“南海Ⅰ号”发掘现场船体的稳定性保护

The Stability Conservation on the Excavation Site of “Nanhai No.1” Shipwrecks of Song Dynasty

张玄微

Zhang Xuanwei

（广东海上丝绸之路博物馆，阳江，529536）

（Maritime Silk Road Museum of Guangdong, Yangjiang, 529536）

内容提要：2013年“南海Ⅰ号”全面发掘工作展开后，船体及船载文物陆续暴露于大气环境之中。“南海Ⅰ号”宋代沉船浸泡于水下长达800余年，船体木材降解、损坏严重，加之船载文物数量巨大，材质种类多样，叠积密集，其发掘及保护的模式尚无先例可循，发掘现场船体保护任务十分艰巨。维持船体的稳定性，为今后的全面保护、修复做好基础性工作，是“南海Ⅰ号”当前发掘阶段现场保护的重点。为此，结合“南海Ⅰ号”沉船沉积及保存环境变化、船体木材保存状态进行检测分析，梳理了“南海Ⅰ号”现场稳定保护处理的基本技术路线和实施方法。相关监测分析数据显示，“南海Ⅰ号”船体在现场发掘条件下的保存状态没有进一步劣化的趋势，说明发掘现场稳定性保护处理方案得当，实施措施有效。

关键词：海洋环境　饱水木材　发掘现场　稳定性保护

Abstract: Since the beginning of comprehensive excavation of “Nanhai No.1” shipwrecks of Song Dynasty in 2013, the hull and ship-borne cultural relics have been gradually exposed to the air environment with the process of its excavation. As a result of the fact that the “Nanhai No.1” shipwrecks of Song Dynasty has been submerged in the South China Sea for more than 800 years, the degradation and damage of the hull wood have become increasingly serious. In addition, the quantity of cargo carried by the ship was huge, the materials of cultural relics were various, and the goods were piled up densely. Therefore, there is no precedent for its excavation and conservation mode, and the task of hull conservation on its excavation site is very arduous. To maintain the hull stability of “Nanhai No.1” shipwrecks of Song Dynasty, is the basic work for the comprehensive conservation and repair of the hull in the future, and also the key task of implementing on-site conservation in the current stage of its excavation. In this study, the change of deposit and preservation environment of “Nanhai No.1” shipwrecks of Song Dynasty has been analyzed, and the preserved status of the wood of its hull been checked. The basic technology roadmap and implementation methods of on-site stability conservation and treatment of “Nanhai No.1” shipwrecks of Song Dynasty are presented in this

paper. Relevant monitoring and analysis data show that, there is no further deterioration trend of the preserved status of the hull of “Nanhai No.1” shipwrecks of Song Dynasty under the condition of on-site excavation, which indicates that the stability conservation and treatment scheme on its excavation site is appropriate and the implementation measures are effective.

Key Words: Marine environment; water-saturated wood; excavation site; stability conservation

“南海Ⅰ号”宋代沉船从沉没到被整体打捞出水至今，经历了三个时期的环境变化。第一个时期是从“南海Ⅰ号”沉没到2007年被整体打捞之前，长达800余年；第二个时期是沉船被整体打捞转运入住“水晶宫”到2013年启动全面发掘；第三个时期是2013年全面发掘至今。这三个时期，船体保存的环境状态并不相同，经历了“稳定”、“干扰”和“变化”的转变过程。

“南海Ⅰ号”在长达800余年的环境“稳定期”内，没有受到人为的干扰和破坏。入住“水晶宫”后，保存环境开始发生变化，特别是启动全面发掘后，由于发掘工作的“干扰”，保存环境急剧变化，船体保存环境和文物保存状态之间原有的平衡关系被打破，出现了一系列的保护难题。从文物的堆叠关系、材质多样性上看，“南海Ⅰ号”沉船遗址区内的文物密集程度可以说是前所未有的，由于“南海Ⅰ号”的发掘既不同于普通的水下考古发掘，也不同于传统的陆地发掘[1]，开放式发掘的现场环境极难控制，这在国内外沉船保护案例中尚没有先例可循，其现场保护工作难度可想而知。

前期研究获取的资料显示，“南海Ⅰ号”整体打捞移至“水晶宫”后，保存环境状况对船体的长期保存极为不利[2]。为做好发掘现场的船体保护工作，“南海Ⅰ号”保护组开展了大量前期工作，确定了船体的稳定性保护为现场工作目标，在开展船体稳定性保护工作的同时，对船体病害、保存状态以及保护效果等重要信息及时提取并进行分析评估，确保发掘期间船体的安全和稳定。

一、“南海Ⅰ号”病害环境

文物病害的发生主要取决于两方面的因素：文物材质本身的物理、化学特性，文物所处的不利环境因素对其产生的干扰破坏[3]。

作为承载文物的物质载体，不论是有机物还是无机物，就材料本身而言，都具有一定的“寿命”，材料的自然“老化”是一个不可逆的过程，这是由材料本身的特点决定的。物理、化学性能稳定的材料，“寿命”就长，反之，“寿命”自然会短一些。

环境因素对文物的“寿命”影响极大，有利的环境条件可以极大地延缓文物材料的劣化进程，而不利的环境一方面可以加快文物材料的劣化速度，另一方面还会引发文物材料发生新的“病害”，从而使文物材料的“寿命”缩短。

因此，对文物所处的环境进行研究分析，了解文物所处环境条件以及对文物材料产生的不利影响，对制定文物保护方案、开展文物保护措施具有非常重要的意义。文物病害环境调查，是制定科学合理保护方案的前提条件。

