

# “小白礁 I 号”沉船部分木质文物微生物病害观察与损伤评估

高梦鸽<sup>1</sup>, 张勤奋<sup>1</sup>, 金涛<sup>2</sup>, 罗鹏<sup>2</sup>, 李权<sup>1</sup>, 徐润林<sup>1</sup>

(1. 中山大学生命科学学院, 广东广州 510275; 2. 宁波市文物考古研究所, 浙江宁波 315010)

**摘要:** 为掌握宁波“小白礁 I 号”古沉船船体结构的状况, 以及为该沉船的后续保护提供科学依据, 本研究利用光学显微镜和电子显微镜技术, 在显微和亚显微水平上观察了该沉船部分木质文物的组织和细胞结构。观察分析发现, 对该沉船木质文物有较大影响的微生物主要是侵蚀细菌(Erosion bacteria, EB)和钻管细菌(Tunneling bacteria, TB); 借助文献提供的标准, 评估了该沉船不同部位木质文物的结构现状及不同备检样品中的细菌的侵蚀程度。评价结果表明沉船木质文物的侵蚀情况从轻度到完全损坏程度不同。本研究也分析了导致木质文物损伤程度差异的原因, 并根据分析结果就该沉船木质文物保护涉及的生物学问题提出了建议。

**关键词:** 古沉船; 小白礁 I 号; 病害细菌; 显微技术; 文物保护

**中图分类号:** K854.2 **文献标识码:** A

## 0 引言

木质文物是人类古代文明的重要载体之一。与其他文物一样, 木质文物也是研究古代不同时期历史、艺术、科技和经济发展的宝贵实物资料。但木质文物既珍贵又脆弱, 是一种不可再生的、具个性化的文物资源<sup>[1]</sup>。随着水下考古技术的提高, 中国越来越多的沉船被发现和发掘。古代沉船的主要构件都是各种木材。木质文物的基本结构单位是高等植物细胞, 具有复杂的细胞壁结构是植物细胞的特点之一。

早在 20 世纪中叶, 西方学者就应用生物学理论来评估各类文物的保存状况, 并以此为依据来完善文物的保护措施。对水下木质文化遗产的分析和保护, 国际上已有很多相关的研究, 针对病害微生物的侵蚀特征以及对细胞壁不同成分的侵蚀速率的差异也已有阐述。

一般而言, 微生物是个体细小、原核或真核的、具完整细胞结构或部分结构缺失的一类生物体, 它包括原核的病毒、细菌、真核的真菌和单细胞动植物。真菌、部分细菌和部分单细胞动物只能生活在有氧环境中; 部分细菌和部分单细胞动物可生活在厌氧环境中。由于水环境以及木质材料内部结构的特殊性, 能够侵蚀到水下木质文物内部的微生物只

能是细菌。已有的研究显示危害水下木质文物的细菌主要有 3 大类型, 它们分别是侵蚀细菌(Erosion bacteria, EB)、钻管细菌(Tunnelling bacteria, TB)和空化细菌(Cavitation bacteria, CB), 其中的侵蚀细菌和钻管细菌较为常见<sup>[2]</sup>。EB 会在植物细胞壁光滑的内腔表面形成侵蚀沟槽; TB 可分解植物细胞壁的多糖和部分木质素, 导致木质文物变软及颜色变深; 而 CB 可导致细胞壁的空腔化<sup>[3]</sup>。

评估细菌对木质文物的腐蚀程度对于文物发掘方案的形成及后续保护措施的提出有极为重要的意义, 同时对评价已处于收藏状态下文物的保护措施是否科学合理也具重要的现实意义<sup>[4]</sup>。

随着我国经济总量和水下文物保护技术的提升, 各地陆续发现并开始发掘了多条古沉船。对于水下木质文物(包括船体和木质船载物)状况, 虽然国内有了利用理化手段分析和评判的实例<sup>[5-10]</sup>, 但针对木质文物基本结构的分析并不多见。

“小白礁 I 号”沉船是一艘以龙骨和肋骨为主要纵横构架的尖底木质海船, 沉没于清代道光年间(公元 1821 ~ 1850 年)。该沉船是在浙东海域首次通过水下考古手段发现的第一艘具有较高文物价值的古沉船, 为探索清代晚期中外贸易史和近代海外交通史提供了重要的实物资料。“小白礁 I 号”沉

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-11-14

基金项目: 国家文物局水下遗产保护专项科研课题资助(2013-538)

作者简介: 高梦鸽(1988—), 女, 2016 年硕士毕业于中山大学动物学专业, 研究方向为生态学, E-mail: gao101715@163.com

通讯作者: 徐润林, E-mail: xurunlin\_1960@yahoo.com

船遗址所在海域水深 18 ~ 22m, 遗址散布在长约 23m、宽约 11.2m 的范围内<sup>[11]</sup>。

本研究旨在利用结构生物学中最常用的电子显微镜及普通光学显微镜技术, 展示“小白礁 I 号”不同部位船板木质结构的显微以及亚显微结构, 从内部揭示木质文物细胞壁的受损状况, 并结合有关标准, 评估这些木质文物的现存状况, 为“小白礁 I 号”保护措施的设计提供重要的参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

2014 年 7 月 ~ 8 月间, 从出水的“小白礁 I 号”沉船不同位置的船板处取样, 包括船体松软和坚硬的部分。经初步切片鉴定, 本研究涉及的材种包括榄仁木 (*Terminalia* sp.), 五瓣子楝 (*Decaspermum parviflorum*)、龙脑香木 (*Dipterocarpus* sp.) 和纤细龙脑香 (*Dipterocarpus gracili*)。采样位置选择在每块备检船板距两端 10 ~ 20cm 的区域内。取样时, 在采样区域表面下 1 ~ 3cm 处取 2cm × 2cm × 3cm 大小的样块; 获取的样品保存于 -4℃ 的冰箱中, 以备进行制样和镜检。

### 1.2 样品制备

本研究涉及 3 种不同的观察手段, 包括光学显微镜 (Light microscope, LM)、透射电子显微镜 (Transmission electron microscope, TEM) 和扫描电子显微镜 (Scanning electron microscope, SEM)。每种观察手段所用的样品制备方法不同。

1) 用于透射电镜观察的样品制备。从各备检样块的不同平面切取大约 1mm 厚度的小薄片; 用单面刀片将小薄片切成 1mm<sup>3</sup> 左右的小样块; 将该小样块浸泡于由 3% 戊二醛和 5% 多聚甲醛混合的固定液中, 并进行抽真空处理, 以排除样品内的空气从而使固定液更易浸润进入整个样块内部<sup>[12]</sup>; 固定后的样块经 0.1% 磷酸缓冲液 (PBS) 冲洗后, 再用 1% 四氧化锇进行二次固定, 后经乙醇梯度脱水、渗透和环氧树脂包埋<sup>[13]</sup>; 利用 Leica EM UC7 (德国产) 超薄切片机对包埋块进行切片; 超薄切片厚度为 90 ~ 100nm; 用铜网捞片后再用醋酸铀和柠檬酸铅进行染色<sup>[14]</sup>。

