

国外水下考古探测技术的发展趋势

李滨

国家文物局考古研究中心, 北京 100013

摘要 梳理了国外水下考古探测技术,包括基于声学、光学和电法的传统海洋地球物理探测技术、水下考古无人探测技术、深海考古探测技术、遥感探测技术和水下高精度探测技术,通过介绍国外7个水下考古探测技术应用的实践案例,提出国外水下考古探测技术发展的5个趋势,一是水下考古的多源探测;二是深海成为水下考古探测的重要领域;三是与大数据、人工智能技术的融合;四是水下遗址的监测与虚拟复原;五是加强国际合作与知识共享。

关键词 水下考古;水下文化遗产;水下考古探测技术

20世纪50年代,随着回声探测技术取得重大突破,单波束、侧扫声呐等海洋地球物理探测的发明和使用实现了水域探测的技术飞跃^[1]。自20世纪60年代真正意义上的水下考古学诞生以来^[2],海洋地球物理探测技术很快被水下考古学家应用于水下文化遗产的搜寻与探测^[3],并取得良好效果,逐渐成为水下考古探测的重要技术手段。

1 国外水下考古探测技术

1.1 常规水下考古探测技术

自20世纪60年代以来,国外最常用的水下考古探测技术包括声、光、电3个方面^[4],这3方面的探测系统各具优势,结合使用能够提高水下考古探测的准确性和效率。目前,这些技术在国外不仅广泛

应用于水下考古调查,还推广至水下考古发掘、水下文化遗产的保护与管理等领域。

声学探测系统包括侧扫声呐、多波束测深系统、浅地层剖面仪和浅层地震剖面仪等,主要用于水深调查、水底地貌和地质调查等。侧扫声呐探测技术是利用海底对入射波反向散射的原理来探测海底地形的一种新兴技术,可以反映海底目标物的位置、状态和高度等。多波束测深系统则是一种高精度测量水深的技术,它利用声波扫描水下区域并测量水深。浅地层剖面仪则是基于水声传播的原理来探测海底浅层的沉积特征。浅层地震剖面仪主要是利用人工震源或自然震源(如地震)产生的地震波在地下的传播与反射,获得地下介质的反射波、折射波及其他波形数据等信息,从而绘制地层结构剖面图。水下考古学家通常利用多波束测深

收稿日期:2023-10-01;修回日期:2024-03-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2020YFC1521700)

作者简介:李滨,副研究员,研究方向为水下考古技术装备,电子邮箱: sxkg@sina.com

引用格式:李滨. 国外水下考古探测技术的发展趋势[J]. 科技导报, 2024, 42(14): 73-80; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.07.01100

系统和侧扫声呐获取水下遗存周边环境地形、位置及文物分布信息等,利用浅地层剖面仪、浅层地震仪等搜寻浅埋藏的水下沉船和遗址,掌握埋藏深度等信息。

光学探测系统主要是指使用水下摄像设备。这些设备可以记录水下文物的图像和视频,对于水下文物的样貌描述、材料识别以及遗址的确认等方面的研究具有重要的意义。

电学探测系统包括磁力计、金属探测器和电阻率测量等设备,应用较为广泛。磁力计可以探测水底的磁场强度差异,可定位水下大型铁质物体,目前通用的有质子旋进磁力仪、磁通门和色泵磁力仪等,已广泛用于考古调查工作。金属探测器可以探测水下金属制品,如锚、铁器等物品;电阻率测量设备是利用电和电磁场进行测量和探测,主要测量地下介质的电阻率或电导率,得到地下介质的成像图像,已经广泛应用于地质、考古和水文学等领域的研究。

1.2 水下考古无人探测技术

水下考古无人平台探测技术主要是利用无人艇(滑翔机)等平台搭载海洋地球物理探测设备进行水下考古探测。其中,无人艇是一种由程序控制运行的自主水面船艇,通常使用全球定位系统(GPS)或其他导航技术,通过远程控制或自主程序来控制运行轨迹。目前,该技术在海外用途较多,除水下考古领域外,已较广泛应用于海洋调查、水上巡逻、油气探测以及空气和水质监测等。2016年英国的AutoNaut波浪滑翔机可以在大海中行驶数百公里,并进行海浪、气象、海洋生物和水质监测等任务,还可以有效地对水下目标物进行探测^[5]。2018年交付美国海军的Sea Hunter无人艇具有自主导航和避障功能,可以进行长时间的水面巡逻和监测^[6]。无人艇技术的迅猛发展和广泛应用改变了传统的海洋和水下探测方式,为更好地探测和保护水下文化遗产提供了新的技术手段。

