134-138.

[6] 尹思慈. 木材学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1996:120-122.

[7] 魏庆莒. 胡杨[M]. 北京: 中国林业出版社, 1990:22-46.

[8] 王桂岩, 李琪. 几种杨树木材主要物理力学性质测试报告[J].

山东林业科技, 1990(Supp. 1),99-100.

[9] SKAAR C, SIAU J F. Thermal diffusion of bound water in wood [J]. Wood Science and Technology, 1981, 15 (2): 105-112.

[10] 李超. 木材中水分弛豫特性的核磁共振研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012.

[11] LABBÉ N. Time-domain 1H NMR characterization of the liquid phase in greenwood[J]. Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood, 2006, 60(3):265-270.

[12] 王兴龙, 王立海. 腐朽对山杨木材吸水性和电阻的影响[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(3):257-261.

WANG X L, WANG L H. The effects of decay on electrical resistance and moisture content of *Populus davidiana* wood [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(3): 257-261. (in Chinese)

[13] 徐峰, 梁文. 广西 20 种木材吸水性和湿胀性的研究[J]. 广西农学院学报, 1989, 8(3):56-66.

XU F, LIANG W. A study on the water-absorbing capacity and moisture-absorbing expansion of 20 kinds of wood in Guangxi[J]. Journal of Guangxi Agricultural College, 1989, 8 (3):56-66. (in Chinese)

[14] 韦鹏练, 黄藤花, 符韵林. 观光木人工林木材物理力学性质的研究[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(6):221-225.

WEI P L, HUANG T H, FU Y L. Physical and mechanical properties of *Tsoongiodendron odorum* woods[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29 (6): 221-225. (in Chinese)

[15] URQUHART A R. The mechanism of the adsorption of water by cotton[J]. Journal of the Textile Insititute Transactions, 1929, 20(6):125-132.

[16] 杨庆贤. 木材吸着滞后现象的探讨[J]. 福建林学院学报, 1988, 8(4):350-353.

YANG Q X. Approach to hysteresis of wood sorption[J]. Journal of Fujian College of forestry, 1988, 8(4):350-353. (in Chinese)