2) 用于扫描电镜观察的样品制备。从各备检样品上切取 3mm × 4mm × 5mm 大小样块进行固定, 固定方法同透射电镜样品; 样品处理至 100% 乙醇梯度脱水后, 用叔丁醇进行置换<sup>[15]</sup>; 样品经 JFD - 320 冷冻干燥仪 (日本产) 冷冻干燥 4h 后再行贴台和喷金处理。

3) 用于光镜观察的薄切片制备。为了解样品

整体的受侵蚀情况, 本研究对部分侵蚀特征明显的样品, 用超薄切片机切至 1 ~ 2μm 的薄片, 染色后置于普通光学显微镜下观察<sup>[16]</sup>。

### 1.3 镜检

透射电镜的观察使用 JEOL (日本产) 100kV JEM - 100CX II 透射电子显微镜; 扫描电镜观察使用 JEOL (日本产) JSM - 6330F 冷场发射扫描电子显微镜; 光学观察用 Nikon E800 (日本产) 光学显微镜。观察时分别对观察结果进行拍照记录。

## 2 结果

### 2.1 “小白礁 I 号”沉船木质文物的主要病害微生物

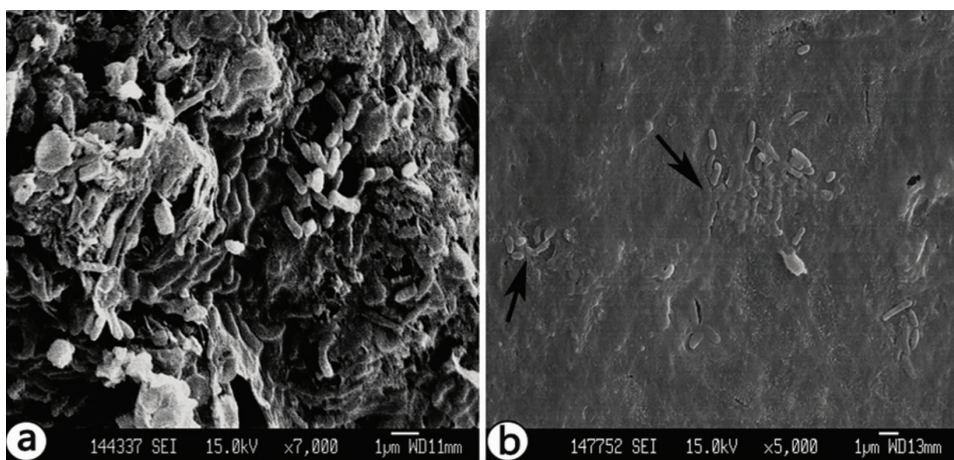
通过光镜和电镜的观察可以发现: “小白礁 I 号”沉船木质文物中, 绝大部分备检样品的植物细胞不同程度地受到了微生物的侵蚀; 所观察到的微生物均为细菌 (图 1)。电镜观察后确定所发现的细菌为 EB 和 TB。

### 2.2 各备检木质样品植物细胞结构的损伤状况

图 2 ~ 5 分别是“小白礁 I 号”沉船不同位置船板的显微及亚显微结构。由于不同样品的损伤存在差异, 其显微和亚显微结构也存在较大差异。

图 2 显示了编号为 2014XBJ:SW1 和 2014XBJ:SW2 样品中植物细胞的结构。结果显示这两块船板的木材细胞相对完整, 虽然由于长期受海水浸泡, 切片上部分细胞的细胞腔层与细胞壁层发生了分离, 但细胞壁各层以及细胞之间的连接依然较完整 (图 2(a)); TEM 下导管的 T 状穿孔板清晰可见 (图 2(b))。同时, 在光镜下可以看到横切面上导管, 薄壁细胞及射线细胞排列完整有序, 细胞壁层也清晰可辨 (图 2(c)); 射线细胞的双折射现象也明显能被观察到 (图 2(d))。

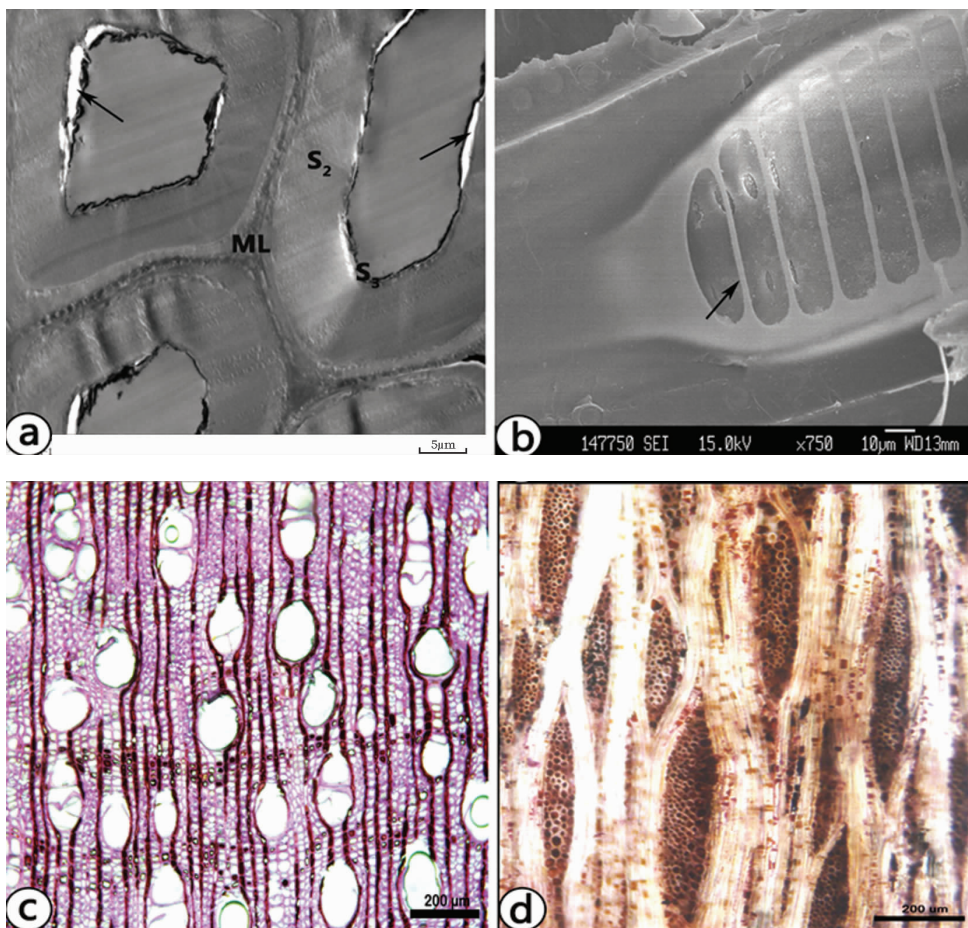
图 3 显示了编号为 2014XBJ:S70、2014XBJ:S72 和 2014XBJ:S77 样品的显微和亚显微结构。从图 3 (a) 可见射线细胞的胞腔内充满了黑色的侵蚀残渣, 有些受侵蚀细胞的 S<sub>3</sub> 层隐约可见, 但 S<sub>2</sub> 层已被完全破坏, 与周围的细胞相比, 受侵蚀细胞的细胞壁明显显得单薄。然而, 在细胞内部发生变化的同时, 细胞外部也出现了一些损伤痕迹, 胞间层也开始发生降解 (图 3(b) 和 3(c)), 并在细胞间出现明显的相互分离 (图 3(d))。在这一阶段, 虽然细胞已出现明显损伤, 但细胞层在整体上仍保持比较完好的状态, 细壁层次明显且连接紧密, 只是次生壁与中胶层间出现了分离, 彼此间仅剩细小的微纤丝相连 (图 3(e) 和 3(f))。