1.3 深海考古探测技术

早在20世纪60年代,国外水下考古学家已经开始调查探测和发掘深海沉船遗址^[7]。深海考古探测主要是使用载人潜器和无人潜器搭载海洋地球

物理探测设备进行深海抵近探测。与常规水下考古探测相比,这种探测设备的组成复杂得多,例如需要搭载光源、高清摄像头、动态定位设备以及侧扫声呐、浅地层剖面仪等先进装备,在应用时还需要外部设备支援,如配备收放装置的母船以及带导航、控制、能源供给功能的辅助系统等。

深海载人潜器是一种能够在深海环境下进行潜水和科学研究的专业设备,它通常有防水舱、电池、通信设备、照明设备以及搭载的专业领域的研究仪器和设备,如海洋生物标本采集器、水下探测仪器、机械臂等,其特点是可以搭载科研人员进行现场操作。目前,深海载人潜器成为深海考古和科研的重要工具。美国伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanographic Institution)研制的Alvin深海载人潜器,如图1^[8]所示,该潜器于1964年首次服役,2021年完成了大修,设计最大深度6500 m,初步测试深度达到5338 m^[8]。日本海洋地球科学技术研究所(Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)与三菱重工研制的SHINKAI 6500载人潜器,能够潜到6500 m深度(图2^[9]),1989年首次服役,是日本在深海研究方面的重要工具之一^[9]。加拿大探险家詹姆斯·卡梅隆研制的Deepsea Challenger深海载人潜器,能够潜达10907 m深度。该潜器在2012年完成了第一次深海探险任务,曾与美国《国家地理》杂志合作开展了多项深海科学探测和拍摄活动^[10]。法国国家海洋研究所研制的Nautile深海载人潜器,能够潜达6000 m深度。该潜器于1984年首次服役,曾参与寻找泰坦尼克号、开展深海生物学研究等方面的重要科学探测^[11]。近些年,中国在深海载人潜器的研制与考古应用方面也取得了巨大进步,例如蛟龙号载人潜水器为7000 m级、深海勇士号为4000 m级,而奋斗者号达到10000 m级。2018年以来,中国考古学家乘坐深海勇士号开展了多次深海考古工作(图3)。

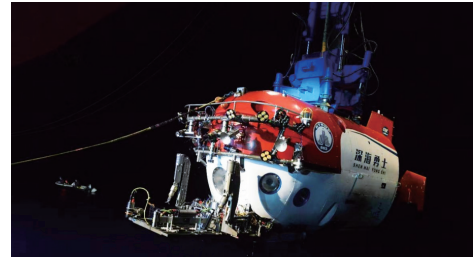
无人潜器包括远程遥控载体(ROV)和自主水下载体(AUV)2种。考古学家可以通过无人潜器搭载海洋地球物理探测设备进行水下考古探测。使用ROV搭载可以实现在船甲板端的实时观测与操作,而使用AUV搭载则需要回收设备后进行数



图1 Alvin(阿尔文号)潜器



图2 SHINKAI 6500号潜器

图3 深海勇士号载人潜器
(图片来源:国家文物局考古研究中心)

据回放、处理和分析。Caribou是由法国公司(Nke Instrumentation)制造的一款无人潜航器,曾用于意大利沿海搜索水下考古目标,其使用的侧扫声呐技术可以有效地探测和绘制出水下目标空间结构的影像,帮助考古学家发现水下人工制品和其他有价值的考古遗存^[12]。ARROWS项目是欧盟资助的,团队由来自水下考古、水下工程、机器人技术、图像处理和识别等多个领域的专业人员和科学家组成,其研发的水下机器人系统能获取高分辨率水下图像,从而降低水下考古的难度和危险度,从2016年公布的成果看,该项目已在水下探测、水下建模、计算机视觉和处理等方面取得诸多成就,为后续的水下考古工作提供了科学基础^[13]。

此外,国外还将深海载人潜器与无人潜器结合使用,进行人机协作海洋探测作业。这种技术将载人潜水器的探测、观测优势和无人潜器的自主性、灵活性优势相结合,提高了深海科学研究的能力和效率。

1.4 卫星遥感探测技术

卫星遥感技术是指利用卫星传感器获取地球表面信息的技术。该技术可以获得大量的空间数据,包括地形、地貌、气象、环境、水资源、农业、林业、城市等信息,较为广泛地应用于陆地考古,并发展出航空考古、遥感考古等考古学的分支学科。