就“南海Ⅰ号”的木质船体来说，三个时期文物病害的环境特点是不同的。

（一）稳定期

海洋是一个复杂的环境体系，海水水质、洋流、风浪、潮汐、海水温度、海洋生物、海洋地质、沉积条件等多方面的因素，都会对“南海Ⅰ号”的保存产生影响。

以海洋生物为例，威胁船体保存的生物有污损生物、钻木类生物等。藤壶、牡蛎等污损生物以石灰质外壳或特殊的附着器官，将身体固定在船木或船货上，并将周围的泥沙、船载物等粘结成硬质的凝结物，使所附着的物体遭受不同程度的破坏腐蚀；蛀木和钻孔类海洋生物，如海虱（蛀木水虱、团水虱、跳水虱）、海蛆（船蛆）、海笋等，有的以木材为居所避免其他动物侵害，有的以木材为食，或二者兼而有之。以海蛆为例，其身体柔软、细长，繁殖能力极强，一只海蛆每年可产卵1亿个以上，海蛆幼体钻入木材后终生不出，随着个体的生长，逐渐深入木材，深度可达0.2—0.3米，有的海蛆种类体长可达1米，每个海蛆个体之间穿凿的孔道各自独立并不沟通，被海蛆穿凿的木材，表面看似完整，其实内部已千疮百孔，糟朽不堪，强度极差。蛀木水虱主要在木材表层穿凿并以木材为食，在蛀木和钻孔海洋生物的侵蚀下，木材很快就会被损坏殆尽。此外，海流带动泥沙造成的冲击、打磨，海水的腐蚀等，都严重威胁着沉船的长期保存。

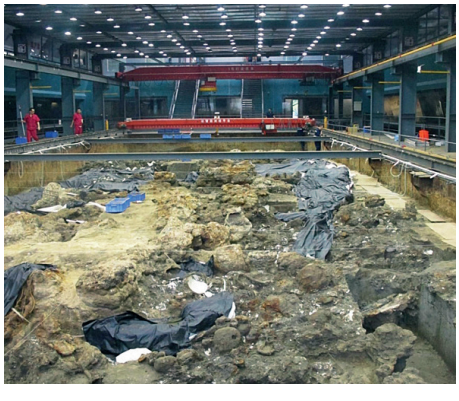


图1 覆盖在“南海Ⅰ号”船体上部的铁质文物及凝结物

就水下环境来看，对“南海Ⅰ号”的保存是极其不利的。但是，“南海Ⅰ号”在水下800余年，船体主要结构却得以较好地保存，这得益于诸多因素的巧合。首先，“南海Ⅰ号”在沉没过程中并没有发生解体和倾覆，这是船体得以较完整保存至今的前提。第二，沉船沉没地的海床为软质的淤泥沙底，淤泥层厚度非常大。探查资料显示，海床淤泥层厚度达18米以上。由于船体自重加之洋流裹挟的泥沙淤积，船体逐渐下沉并被泥沙包埋于海床下1米左右的泥沙内[4]。淤泥的包埋使得船体长期处于低氧环境，有利于抑制有害生物活动，减缓了对船体的侵蚀破坏。厚度达1米的淤泥层，也减弱了海流泥沙对船体的冲刷磨蚀。第三，“南海Ⅰ号”在甲板上层装载了大量的铁制货物，铁器在海水的腐蚀作用下锈蚀成一体，并与周围的泥沙胶结成一块巨大而致密的铁质凝结物，覆盖在船体上部。这层巨大的铁质凝结覆盖物对船体起到了重要的保护作用，没有被凝结物覆盖的船体上层建筑部分，遭到严重破坏，现已无存。

当然，船体完全下沉到海床的淤泥层需要一个过程。在沉没的最初阶段，船体受到的病害侵蚀处于最活跃的状态，特别是海洋生物病害（污损生物、穿凿类生物）主要发生在船体被淤泥完全包埋之前的时间段内。

船体完全沉入淤泥层后，淤泥层的掩埋和船舱上部铁器锈蚀形成的硬质凝结物，成了保护船体的“天然”屏障（图1）。此时，沉船处于一个相对密封的环境，海洋生物侵蚀和海流泥沙冲刷产生的破坏活动基本停止，沉船病害发展与周围环境逐渐相互适应，病害活动处于发展极其缓慢的平衡状态，沉船病害环境进入长期的“稳定期”。

（二）干扰期

从2007年整体打捞到2013年全面发掘开始前的这一时期，保存环境发生了较大变化，由水深近30米的天然海域转入一个封闭的水深距沉船遗址表面仅有1米的人工封闭水体环境。沉船的封闭沉积环境发生变化，沉船原有的低温、低氧环境被打破。

“水晶宫”水体容量仅有3万立方米（图2），水源由海滩就近抽取，由于取水口海水受陆地排放影响，所取海水温度、含盐量、微生物、藻类、金属离子等与沉船原埋藏环境差异显著，有利于生物繁殖和沉箱金属的腐蚀。“水晶宫”室内大气



图2 保存“南海Ⅰ号”的“水晶宫”



图3 “南海Ⅰ号”全面发掘后各材质文物叠积及暴露情况

环境、封闭的水体环境、沉箱锈蚀等多种因素开始对沉船木质船体的原有保存状态产生干扰。

（三）变化期

2013年启动了“南海Ⅰ号”全面发掘，参照陆地考古发掘模式，将“水晶宫”的水位排放到考古发掘工作面以下，并随着发掘进度逐渐降低“水晶宫”的水位，使之始终保持在发掘工作面以下。陆地考古的工作模式虽然有利于发掘，但是由于从饱水、封闭的环境状态变为直接暴露于室内空气环境，高氧、高温、光照等都会加速船体木材的降解，也利于微生物的滋生繁殖，引起船木病害迅速蔓延。船载的大量铁器，在高氧、潮湿环境下会加速腐蚀，铁质锈蚀物，特别是硫铁锈蚀物，对船木产生的破坏非常严重[5]。环境条件的改变，使得病害情况变得十分复杂，如果不加以控制，病害的发展将会十分迅速。发掘现场文物材质种类多样，不同材质的文物对保护的要求不同甚至相互矛盾，现场文物保护工作面临着巨大的挑战（图3）。

二、病害调查

“南海Ⅰ号”全面发掘工作开始后，船体逐步暴露出来，为进一步深入探查、评估“南海Ⅰ号”保存状况创造了有利条件。根据现场勘查，船体木材病害的表现形式主要有残缺、断裂、变形、变色等。

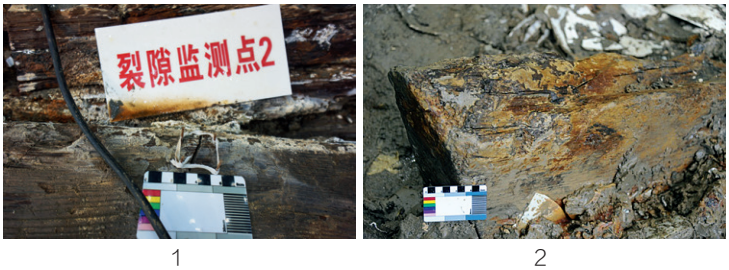
残缺、断裂、变形的直接原因是外力造成的物理性损伤，船木腐蚀、降解、生物蛀蚀等导致的材料和船体结构强度下降；变色主要是因为硫、铁等离子浸润附着，木材纤维素酸化、降解（图4）。