- (a) SEM 显示编号为 2014XBJ:S28 文物上有大量细菌集聚在细胞的内部和表面,细胞层已经被菌体和侵蚀形成的残渣所取代  
 (b) SEM 显示的编号为 2014XBJ:S41 文物的导管内壁上细菌菌落(黑色箭头)

图 1 “小白礁 I 号”沉船木质文物中的细菌

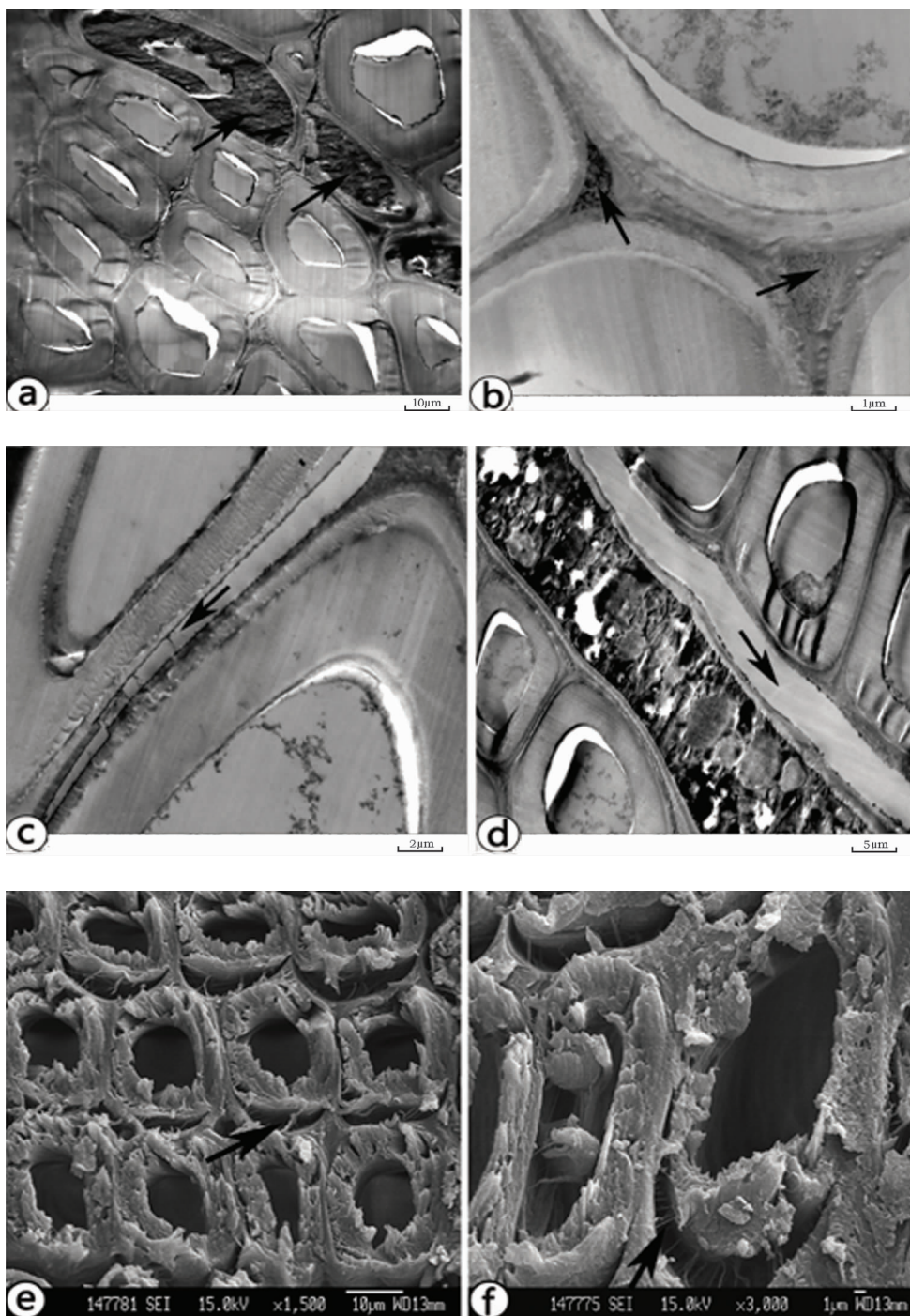
Fig. 1 Bacteria in the wooden relics of the “Xiaobaijiao No. 1” shipwrecks



- (a) 样品 2014XBJ:SW1 横切面的 TEM 照片,显示细胞整体保持完整,胞壁各层饱满且胞间连接紧密,仅在细胞腔层与细胞壁层发生了少许分离(箭头所示)  
 (b) 样品 2014XBJ:SW2 纵剖面的 SEM 观察,箭头所示为导管的 T 状穿孔  
 (c) 样品 2014XBJ:SW2 横切面的 LM 观察,显示了导管、射线和薄壁细胞均清晰可辨,且形态完好  
 (d) 样品 2014XBJ:SW1 弦切面的 LM 观察,显示了射线的双折射现象

图 2 “小白礁 I 号”沉船木质文物中受轻度损伤的细胞结构

Fig. 2 The cellular structure of light damage in wooden cultural relics from the “Xiaobaijiao No. 1” shipwrecks