近年来,随着卫星遥感技术的不断进步,考古学家已经可以获取考古遗址高分辨率、多角度和多时相的遥感数据。此外,人工智能和机器学习技术的发展为卫星遥感数据的分析和处理提供了新的工具和方法。卫星遥感技术在水下文化遗产保护方面的应用还处于初级阶段。不过随着该技术的

发展,能够推动地球环境、资源监测和管理的科学化、信息化与智能化,未来有望成为一种保护水下文化遗产和海洋环境保护的常用手段。考古学家依托在西澳大利亚州北领地沿海和岛屿地区发现的水下考古遗址中包含的证据,结合该地区民族志、海平面变化、地貌学的资料,对该区域的水下考古和文化景观变化进行了新的评估,取得重要收获^[14]。

1.5 水下考古高精度探测技术

水下考古高精度探测技术是一种先进的数字化技术,可以利用声呐、雷达、摄影测量和影像处理等方式,对水下遗存及其附近地形、地貌进行大规模高速、高精度的三维可视化数值建模(图4)。目前,在国外水下文化遗产保护中应用广泛。Guidi等曾经使用一种在浅水环境下用于水下考古调查和3D建模的低成本系统。该系统使用高精度三维扫描技术进行数据采集和处理,可以快速准确地记录水下文化遗产的形态和尺寸信息^[15]。水下考古学家还将声学 and 光学成像技术结合运用于水下文化遗产的3D测量。研究人员使用声呐以及3D激

图4 水下高精度三维激光扫描
(图片来源:国家文物局考古研究中心)

光扫描仪来捕捉水下文物的图像和信息,并利用专业软件进行处理和分析,不仅有效地获取水下文物的详细信息和空间位置,还大幅提高了水下文化遗产的测量精度,为下一步水下文化遗产的复原、研究提供了重要数据^[16-17]。

2 水下文化遗存探测案例

海洋地球物理勘测的重要优势是在未接触目标的情况下,能够快速收集大量信息,这种搜索模式比传统的潜水员“水下巡游式调查”速度快、进行搜索并发现目标的间距广、效率高,且具有无损性,因此,被水下考古学家广泛应用于水下考古调查、发掘、保护乃至管理领域。

2.1 克罗地亚沉船考古调查与发现

1999年,来自克罗地亚、意大利和美国的海洋考古专家组成的团队在克罗地亚岛屿海域开展水下考古调查,利用海洋地球物理探测设备在淤泥下发现水下遗址,并通过考古挖掘工作,最终找到了一艘沉船遗迹。克罗地亚海域发现的这艘沉船是一艘木质帆船,长约16 m,宽约6 m,载有数百件货物,包括瓷器、陶器、金属制品和武器等,被认为沉没时间为16世纪晚期到17世纪早期。沉船上发现的货物来自中国、越南、泰国、印度、伊斯兰国家和欧洲,这艘沉船的发现展示了当时该地区的贸易和文化交流,说明当时该地区的贸易联系和文化交汇^[18]。

2.2 摩洛哥霍西马省海岸水下考古调查

在摩洛哥霍西马省海岸有广阔的考古遗址,在西班牙军队与当地里菲安人之间的里夫战争期间,许多军舰在胡塞马地区沉没,其中大部分尚未被发现。考古学家在霍西马省海岸采用了沉船探测和卫星遥感技术结合的勘探方式,识别出许多水下遗址。该项目研究人员利用合成孔径(SAR)图像和卫星遥感技术在Al-Hoceima沿海周围的海域进行水下勘探,并利用开源软件 Sentinel Application Platform 绘制埋藏海底沉积物中的沉船残骸。研究表明,研究区可能存在5处沉船,其中2处经西班牙水文研究所的沉船数据证实^[19]。

2.3 科林斯湾罗马时期遗址调查项目

考古学家在希腊科林斯湾采用了多波束测深设备进行水下考古勘探。这项研究的重点是寻找古代罗马时期的遗址。研究人员采用多波束探测技术进行水下地形测量,结合遥感技术确定勘探区域,通过2种技术结合使用的勘探方式,能够精准地描绘出该地区的水下地貌^[20]。