（一）生物损害

海洋生物损害主要指钻孔类、蛀木类及污损性生物对船木的破坏，“南海Ⅰ号”船木受钻孔类生物蛀蚀损害比较严重，损坏集中在船体上部（图5），这是因为船体沉没后，船体下部很快下沉到海床的淤泥层中，淤泥的低氧环境不利于海洋生物滋生繁殖，而船体上部被淤泥包埋经历了较长时间。

（二）船木纤维素含量分析

木材纤维素是木材强度的主要来源，纤维素含量分析是评估木材降解和糟朽程度的重要指标。选取的8个检测点的船木纤维素含量均不足20%，远低于同种新材纤维素含量，说明船木降解严重（表1）。



1 2

图4 船体木材病害
1. 船木变形、断裂 2. 船木变色浸蚀



图5 船木被船蛆蛀蚀

（三）含水率分析

木材含水率也是衡量木材腐朽程度的指标之一，对于饱水木材来说，含水率越高，木材降解程度越大，强度也就越低。

考古工作者分别采集了船体木材样品和船尾零散木材样品共13件，测试其含水率。测试结果显示，船体木材含水率最高348%，平均含水率为245%。船尾零散木材含水率最高值接近700%，平均含水率高达500%左右，远高于同种新材含水率（表2）。

（四）横纹抗压强度分析

横纹抗压强度是直接衡量木材力学性能和支撑能力的物理指标。考古工作者在“南海Ⅰ号”沉船体上选取了12个检测点，进行横纹抗压强度分析。分析结果显示，其平均最大应力值为0.74MPa，最低为0.29MPa，而正常松木的横纹抗压强度为3.5MPa左右，说明“南海Ⅰ号”船体木材已经严重腐蚀，强度已下降到正常强度的20%左右，船体十分脆弱（表3）。

（五）微生物检测

在对船体进行防腐剂喷淋保护前，对船体木材进行了微生物取样培养。分析

表1 船木纤维素含量分析

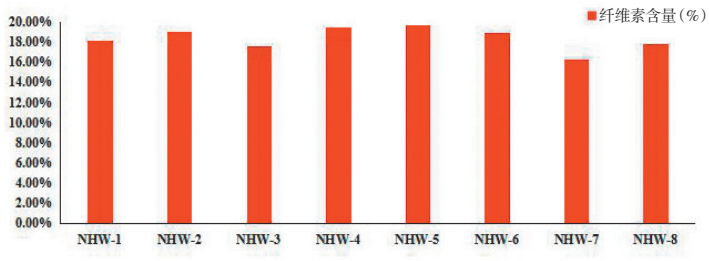


表2 船尾零散木材含水率分析

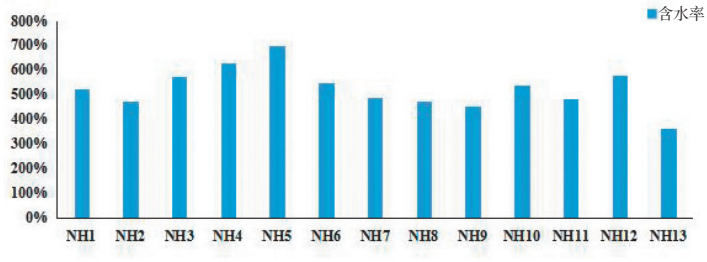


表3 船木横纹抗压强度分析

名称	最大值-载荷(N)	弹性模量(MPa)	屈服强度-载荷(N)	最大值-应力(MPa)
S-1	252.04	7.73	56.70	0.61
S-2	105.62	4.61	27.86	0.29
S-3	572.64	6.38	36.74	1.29
S-4	246.41	3.41	74.51	0.61
S-5	217.77	6.26	49.34	0.60
S-6	513.02	7.69	37.77	1.29
S-7	259.71	4.24	79.74	0.64
S-8	766.32	5.82	28.44	1.91
S-9	202.16	8.77	39.54	0.49
S-10	124.17	5.76	28.82	0.34
S-11	157.15	5.32	44.32	0.40
S-12	143.83	6.78	34.87	0.40
平均值	296.74	6.06	44.89	0.74（参考值3.5）

来源：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

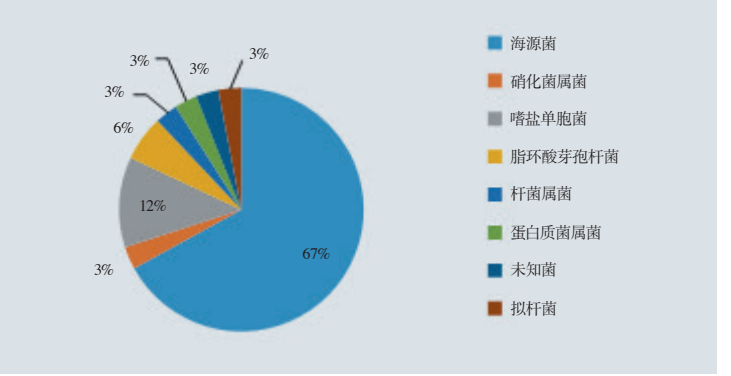
结果显示：样品NHI-4中真核生物镰刀菌属（*Fusarium*）占比例为85%，为主要真菌致病菌；样品NHI-4中原核生物海源菌属（*Idiomarina*）占总克隆数的67%，其余的克隆占有百分比相对较低，样品NHI-4中主要原核致病菌为海源菌属（表4）。

（六）船木硫、铁化合物及盐分沉积检测

对船体无颜色附着区域的木材进行取样，样品经切片烘干后，采用扫描电镜和能谱仪进行显微形貌和元素含量分析，发现木材内部有大量含硫、铁的化合物沉积（图6、表5），说明外观没有颜色附着的船木，也含有难溶的有害盐类。这些含硫、铁的化合物在有氧环境中可以氧化生成硫酸，并发生Fe^{2+}/Fe^{3+}氧化还原反应，对木材造成危害，严重威胁船体的长期安全保存[6]。