- (a) 样品 2014XBJ:S77 横切面的 TEM 观察,示部分射线细胞的 S2 层被黑色侵蚀残渣填满(黑色箭头)
- (b) 样品 2014XBJ:S72 横切面的 TEM 观察,示细胞角落处发生了变化(黑色箭头),胞间的连接正在变化
- (c) 样品 2014XBJ:S72 横切面的 TEM 观察,示胞间连接的果胶质已降解(黑色箭头),细胞正在发生相互分离
- (d) 样品 2014XBJ:S70 纵切面的 TEM 观察,示纤维细胞一侧的中胶层与周围细胞已分离,两种细胞的间隙变大(黑色箭头)
- (e) 样品 2014XBJ:S72 横切面的 SEM 观察,示细胞次生壁与中胶层发生了分离(黑色箭头)
- (f) 样品 2014XBJ:S72 横切面的 SEM 观察,明显可见次生壁与中胶层之间的纤维细丝(黑色箭头)

图 3 “小白礁 I 号”沉船木质文物中受中度损伤的细胞结构

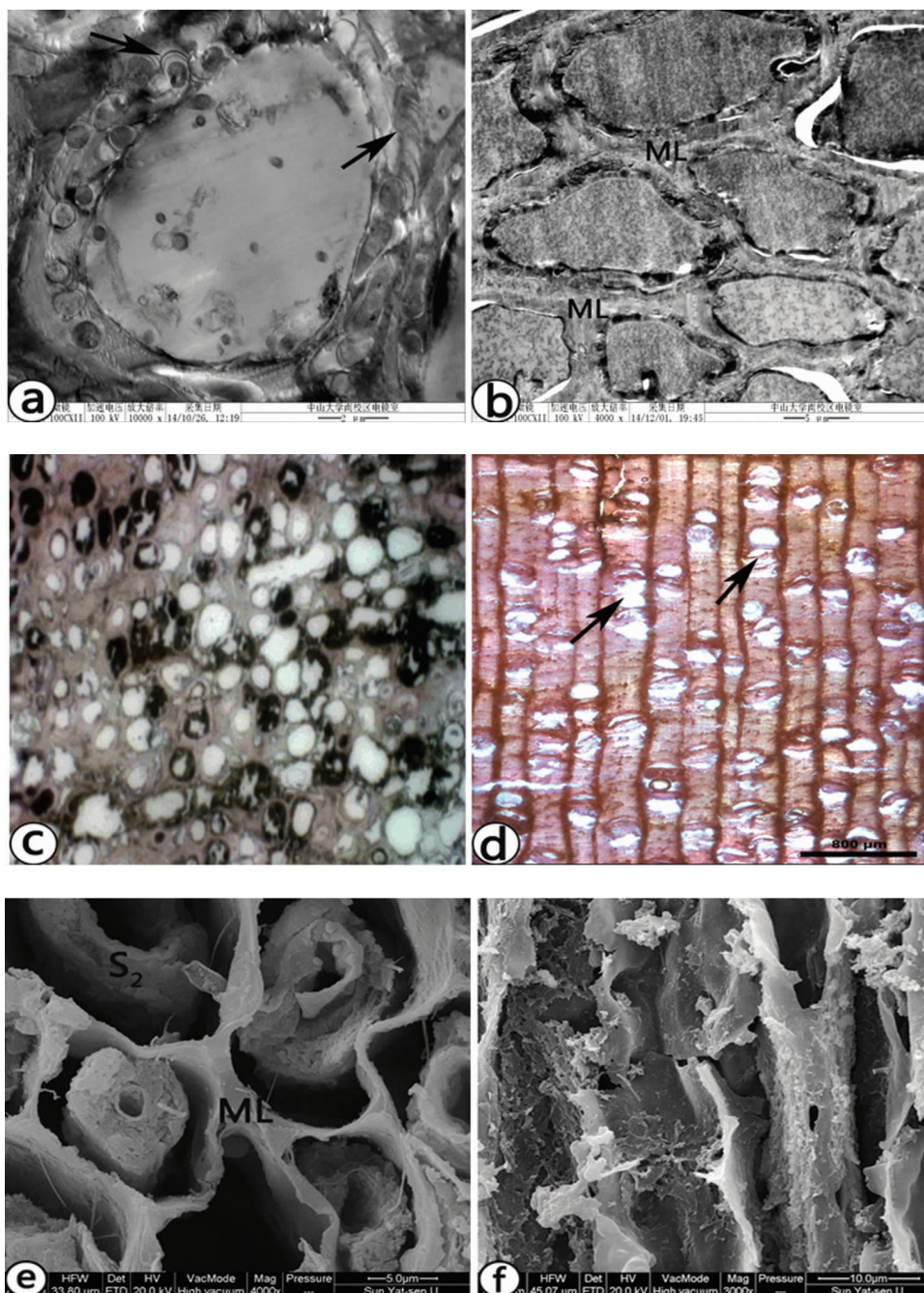
Fig. 3 The cell structure of moderate damage in wooden cultural relics from the “Xiaobaijiao No. 1” shipwrecks

图 4 显示了编号为 2014XBJ:S45、2014XBJ:S64 和 2014XBJ:S75 样品的显微和亚显微结构。结果表明:TB 对细胞的攻击已扩展到细胞壁的各

层面,胞壁上的侵蚀通道正在累积(图 4(a));当整个细胞壁只剩下中胶层作支撑的时候,胞壁就变得不稳定,易形变(图 4(b))。LM 下可见此时

的整个木材组织受蚀不均匀,较完整细胞和严重受损细胞呈交替分布(图 4(c));同时,尽管导管尚未呈大的受蚀,但由于周围细胞受损严重,导致了整个细胞层对水的吸收量增加,导管难以维持

原状而显得扭曲(图 4(d))。SEM 显示出细胞横截面的 S<sub>2</sub> 层与中胶层已完全分离,细胞扭曲单薄(图 4(e)),在纵剖面上,细胞也趋于破碎和裂解(图 4(f))。