2.4 帕克港水下考古调查

为寻找波罗的海南部帕克港,考古学家采用了多波束声呐探测系统、三维浅地层剖面仪、水下摄影和航空摄影测量等多种探测和测量方法进行水下遗址的考古调查。三维浅地层剖面仪(SBP)探测显示海床下方约1~2 m处可见明显泥沙边界(黄线),大部分平坦,但在横截面东部有一个小凹陷;中央部分显示带是曾经的疏浚河道;断面左侧有清晰的声呐反射造成的声学遮挡,可能是泥炭材料或石层(图5^[21])。通过与档案资料比较,三维浅地层剖面数据集可以区分遗址暴露在外结构、曾经的挖掘沟、港口边界和Plutnica河的古河道。水下考古队认为通过地理信息系统(GIS)和多种探测数据的整合,可以实现帕克港的复原和虚拟重构^[21]。

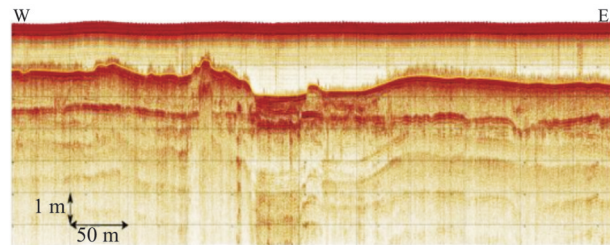


图5 浅地层剖面仪显示的帕克港地层剖面

2.5 奥斯坦德水下遗址调查

比利时根特大学里纳德海洋地质中心利用二维和三维声呐探测技术对比利时奥斯坦德附近的一个水下考古遗址进行了调查,发现了埋在海床下的文化层、中世纪的海岸防御结构和人类活动的遗迹^[22]。而与之相似,考古学家还利用超高分辨率海洋声学技术对近岸和潮间带进行考古勘探,通过海洋地震和磁力技术在近岸和潮间带进行水下考古勘探,了解被淹没的考古遗址和遗迹或海底景观和(史前)海岸线^[23]。

2.6 深海水下考古探测项目

Skerki Bank 是深海考古的跨学科项目,最初是由瑞典近海调查公司 MMT(Marin Mätteknik)和瑞典 Södertörn 大学海洋考古研究所(MARIS)合作创建,后来南安普敦海洋考古中心(CMA)也加入并与保加利亚索佐波尔和美国康涅狄格大学建立了核心伙伴关系。1988—1997年的9年间,该项目团队在深海中发现了最大古代船只集中地,在210 km的区域内共发现8艘沉船,其中5艘为罗马时代的船只,时间跨度从公元前100年到公元400年,证明了在地中海中部古迦太基、罗马、西西里岛和撒丁岛之间存在一条主要贸易路线^[24]。来自考古学与海洋学、海洋工程等不同专业领域的科学家密切合作,综合使用了高度复杂的深潜技术、精确的导航定位技术以及非破坏性的海洋地球物理探测技术、方法,获取了高精度的声学 and 视觉图,为后续研究提供了数据材料,展现了深海考古的广阔前景。

2.7 Vicus Constanciacus 项目

Vicus Constanciacus 项目^[25]是一个以恢复、保护和评估 Constanciacus 历史和考古遗产为目标的项目。Constanciacus 是威尼斯北部潟湖的一个古老的小群岛,该项目通过遥感(RS)调查技术掌握了水下遗址的布局、大小、方向以及周围环境,识别出了过去埋藏在地表以下或潟湖浅水下的痕迹,从而揭示潟湖的早期发展变化模式,研究潟湖变化与定居点演变的关系。该项目还利用卫星遥感检测和监测可能会对这些水下文化遗产产生负面影响的环境变化,例如,水温、盐度和沉积物等。

3 国外水下考古探测技术发展趋势

3.1 水下考古的多源探测

不同海洋地球物理探测技术针对探测或搜索的目标是不同的,不同技术手段在开展水下考古探测时可以相互补充。随着海洋地球物理探测技术的发展,水下考古探测技术手段不断丰富,为保障水下考古调查的效率以及更加准确研判、解读水下遗存,实际工作中越来越多地使用多种技术手段同时探测同一个水下目标,以获取尽可能多的信息,

从而实现水下遗存的科学评估^[20]。查戈斯群岛水下考古调查和科林斯湾罗马时期遗址都综合使用了多波束探测系统和遥感技术,取得了较好的水下考古探测成果。而帕克港的调查更是将多波束声呐测深系统、三维浅地层剖面仪、水下摄影和航空摄影测量等多种探测和测量方法进行综合运用。