将船体木材样品烘干研磨后，采用离子色谱分析含盐量。分析数据显示木材含盐量非常高（表6），需要在今后的全面保护中进行彻底脱盐处理。

表4 样品NHI-4克隆文库中的细菌比例



来源：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

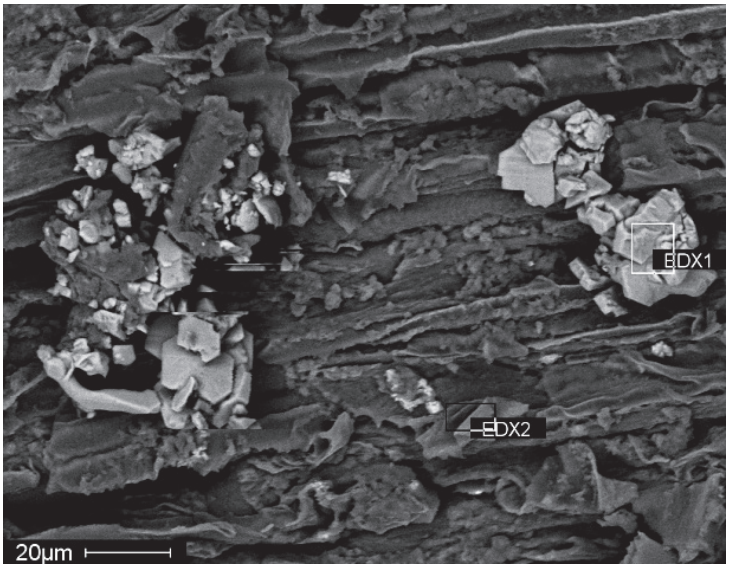


图6 船木扫描电镜纤维形貌分析
来源：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

表5 “南海Ⅰ号”船体木材能谱元素成分分析结果（wt%）

样品编号	序号	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	可能物相
NHW-1	a-EDX1	12.36	1.86	0.78	—	0.93	43.39	—	—	0.58	40.10	—	$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$、α-FeOOH
	a-EDX2	16.09	28.44	1.97	0.41	0.78	9.90	37.20	—	—	—	3.69	NaCl
	a-EDX3	16.25	32.81	2.33	—	—	5.59	42.12	—	0.89	—	—	NaCl
	a-EDX4	45.50	11.21	3.29	—	1.95	19.00	14.28	—	4.78	—	—	NaCl、$CaSO_4$等
	b-EDX1	41.48	—	—	—	—	25.73		—	32.79	—	—	$CaSO_4$
	b-EDX2	42.18	19.10	2.67	—	—	11.08	22.50	—	2.47	—	—	NaCl、$CaSO_4$等

续表

样品编号	序号	O	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Fe	Cu	可能物相
NHW-2	c-EDX1	36.75	3.59	1.66	2.76	6.14	6.82	3.00	—	2.01	37.26	—	$CaCO_3$、FeS_2、SiO_2
	d-EDX1	46.89	1.80	1.76	10.67	24.81	1.57	—	—	1.22	8.32	—	
	d-EDX2	48.12	3.48	2.58	7.85	11.72	10.46	—	—	2.19	12.21	—	
NHW-3	e-EDX1	39.51	4.74	—	—	—	15.29	—	—	—	40.47	—	α-FeOOH、$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$、FeS_2
	e-EDX2	36.40	4.29	—	—	—	15.80	1.18	—	—	42.34	—	
NHW-4	f-EDX1	38.36	2.18	1.78	12.50	29.60	2.75	3.26	3.49	—	6.08	—	NaCl、SiO_2、FeS_2、$CaCO_3$

来源：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

表6 “南海Ⅰ号”船体木材可溶盐含量（ppm）

元素 / 编号	Na^+	K^+	Mg^{2+}	Ca^{2+}	Cl^-	SO_4^{2-}
NHW-1	5.4117	2.1963	0.770118	—	6.94478	4.86232
NHW-2	1.67271	0.09642	0.16214	0.1729	2.08884	1.65894
NHW-3	3.54818	0.15426	0.52327	1.45604	4.47908	10.21414
NHW-4	4.38058	0.30324	0.446634	0.07833	5.75429	4.41248

来源：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

（七）船体病害评估

通过对船体木材保存状态的分析可以看出，船体各部位的木材存在不同程度的糟朽，木材盐分含量较高，主要包括以NaCl为主的可溶盐和以钠铁钒$NaFe_3(SO_4)_2(OH)_6$、黄铁矿FeS_2和针铁矿α-FeOOH为主的难溶盐。

以上是基于已经暴露出来的船体部分的分析，“南海Ⅰ号”船体尚存在大量无法检测到的盲区，如大量埋藏在海泥、凝结物当中的木质船体和船舱深处的内部构件，随着发掘的进展，有待进行深入分析。

三、船体的现场保护

“南海Ⅰ号”发掘现场文物材质多样、器物数量巨大，现场船体的保护不但需要综合考虑各类材质文物之间的相互影响，还要兼顾保护和发掘各工作环节之间的衔接，保护工作要围绕最主要、最紧迫、最突出的问题，以现有技术手段为前提，权衡各类矛盾，寻求解决方案。

饱水木材的全面保护周期十分漫长[7]，而发掘期间船体要经过逐步被清理暴露的过程，由于发掘期间的条件限制，难以对船体开展全面的大规模保护。为此，现场保护工作目标确定为“稳定性保护”，维持船木的饱水状态，控制船木微生物的滋生，维持船体结构的稳定性，在适当的环境控制措施下，延缓船木降解，抑制船木的病害活动。

（一）船体木材清洗

随着发掘工作面的船木逐步被清理暴露，现场保护人员对暴露的船木进行初步清理，利用喷枪散射水流对船木附着的泥沙及时清洗（图7）。对于质地比较松软的船木，使用软毛刷和洗瓶、小喷壶等细弱的水流扫刷、冲洗以去除泥沙。在船木清洗过程中，根据船木状态进行必要的信息采集，如拍照、色差检测、扫描测量、病害记录等。