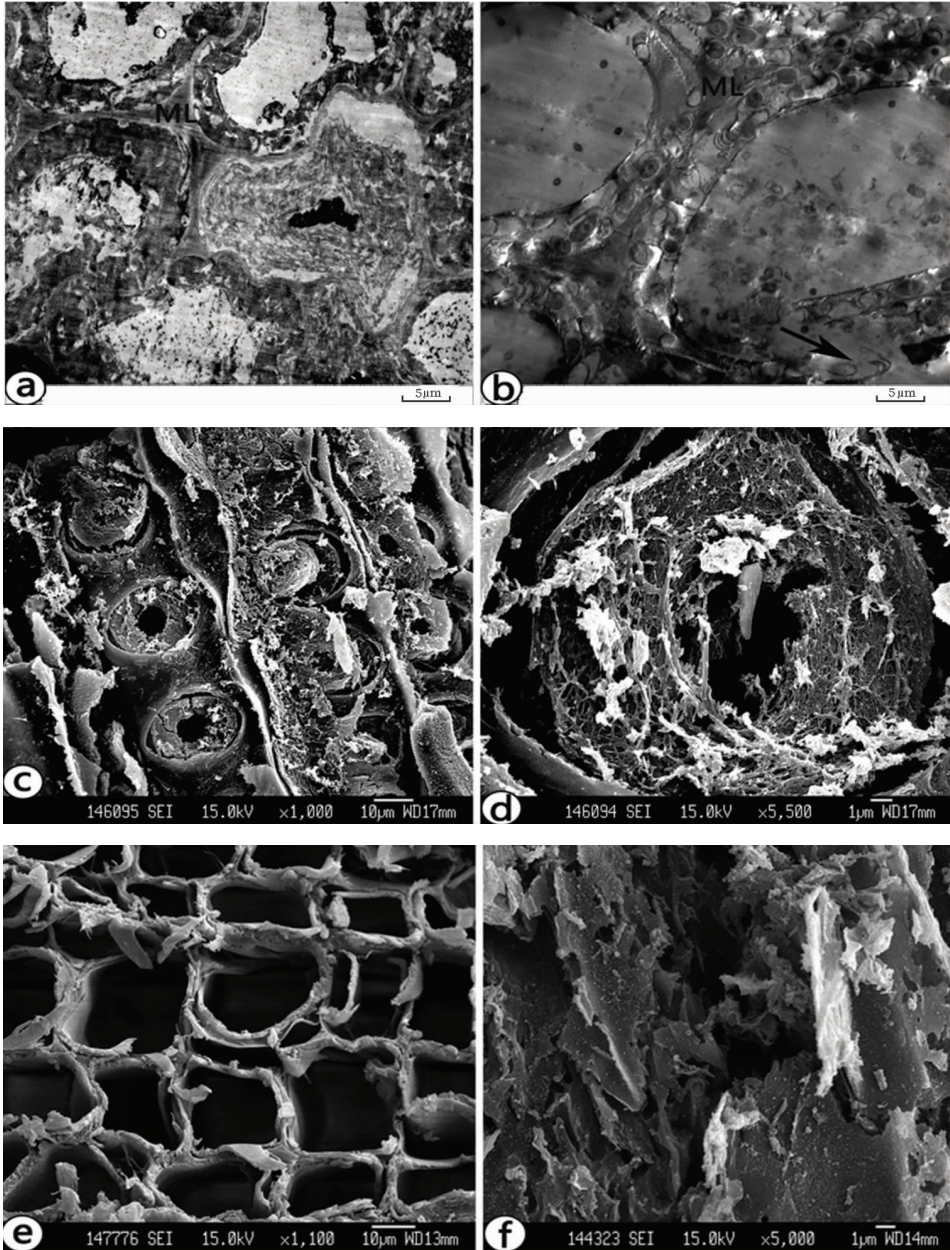
- (a) 样品 2014XBJ:S75 横切面的 TEM 观察,示细胞壁正受细菌的降解,可见细胞壁的各层均有侵蚀模式(黑色箭头)  
 (b) 样品 2014XBJ:S45 横切面的 TEM 观察,示细胞内部受损严重,整个细胞壁仅剩中胶层相连,细胞已发生了形变  
 (c) 样品 2014XBJ:S45 横切面的 LM 观察,示受损严重且呈黑色的细胞,以及与相对完整细胞的相互交错排列  
 (d) 样品 2014XBJ:S45 横切面的 LM 观察,示整个细胞层扭曲以及导管(黑色箭头)均发生形变和破裂  
 (e) 样品 2014XBJ:S64 横截面的 SEM 观察,示细胞壁的 S<sub>2</sub> 层与中胶层分离,细胞壁扭曲  
 (f) 样品 2014XBJ:S64 纵剖面的 SEM 观察,示细胞已趋于粉碎化并有断裂出现

图 4 “小白礁 I 号”沉船部分受损严重木质文物的细胞结构

Fig. 4 The cellular structure of severely damaged wooden cultural relics from the “Xiaobaijiao No. 1” shipwrecks

图 5 显示的是编号为 2014XBJ:28、2014XBJ:S75 和 2014XBJ:SW4 样品的显微及亚显微结构。从这几个样品看,随着侵蚀的加剧,大量的植物细胞均出现了严重受损的状态,加上海水的浸泡以及其他环境因子的影响,造成细胞的形变甚至断裂(图 5(a));同时 TB 的深层侵蚀使细胞壁的任何成分都发生降解,最终导致细胞壁出现断裂和坍塌的现象

(图 5(b))。SEM 显示射线细胞的中胶层包含着细菌的侵蚀残渣(图 5(c)和 5(d))。相对应的,样品横切面 LM 的观察也显示出细胞仅剩下中胶层的部分维持整个细胞的形态(图 5(e));损伤更严重的则可见整个细胞层由于细菌的完全入侵而出现多孔和断裂,细胞类型已无法分辨,细胞整体上显得松软破败(图 5(f))。



(a) 样品 2014XBJ:S28 横切面的 TEM 观察。细胞整体已呈模糊,细胞间部分中胶层隐约可见。

(b) TEM 显示的样品 2014XBJ:S75 横切面细胞壁的中胶层受到破坏,细胞壁出现断裂和坍塌(黑色箭头)。

(c) SEM 显示的样品 S2014XBJ:S28 弦截面上严重受损的射线细胞。

(d) SEM 显示的样品 S2014XBJ:S28 弦截面细胞 S2 层已呈蜂窝状。

(e) SEM 显示的样品 S2014XBJ:S40 横截面上呈网状的中胶层。

(f) EM 显示的样品 S2014XBJ:S40 纵剖面细胞层已变得松软和多孔。

图 5 “小白礁 I 号”沉船部分完全瓦解的木质文物的细胞结构

### 2.3 “小白礁 I 号”沉船木质文物损伤的评估

Klaassen<sup>[17]</sup>提出过对水下木质文物损伤各项指标、木材的受损伤状况以及评判标准。在此体系中他将木材细胞的损伤程度分为4个阶段:

1)轻度损伤:从光镜下的各个切面几乎都看不出受破坏的痕迹,即使在电镜下也观察不到细胞有明显的变化。2)中度损伤:有一些细胞壁上已显现出明显的受损特征,但其周围的细胞依然保持完好。细胞层整体上依然维持良好状态。3)重度损伤:大