（二）发掘早期船体木材稳定性保护

发掘早期，暴露出来的船木面积较小，船木在遗址现场的分布也比较分散，船木经过初步清洗后，采用无酸纸或吸水无纺布覆盖并用手动喷壶喷淋药液保湿防腐，“水晶宫”内夏季温度较高，在船木上加盖一层保鲜膜，减缓船木水分蒸发（图8）。

随着发掘的不断深入，船木大面积暴露出来，原有的保湿、防腐方式已经难以满足船木保护需求。为此，改用高雾化喷雾器人工喷淋，喷淋频度为每日2次。高雾化喷雾扬程可达8米，现场保护人员不必进入发掘工作面，在考古平台通道上就可以实现对船木的保湿防腐喷雾操作，降低了操作人员对发掘工作面的人为踩踏扰动，船木上的保湿覆盖物也全部改为吸水无纺布（图9）。

对船木霉菌进行取样检测（表7）后发现，仅喷淋海水做保湿处理的隔舱板，霉菌数量最多，而喷淋防腐保湿液的船木霉菌受到了明显的抑制。

现场保护的工作目标是实现对微生物生长的有效抑制，控制微生物对船木的进一步侵蚀，即“稳定性保护”。由于侵蚀船木的微生物菌群具有多样性，单一的防腐剂并不能杀灭全部威胁木材的有害菌类，况且在开放的潮湿环境下，现有技术条件对微生物很难完全控制，所以采用了5%硼酸+硼砂复配作为抑菌剂。



图7 发掘现场对船木进行初步清洗



图8 船木保湿



图9 高雾化喷雾器喷淋保湿

表7 船木霉菌检测结果

样品	编号	样品描述	检测结果	检测方法
隔舱板	2014NHIT0102	海水保湿处理	1.7×10^5	GB/T13092—2006
船木	2014NHIT0202	防腐剂保湿	2.2×10^3	
隔舱板	2014NHIT0201	防腐剂保湿	2.0×10^4	
船头板	2014NHIT0101	防腐剂保湿	8.0×10^2	

来源：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

（三）发掘间歇期船木防腐保湿及遗址现场保湿

根据发掘计划，每年的5月到10月发掘工作暂时停止，这期间除了持续对船木进行防腐保湿喷淋外，为防止现场淤泥失水干燥开裂引起淤泥层中的文物损坏，还需要对整个遗址进行保湿。为此，专门在遗址上方设计安装了一套用于遗址保湿的高雾化自动微喷灌系统（图10）。

微喷系统工作的原理是，经加压泵和输水总管，将保湿液输送到架设在遗址上方的微喷管网，保湿液通过微喷管上的5口高雾化微喷头雾化后，形成微雾淋洒到遗址土壤（图11、图12、表8）。虽然利用这套微喷系统也可以对船木进行保湿防腐喷淋，但船木喷淋液中有保湿和防腐剂，如果采用这种大面积的喷淋方式，会造成很大的浪费。同时，为降低操作人员对现场船木的扰动，针对船木保湿、防腐，设计、安装了一套独立的自动滴渗系统（图13）。

船木滴渗防腐保湿系统工作原理是，利用小型高压隔膜泵将药液输送到铺设在船木上的滴渗管路（图14），借助滴渗管上密布的微孔，将防腐保湿液

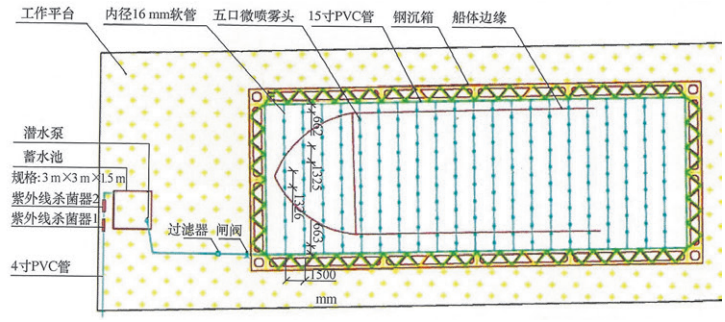


图10 微喷灌系统平面布置图

来源:《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

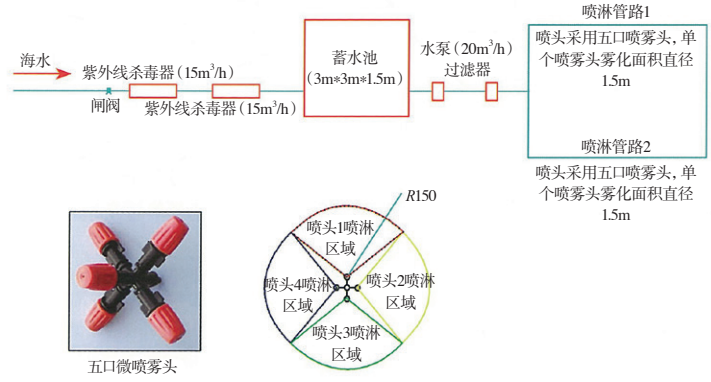


图11 微喷灌系统工作原理图

来源:《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

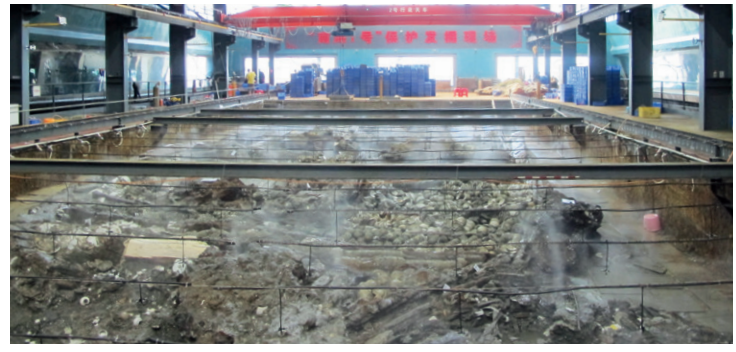


图12 微喷灌系统工作状态

表8 微喷灌系统参数

项目	数据	项目	数据
灌溉面积	12m×33m	喷灌目的	土壤加湿
微喷头	5口可调喷头	喷头流量	5L/min
喷洒直径	1.8m（最大）	喷头间距	1.3m
毛管间距	1.5m	毛管数量	21条
供水方式	双向供水	喷头数量	168只
安装方式	悬挂安装	控制方式	手动
加压泵	离心式3.7kW	加压泵流量	50T/H
过滤器	叠片式	喷灌强度（最大）	300kg/min