部分细胞的细胞壁都明显表现出与正常细胞的不同。光镜下绝大多数细胞的细胞壁层次已分辨不出,电镜下中胶层和部分细胞的 $S_3$ 层依然存在,但整体细胞结构框架保持完整。4)完全瓦解:细胞壁的各层都受到严重侵蚀,包括中胶层和次生细胞壁的 $S_3$ 、 $S_1$ 层,并且部分细胞呈现形变,扭曲,甚至断裂,坍塌的趋势。

依据这一评判标准,对受检的“小白礁 I 号”沉船木质文物现存状况的评估结果见表1。

表1 “小白礁 I 号”沉船受检木质文物的损伤状况

Table 1 The damage conditions of the inspected wooden cultural relics from the “Xiaobaijiao No. 1” shipwrecks

受检样品编号	文物编号	材质种类	损伤程度
2014XBJ;SW1	垫板3	榄仁木( <i>Terminalia</i> sp.)	轻度
2014XBJ;SW2	垫板7	榄仁木( <i>Terminalia</i> sp.)	轻度
2014XBJ;S31	肋东22	龙脑香木( <i>Dipterocarpus</i> sp.)	中度
2014XBJ;S75	壳西12/13下-2	纤细龙脑香( <i>Dipterocarpus gracili</i> )	中度
2014XBJ;S70	壳东3下-2/2	纤细龙脑香( <i>Dipterocarpus gracili</i> )	中度
2014XBJ;S72	壳东5下-1/4	纤细龙脑香( <i>Dipterocarpus gracili</i> )	中度
2014XBJ;S77	壳西14下-2/3	纤细龙脑香( <i>Dipterocarpus gracili</i> )	中度
2014XBJ;S22	肋东补14	龙脑香木( <i>Dipterocarpus</i> sp.)	中度
2014XBJ;S41	壳西2-1/2	五瓣子楝( <i>Decaspermum parviflorum</i> )	重度
2014XBJ;S45	壳西3-3/5	五瓣子楝( <i>Decaspermum parviflorum</i> )	重度
2014XBJ;S64	壳西10-3/4	五瓣子楝( <i>Decaspermum parviflorum</i> )	重度
2014XBJ;S28	肋东19	五瓣子楝( <i>Decaspermum parviflorum</i> )	完全受损
2014XBJ;S40	壳西1-1/2	五瓣子楝( <i>Decaspermum parviflorum</i> )	完全受损

## 3 讨论

### 3.1 沉水木质文物的微生物腐蚀

对于水下木质文物的腐蚀原因与机理,国内长期以来并没有系统研究和报道。自从科技考古和文物保护生物学的兴起,20世纪的后半叶,欧美一些国家开始关注到了水下木质文物腐蚀中的微生物学问题。经过几十年的研究,对于沉水木质文物的微生物腐蚀,国际上已取得了一大批的成果,包括引起木质文物腐烂的微生物类群以及它们的作用过程和机理。无论在何种类型的木材中,所发现的EB的出现往往与这些木材的薄壁组织相关。细菌被发现集中在木质部的射线<sup>[18]</sup>、树脂道和其他薄壁细胞中<sup>[19]</sup>。最终由这些薄壁组织细胞转向周围其他组织细胞<sup>[20]</sup>。在本研究中也发现了细菌的类似现象。

虽然高等维管植物的木质部基本结构都类似,但不同种类植物间还是存在一些差异,这些差异也势必会影响细菌的侵蚀。在双子叶植物中,EB往往首先会出现在射线细胞中,对其中的贮存物进行分

解,有研究发现EB对射线细胞壁的攻击主要是针对细胞中的纤维素<sup>[21]</sup>。另外,由于胞间层主要成分果胶很容易被细菌分泌的果胶酶酶解,因此,人们也发现在部分细胞间的胞间层和细胞角落处的成分也发生了降解,从而引起细胞间的分离。细菌的纤维素酶和果胶酶系统被认为在木材的结构变化中起巨大作用<sup>[22]</sup>;细菌纤维素酶能够改变木材的渗透性,破坏纤维素的晶状体结构,为纤维素酶的扩散提供良好的基础<sup>[23]</sup>;细菌果胶酶可以降解具缘纹孔的纹孔膜,造成该膜的完全降解<sup>[24]</sup>。在细菌的侵蚀走向上,一般认为侵蚀由细胞腔开始,随后向外层细胞壁扩展<sup>[20]</sup>。Wilcox<sup>[27]</sup>发现植物胞壁各层对细菌侵蚀的抵抗性有着较大差异,木质素含量较高的胞壁层具有较强的抵抗性。依木质素的含量多少,植物细胞壁各层中中胶层 $>S_3 > S_1 > S_2$ <sup>[28]</sup>。根据这一规律,由于 $S_1$ 层和 $S_2$ 层对细菌侵蚀的抵抗力相对较弱,因此高木质素含量的中胶层有时会与 $S_3$ 层一起成为整个细胞壁的最终支撑力<sup>[15]</sup>。这些学术上的

发现对于解释本研究中出现的、来自不同树种木质文物间细菌侵蚀产生的后果存在一定意义。

在细菌侵蚀类型上, TB 是具有特殊分解木质素能力的一类细菌, 它们通过降解胞壁中某部分物质, 穿透到胞壁内部并通过形成特殊的通道对细胞壁进行攻击, 最终扩散到包括木质素含量高的中胶层在内的胞壁的各结构层<sup>[4]</sup>。Nilsson<sup>[25]</sup> 以及 Singh 等<sup>[15]</sup> 曾观察到 TB 的渗透极限是距离木材的最外层 1cm 左右。在传播扩散中, TB 必须依靠水环境的作用, 或依靠协同效应使多种酶在细胞壁上进行渗透<sup>[22]</sup>。由于 TB 的活动需要有少量溶解氧, 因此, 这类细菌在某个水下木质文物中的出现, 在一定程度上也反映了该文物在水下并没未被沉积物完全掩盖<sup>[26]</sup>, 进而沉积物覆盖以保护木质的作用没有显现, 木质文物被侵蚀的速度更快。细菌侵蚀对木材性能最普遍的影响就是大大增加了木材的多孔性和渗透性<sup>[29]</sup>。细菌的侵蚀速度虽然比较缓慢, 但随着时间的增加, 它们能够显示出极强的破坏力。最终, 它们能够将细胞的 S<sub>2</sub> 层完全掏空, 只留下单薄的中胶层支撑着整个细胞结构<sup>[28]</sup>。从本研究涉及的 13 个样品的显微与亚显微结构看, 上述的这些现象在“小白礁 I 号”沉船木质文物中均有所体现。