缓慢地滴注到船木上。具体做法是，首先根据船木的走向，在船木上覆盖一层吸水性无纺布（图15）作为船木保湿和防护基础层，在该层无纺布上铺设并固定滴渗管，然后在滴渗管上面覆盖黑色塑料膜保湿，每条滴渗管连接至供液总管，通过高压隔膜泵抽取药液储箱的保湿液，输送至供液总管，利用滴渗管的滴渗作用将药液均匀滴渗到船木表面。

（四）自动喷淋系统的建立

当沉船遗址区船体轮廓及隔舱板等主要结构全部揭露出来后，需要保湿的船木面积和现场的水分蒸发量都相应变大，但为避免喷淋造成现场出现过多积水，每次喷淋的液量又不宜过多，只能采用小液量多次喷淋、平均分配喷淋间隔时间的方案。根据上述需求，经过实地调研，决定利用遗址上部的桥式起重机（天车），设计安装一套全自动喷淋装置（图16），该装置由安放在起重机桥架上的喷淋液储存管、喷淋泵、喷淋管路、高雾化喷嘴、自动控制柜组成。喷淋作业有三种操作方式，可现场由操作人员利用遥控器操作控制，也可以通过网络远程控制，还可以采用定时控制方式自动运行。当天车行走到沉船上方不同的区域时，在预先设定好的喷淋启动程序控制下，喷淋头会在电磁阀的控制下自动开启或关闭，完成对指定区域的保湿喷淋（图17）。喷淋天车完成一次喷淋往返需时小于1分钟，操作人员可以根据现场船木水分情况，进行多次往返喷淋操作。该装置的使用提高了保湿防腐作业效率，通过优化喷淋方案——增加喷淋频度、减少每次喷淋药量，现场船木保水状态更加稳定，船木饱水状态因昼夜、季节变化引起的波动情况得到有效控制。

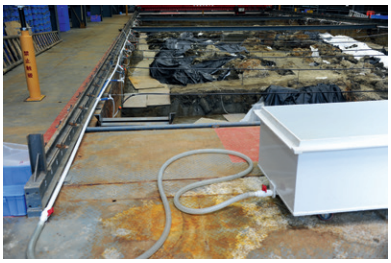


图13 船木滴渗防腐保湿系统



图14 滴渗系统高压隔膜泵及供液管路



图15 船木上覆盖的吸水性无纺布

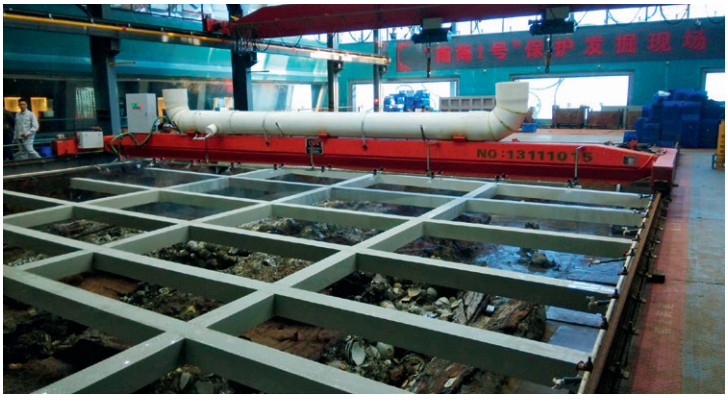


图16 全自动保湿喷淋装置



图17 全自动保湿喷淋装置工作状态

四、保护效果评估

在开展沉船稳定性保护的同时，保护组对船木的保护状态

也开展了一系列监测工作，以检验船体保护实施工作的效果，并根据监测结果预判船体病害的发展趋势，适时调整保护方案。

（一）船木纤维素含量监测

在选取的8个监测点位上进行了4次取样分析，对比分析结果，船体木材纤维素含量处于稳定状态。说明在现有保护条件下，木材的腐蚀降解被有效抑制（表9）。

（二）船木含水率监测

木材含水率监测所需取样的样本数量小，因此监测频度较高，监测结果显示，船木的含水率没有出现大幅波动现象（表10）。根据现场实验，船木含水率的安全范围较宽，含水量即使发生较大幅度的波动，也不会对船木的形稳性造成严重的不可逆影响。

（三）木材阻抗测试

木材阻抗能力是木材阻止外来物体侵入木材内部的能力，木材阻抗数据是反映木材腐蚀降解程度的重要指标。通过测试仪的钻针均匀加力穿入木材内部，同时记录进入木材内部的深度和穿入的阻力曲线，间接判断评估木材内部不同深度部位的硬度、密度、腐朽、空洞、裂隙、虫蛀等状态，从而获得木材结构缺陷、承载力等信息。

木材阻抗实验选择了17个监测点，每月测试一次，连续三个月进行监测，结果显示监测点阻抗数据保持稳定（表11）。但是，从数据的绝对值来看，船木阻抗数据处于较低水平，说明其腐蚀降解严重，需要在后续的保护工作中对船木做加固处理。

表9 船木纤维素含量监测数据

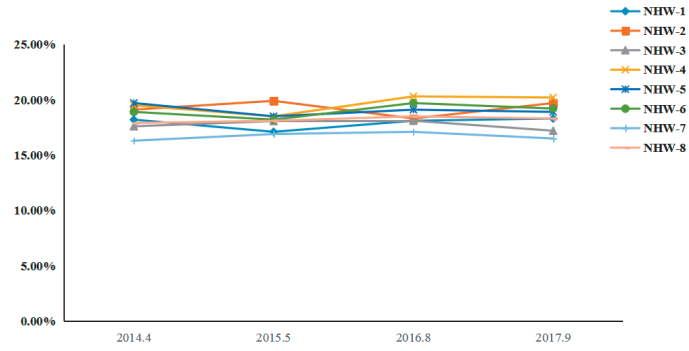


表10 船木含水率监测数据

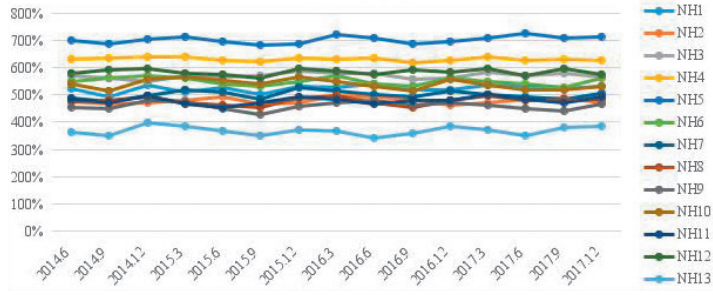
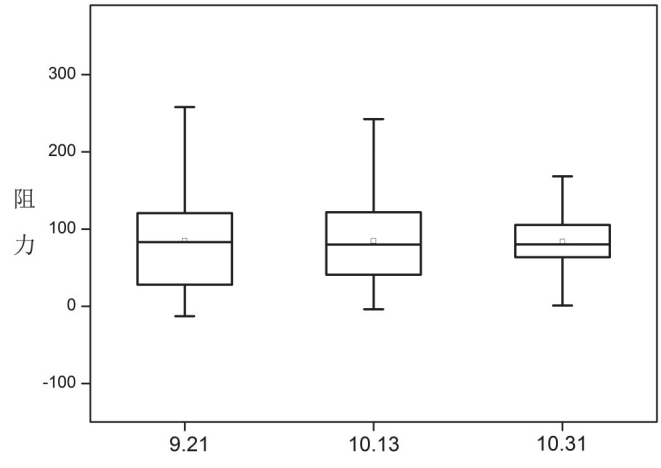


表11 船木阻抗测试数据



来源：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016）》

（四）船木色差监测

色差可以简单地理解为颜色的差别，色差是用色差仪或分光计来检测的，有两种色差数值表达方法，我们选用的是Lab表示法（亮度、红绿、黄蓝）。船木发生降解、有害离子浸润、微生物侵蚀、含水率变化等情况时，都会出现外观上的色度变化。

色差监测选取了6个监测点位，连续监测数据显示，色差偏离曲线，围绕中心线呈波浪状变化，没有出现偏离趋势（表12）。

（五）船木裂隙变化监测

在船木裂隙监测方面，现场选取了较明显的三条裂隙点，使用具有测量功能精度为0.01μm的三维视频显微镜并辅助刻度尺人工测量，持续监测（图18）。这里抽取了2014年12月30日到2016年10月26日的数据。这组数据显示，除了1号监测点因为考古发掘的扰动变化幅度较大外（10mm），2号、3号监测点，裂隙变化幅度均小于1mm，表明船体的形稳性保持良好，裂隙没有显著变化（表13）。

（六）硫铁化合物监测

为掌握“南海Ⅰ号”船木硫铁化合物含量及在保护过程中的变化情况，选定了18个监测点（表14）。监测结果显示，在长达2年的监测周期内，有7个监测点硫铁化合物含量发生了微小幅度的上升。经现场勘查，是由于这几处监测点周围有尚未清理的淤泥和铁质凝结物，铁质锈蚀物的污染导致这几处船木硫铁化合物含量有所上升。其余11个监测点的硫铁化合物含量均有不同程度下降，但大部分为小幅度下降，仅有2个监测点大幅度下降。这说明持续的保湿喷淋对脱除船木硫铁化合物有一定作用，但是脱除效果有限，仅仅通过保湿喷淋，无法彻底脱除木材内部硫铁等有害物质，要在发掘完成后，进行全面综合考虑，制定有效的解决方案。

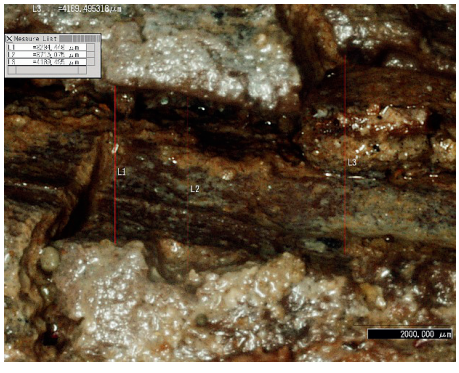


图18　船木裂隙监测显微镜测量

表12　船木色差监测数据

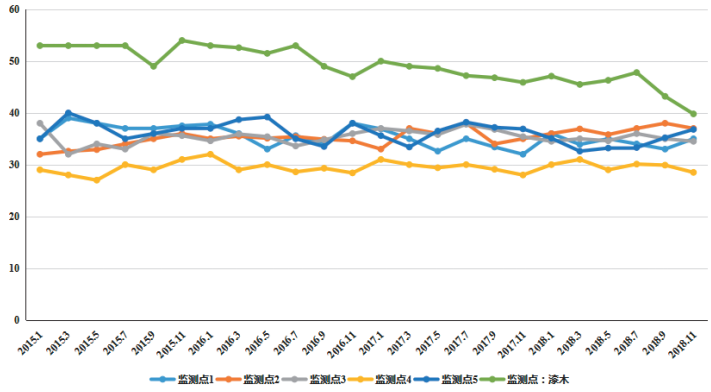


表13　船木裂隙监测数据

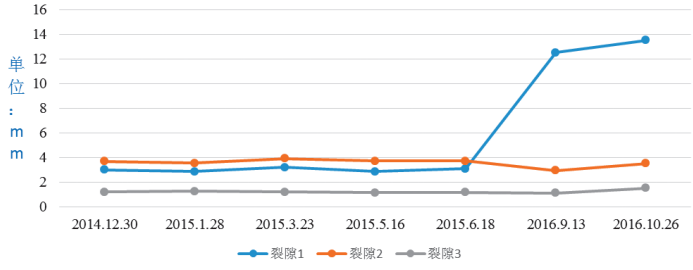
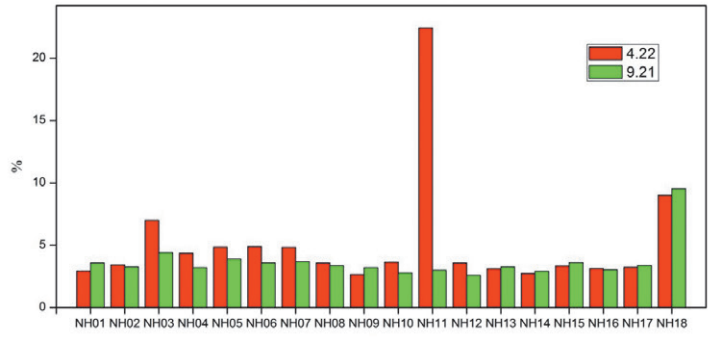