### 3.2 “小白礁 I 号”沉船部分木质文物损伤程度的差异

虽然本研究中涉及的所有样品均是同时期采自沉船, 且沉船的所有木材也应是同步沉入水中, 在水下的大环境也应基本一致, 但比较本研究涉及的 13 份木质文物样品, 可以发现在宏观层面上, 有的样品依然保持较坚硬的状态; 也有部分样品较脆弱, 含水量大, 稍用力按压即碎裂。在微观结构上各样品间也存在不小的差异。导致这些差异的原因有几种可能: 1) 不同的样品来自不同的树种, 而不同树种木质部对细菌侵害的抵抗力存在差异; 2) 局部微环境的差异也是一个重要的影响因素。由于船体上层和船舷部分未被泥沙掩盖, 长期浸泡在溶解氧含量较高的海水中, 裸露的船体表面极易受到各种病害动物, 如船蛆和水虱等的直接破坏<sup>[30]</sup>; 加上有氧环境可促使好氧菌的大量生存, 而好氧菌的腐蚀能力远比厌氧菌高<sup>[31]</sup>。对于被泥沙覆盖的沉船部分, 由于泥沙的阻隔, 使得病害细菌不易直接破坏木质文物, 同时这种阻隔也隔离了海水流动带来的溶解氧。虽然泥沙间的间隙水与沉船的文物仍有接触, 但间隙水中的溶解氧含量是很低的, 不能满足好氧菌的需要<sup>[32]</sup>。可以说这种环境基本上是厌氧环境。虽然

厌氧菌也需要利用木材的纤维素作为碳源和能量来源, 但其分解和利用的效率较好氧菌低得多。正是这些原因的叠加, 导致了沉船不同部位木质文物的腐蚀程度存在较大的差异。

## 4 结论与展望

对取自“小白礁 I 号”沉船木质文物样品光镜水平下所观察到的微生物均为细菌; 进一步在亚显微水平电镜下观察后, 确定所发现的细菌为侵蚀细菌(EB)和钻管细菌(TB)。观察发现: 绝大部分备检样品的植物细胞不同程度地受到了微生物的侵蚀。木材细胞损伤的 4 个阶段均有出现, 其中榄仁木的垫板为轻度损伤; 龙脑香木和纤细龙脑香木质受到中度损伤; 而五瓣子楝木质的损伤程度则为严重和完全受损。其损伤机理和表现与国外同类研究结果相似。

从本研究以及结合国外类似报道可以看到, 对沉船等木质文物影响最大的是具侵蚀性的微生物类群, 细菌就是其中最重要的一类。加强对这些微生物的了解是这些古文化遗产能够得到完整保护的前提基础。尽管本研究利用光学显微镜和电子显微镜对“小白礁 I 号”沉船部分木质文物进行显微和亚显微结构的观察, 并在研究过程中观察到了腐蚀细菌的存在, 但对这些细菌的侵蚀模式、分布和生活习性还应该做更进一步地了解, 以便对沉船的现状有更多的掌握。这将对保护阶段中所要进行的防护工作有很大的帮助。

### 参考文献:

- [1] 徐润林. 饱水木质文物的细菌病害及其诊断技术的进展[J]. 文物保护与考古科学, 2013, 25(3): 104-110.  
XU Run-lin. Research on bacteria causing damage in water-saturated archaeological wood and their identification[J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2013, 25(3): 104-110.
- [2] Daniel G F, Nilsson T. Developments in the study of soft rot and bacterial decay[M]//Bruce A, Palfreman J W. Forest products biotechnology. London: Taylor and Francis Ltd, 1998: 37-62.
- [3] Landy E T, Mitchell J I, Hotchkiss S. Bacterial diversity associated with archaeological waterlogged wood: ribosomal RNA clone libraries and denaturing gradient gel electrophoresis (DGGE)[J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2008, 61: 106-116.
- [4] Daniel G F, Nilsson T, Singh A P. Degradation of lignocellulosics by unique tunnel-forming bacteria[J]. Canadian Journal of Microbiology, 1987, 33: 943-948.
- [5] 李国清. 出土饱水古木件干缩性探讨[C]// 文物保护技术, 1987: 70-79.  
LI Guo-qing. Study on shrinkage of waterlogged ancient wood [C]//Preservation of Cultural Relics, 1987: 70-79.