表14　船木硫铁化合物监测数据



（七）船木pH值监测

相关研究表明，木材在酸性及强碱性条件下，纤维素均可发生降解[8]，而中性至弱碱性环境有利于饱水船木的稳定保存。

现场选取的15个监测点数据显示，3个点位呈弱酸性状态，12个呈中性至弱碱性状态（表15）。经现场勘查，3个呈弱酸性点位的船木附近有尚未被清理的铁质凝结物，是铁质锈蚀污染导致了监测点位木材呈弱酸性状态（图19）。

表15 船木pH值监测数据

时间	NH 1	NH 2	NH 3	NH 4	NH 5	NH 6	NH 7	NH 8	NH 9	NH 10	NH 11	NH 12	NH 13	NH 14	NH 15
2016.3	5	7	7	8	6	7	7	4	7	7	4	7	7	6	7
2016.10	5	8	7	7	6	8	7	5	7	7	5	8	7	7	7
2017.3	6	7	7	8	7	7	7	5	7	6	5	7	7	7	6
2017.9	6	7	7	7	6	7	8	4	8	7	6	7	7	8	7
2018.3	5	7	6	8	6	8	7	5	7	7	6	8	6	7	7
2018.10	6	7	7	7	7	8	7	5	7	7	5	7	7	7	8



图19 铁质锈蚀物浸润的船木

（八）船木形稳性监测

影响船体形稳性的因素比较复杂，合适的现场保护手段有助于维持船体的形态稳定，但这并不是决定性因素。由于船体木材糟朽和结构遭到破坏，船体依靠自身的材料强度和结构强度已经难以实现船体形态上的稳定。船体内外沉积的淤泥是维持船体结构稳定的重要物理性支撑，不过随着发掘的进展，淤泥逐步被清除，船体形稳性变差，需要采用必要的辅助支撑维持船体的形稳状态。

考古工作者在船体上选取了6个监测点，每个监测点的船板长度均大于1米。采用三维激光扫描，并将先后不同时间点的三维激光扫描模型进行叠加比对，测算船体构件及构件之间相对的位置和尺寸变化，通过数据比对评估船体的形稳状态。

扫描模型的叠加对比显示所监测的区域位移变化在±1mm以内波动，考虑到发掘造成的扰动等因素，各监测区域的船体构件没有明显形变。

（九）微生物病害控制监测

为验证船木防腐效果，在现场选取了3个实验点，在喷淋防霉保湿剂时将其遮挡起来，仅以清水进行喷淋保湿。大约2周后，实验区就有菌丝生长现象（图20），之后恢复喷淋防霉剂，木材表面霉菌明显消退。取样进行细菌培养实验的结果显示，微生物种群发生明显变化，对船木威胁较大的镰刀菌已不再是优势种群，目前处于优势地位的杂色霉菌对船体木材的威胁较小，说明现有微生物防治方案取得了良好效果。



图20 未做防腐喷淋的空白试验区船木表面滋生的霉菌

五、结语

对“南海Ⅰ号”船体木材保存状态的检测和保护效果监测评估显示船体木材保存状态较差，纤维降解严重、强度下降明显，船木内硫、铁、盐含量很高，并存在微生物大量滋生的风险，需要在未来的全面保护中综合处理，并进行脱盐和填充置换加固；开放式发掘方式使船体长期暴露于环境空气中，高氧的室内环境不利于船体的长期保存；在当前的现场保护措施下，船体木材保存尚处于可控状态。

“南海Ⅰ号”沉船的保护无论是在时间跨度还是工作量上，都是一个巨大的工程，需要多个单位相互协作共同完成。就具体的工作任务分解、人力和技术资源投入、工作制度完善，以及面临的技术瓶颈问题，都需要在工作中不断探索，逐步解决。考古发掘现场的文物保护工作日益受到重视，“南海Ⅰ号”保护发掘项目是践行这种理念的典型工作范例，现场保护组与考古组密切合作，确保了“南海Ⅰ号”发掘现场文物保护工作有序开展。

考古发掘完成后，在船体稳定性保护的基础上会逐步过渡到全面保护阶段。关于“南海Ⅰ号”船体的全面保护，首先要搭建一套船体的稳定性支撑结构，并建立大型循环水喷淋或循环水池脱盐、填充加固系统，脱除木材中的有害离子并对其进行脱水填充加固。通过对船体进行必要的修复，恢复部分破坏的船体结构，加固船体主体结构部分的强度。同时，为满足展示的需要，有计划、分批次地开展系统性保护修复工作，使宝贵的文物资源得到充分研究和展示利用。

注释

[1] 李乃胜、陈岳、沈大娲：《“南海Ⅰ号”沉船发掘现场保护研究（2014～2016》），科学出版社，2018年，第11页。国家文物局水下文化遗产保护中心、广东省文物考古研究所、中国文化遗产研究院，等：《南海Ⅰ号沉船考古报告之二——2014～2015年发掘》，文物出版社，2018年，第19页。

[2] 国家文物局水下文化遗产保护中心、广东省文物考古研究所、中国文化遗产研究院，等：《南海Ⅰ号沉船考古报告之二——2014～2015年发掘》，文物出版社，2018年，第21页。

[3] 于群力、杨秋颖：《文物病害与保存环境》，《文博》2005年第1期。

[4] 国家文物局水下文化遗产保护中心、广东省文物考古研究所、中国文化遗产研究院，等：《南海Ⅰ号沉船考古报告之二——2014～2015年发掘》，文物出版社，2018年，第22—23页。

[5] 沈大娲、葛琴雅、杨淼，等：《海洋出水木质文物保护中的硫铁化合物问题》，《文物保护与考古科学》2013年第1期。

[6] 沈大娲、葛琴雅、杨淼，等：《海洋出水木质文物保护中的硫铁化合物问题》，《文物保护与考古科学》2013年第1期。

[7] 张治国、李乃胜、田兴玲，等：《宁波“小白礁Ⅰ号”清代木质沉船中硫铁化合物脱除技术研究》，《文物保护与考古科学》2014年第4期。

[8] 刘一星、赵广杰主编：《木材学》，中国林业出版社，2012年，第93页。