- [6] 张金萍,陈年. 泗水国出土泡桐才性研究[J]. 文物保护与考古科学, 2005, **17**(4):15-22.  
ZHANG Jin-ping, CHEN Nian. Studies of the wood property of the waterlogged Paulownia unearthed from the Han Dynasty tomb of Sishui Kingdom [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2005, **17**(4):15-22.
- [7] 张金萍,章瑞. 考古木降解评价的物理指标[J]. 文物保护与考古科学, 2007, **19**(2):34-37.  
ZHANG Jin-ping, ZHANG Rui. The index on the degradation of archaeological wood [J]. Sciences of Conservation and Archaeology, 2007, **19**(2):34-37.
- [8] 赵红英,王经武,崔国士. 饱水木质文物的理化性能和微观结构表征[J]. 东南文化, 2008(4):89-92.  
ZHAO Hong-ying, WANG Jing-wu, CUI Guo-shi. The physicochemical properties and microstructure characterization of waterlogged wood relics [J]. Southeast Culture, 2008(4):89-92.
- [9] 赵红英,王鑫晓,高江华,等. 出土梓木形态结构及物理力学性质研究. 北京林业大学学报, 2008, **30**(5):134-138.  
ZHAO Hong-ying, WANG Xin-xiao, GAO Jiang-hua, et al. Micromorphological structure and physical properties of unearthed catalpa wood [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, **30**(5):134-138.
- [10] 王亚丽. 利用扫描电镜研究“南澳1号”出水古木材的降解 [J]. 中南林业科技大学学报, 2013, **33**(6):48-54.  
WANG Ya-li. Study on deterioration of waterlogged archaeological wood salvaged from Nanao No. 1 shipwreck by scanning electron micros-copy (SEM) [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2013, **33**(6):48-54.
- [11] 中国国家博物馆水下考古研究中心,宁波市文物考古研究所. 浙江宁波渔山小白礁一号沉船遗址调查与试掘 [J]. 中国国家博物馆馆刊, 2011(11):54-68.  
Underwater Archaeology Research Centre of National Museum of China, Ningbo Institute of Cultural Relics and Archaeology. Survey and exploratory excavation of the Xiaobaijiao 1 wreck site in Yushan [J]. Journal of National Museum of China, 2011(11):54-68.
- [12] Daniel G F, Nilsson T. Ultrastructural observations on wood degrading erosion bacteria [Z]. International Research Group on Wood Preservation, 1986, Document IRG/WP/1283.
- [13] Spurr A R. A low viscosity embedding medium for electron microscopy [J]. Journal of Ultrastructure Research, 1969, **26**:31-43.
- [14] Reynolds E S. The use of lead citrate at high pH as an electron opaque stain in electron microscopy [J]. Journal of Cell Biology, 1963, **17**:208-212.
- [15] Singh A P, Nilsson T. Ultrastructure of the attack of the wood of two high lignin tropical hardwood species, *Alstonia scholaris* and *Homalium faetidum*, by tunnelling bacteria [J]. Journal of Institute of Wood Science, 1987, **11**(1):26-43.
- [16] Björdal C G., Nilsson T, Daniel G. Microbial decay of waterlogged archaeological wood found in Sweden [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 1999, **43**(1-2):63-73.
- [17] Klaassen R K W M. Bacterial decay in wooden foundation piles - patterns and causes; a study of historical pile foundations in the Netherlands [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2008, **61**:45-60.
- [18] Courtois H. ber den Zellwandabbau durch Bakterien im Nadelholz [J]. Holzforschung, 1966, **20**:148-154.
- [19] Wilcox W W. Anatomical changes in wood cell walls attacked by fungi and bacteria [J]. Botanical Review, 1970, **36**(1):1-28.
- [20] Greaves H. The effect of bacterial action on some wood cubes in shake culture [J]. Material und Organismen, 1965(1):61-67.
- [21] Boutelje J G, Kiessling H. On water-stored oak timber and its decay by fungi and bacteria [J]. Archiv für Mikrobiologie, 1964, **49**:305-314.
- [22] Grosu R, Boiciuc M, Vladut R. The influence of bacteria on the quality of wood and wood products [J]. Industria Lemnului, 1973, **24**(4):143-147.
- [23] Greaves H. The bacterial factor in wood decay [J]. Wood Science and Technology, 1971(5):6-16.
- [24] Liese W, Bauch J. On the closure of bordered pits in conifers [J]. Wood Science and Technology, 1967, **1**(1):1-13.
- [25] Nilsson T, Daniel G. Tunnelling bacteria [J]. The International Research Group on Wood Preservation, 1983, **1186**:9-13.
- [26] Björdal C G, Nilsson T. Reburial of shipwrecks in marine sediments; a long term study on wood degradation [J]. Journal of Archaeological Science, 2008, **35**:862-872.
- [27] Wilcox W W. Changes in wood microstructure through progressive stages of decay [Z]. U. S. Forest Service Research Paper, 1968, FP2-70:1-45.
- [28] Singh A P. A review of microbial decay types found in wooden objects of cultural heritage recovered from buried and waterlogged environments [J]. Journal of Cultural Heritage, 2012, **13**(3):16-20.
- [29] Ellwood E L, Ecklund B A. Bacterial attack of pine logs in pond storage [J]. Forest Products Journal, 1959, **9**:283-292.
- [30] 黄宗国,蔡如星. 海洋污损生物及其防除 [M]. 北京:海洋出版社, 1984:1-352.  
HUANG Zong-guo, CAI Ru-xing. Marine fouling organisms and control [M]. Beijing:Ocean Press, 1984:1-352.
- [31] 郑平. 环境微生物学(第二版) [M]. 杭州:浙江大学出版社, 2012:1-223.  
ZHENG Ping. Environmental Microbiology (2nd edition) [M]. Hangzhou:Zhejiang University Press, 2012:1-223.
- [32] 宋金明. 中国近海沉积物——海水界面化学 [M]. 北京:海洋出版社, 1997:1-222.  
SONG Jin-ming. The sediment-water interface chemistry in Chinese offshore [M]. Beijing:Ocean Press, 1997:1-222.

## Observation and damage assessment of microbial diseases in some wooden cultural relics from the ancient marine shipwreck, Ningbo Xiaobaijiao No. 1

GAO Meng-ge<sup>1</sup>, ZHANG Qin-fen<sup>1</sup>, JIN Tao<sup>2</sup>, LUO Peng<sup>2</sup>, LI Quan<sup>1</sup>, XU Run-lin<sup>1</sup>

(1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Ningbo Institute of Cultural Relics and Archaeology, Ningbo 315010, China)

**Abstract:** In order to assess the status of the structure of the hull of the ancient marine shipwreck, Ningbo Xiaobaijiao No. 1, and to provide a scientific basis for the further protection of the shipwreck, we used optical and electron microscopy to analyze the microbial damages to the wood from the ancient marine shipwreck at the levels of microstructure and sub-microstructure. We found that the microbes that had the greatest impact on the wooden relics of the shipwreck are mainly erosion bacteria (EB) and tunneling bacteria (TB), and that bacterial erosion in different wooden samples varies from slightly eroded to completely damaged. The structures of the wooden relics in different parts of the ship were evaluated by comparison with standards. The reasons for the difference in the levels of the damage of the wood artifacts were analyzed. Based on the analytical results, we have made suggestions as to how to protect the shipwrecks that have biological damage.

**Key words:** Ancient shipwreck; Ningbo Xiaobaijiao No. 1; Disease bacteria; Microscopic technique; Cultural relic protection

(责任编辑 马江丽)

· 科技信息 ·

## 德国西南部墓地出土中世纪早期剑的 X 射线计算机断层扫描技术 (X-CT) 无损检测研究

开展中世纪早期剑的研究,对中世纪早期考古学的研究具有重要的意义。X 射线计算机断层扫描技术 (X-CT) 是一种高效的无损检测技术,重建的图像分辨率高。本研究中的剑均出土于德国西南部劳斯海姆 (Lauchheim) 的中世纪早期墓地。应用锥束 CT (cone-beam computed tomography, CBCT) 检测剑的内部结构,不会对腐蚀层造成再次损坏。

研究所用仪器有,工业 CT:GE Phoenix vtomex 450<sup>®</sup>,平板探测器:dxr-250。使用参数:管电压 250kV,管电流 320 $\mu$ A,滤片为 1mm 铜,积分时间 500ms,投影数为 1200 张。

通过对共计 30 把剑,包括剑柄、剑鞘,复合棒、铁质镶嵌物和剑的锻造结构等的检测,分析可见这些出土剑腐蚀程度不等,或大面积腐蚀、或表面轻度矿化。通过 X-CT 检测,不仅确认了剑刃、剑柄等的形状,而且可以推知剑的内部结构。

本实验方法为进一步制定剑的保护方案提供了必要的依据。X-CT 便于对剑的整体结构进行检测,但仍受限于焊缝处出现的腐蚀或小区域的金属断面处的检测。比对传统的 X 射线照片,X-CT 提供了包括焊接形式、剑刃结构、镶嵌物等更多的三维图像。X-CT 是高精度、高效率的无损检测方法,适用于文物检测。尽管重建图像中出现的射束硬化等伪影会对实验造成一些影响,但不会影响到剑的结构分析。X-CT 检测为后续研究此批出土剑的制作手法和类型分布提供了依据。