3.2 深海成为国外水下考古探测技术应用的重要领域

随着深海技术的发展,深海载人潜器、ROV、AUV 技术不断取得突破,人类对深海的探索日益深入。由于深海环境的特殊性,存在于深海的水下沉船、遗址等的保存要远远好于浅水区域,因此,深海考古也逐渐成为考古学家和海洋学家关注的焦点。为了探测深海沉船、遗址,深拖探测技术、深海载人潜器、ROV、AUV 等搭载海洋地球物理探测设备进行深海探测成为开展深海考古的重要探测技术手段。法国的 Nautilie、加拿大的 Deepsea Challenger 等载人潜器都曾造访深海沉船遗址。2022年,中国国家文物局考古研究中心与中国科学院深海科学与工程研究所在中国南海西北陆坡1500 m深处先后探测发现2艘明代沉船(图6),是水下考古探测技术在深海考古领域取得的重要成果^[27]。

3.3 与大数据、人工智能技术的融合

传统水下考古探测多是通过人工操作不同的海洋探测设备完成的。在实践层面,采集的数据量十分庞大,而且由于数据的采集过程和后期处理都缺乏统一的标准,这不仅造成数据处理工作繁杂,而且导致数据的处理结果经常受到操作者的技术和经验影响。通过大数据,研究多源水下探测数据的融合,结合水下文物调查任务自身特点,并根据水下文物的埋藏特性,建立相应的探测数据集标准,找出不同数据之间的交集与联系,设计出成熟稳定高效的多源数据处理方法、算法,从而完善水下考古探测实践中的数据处理与分析流程。人工智能技术的兴起带来了图像分类和目标检测等领域的快速发展,其相较于传统算法取得了明显的提升。结合人工智能技术识别和分析水下探测设备生成的图像数据,进而完成图像处理、分割、物体识别,通过数据挖掘和预测,可以帮助探测团队发现

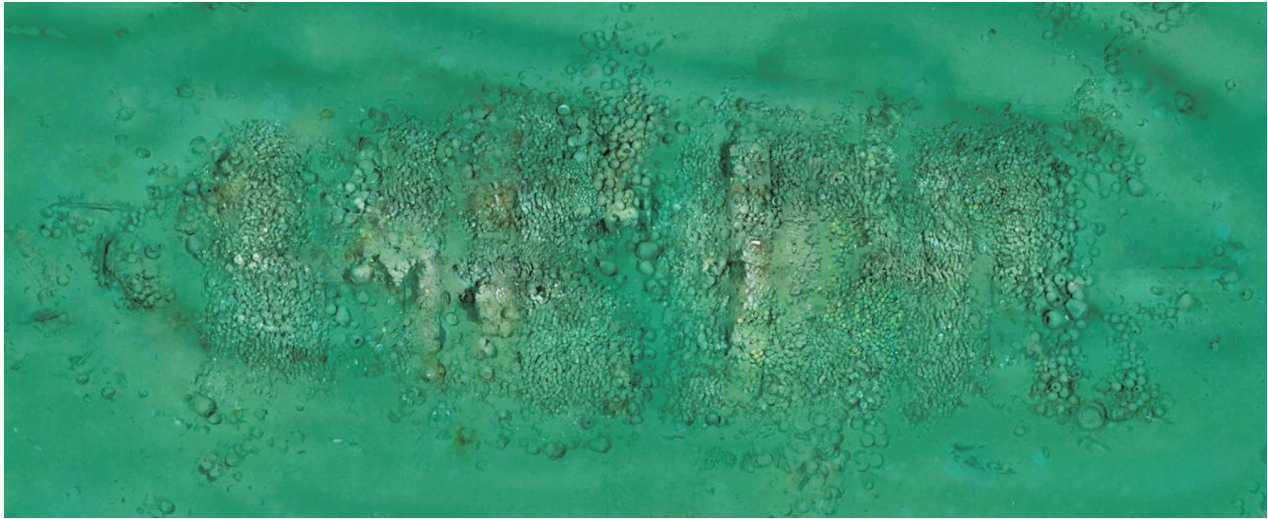


图6 中国南海西北陆坡一号沉船遗址核心区摄影拼接图(图片来源:国家文物局考古研究中心)

潜在的水下文化遗存,从而提高探测效率,降低勘探成本,实现更高效准确的数据采集处理流程。得益于不同观测手段所获取数据的互补性,基于多源观测数据融合的水下文物的精确探测和识别在原理上具有显著优势,因此将人工智能技术与水下多源观测数据融合并应用于水下考古探测领域具有显著的科学研究价值和意义。

3.4 水下考古探测和遗址的监测与复原

国际社会对水下文化遗产保护的核心理念是以原址保护为首选,水下考古调查优先使用非破坏技术^[18]。水下遗址具有易损性,任何小的扰动以及不稳定的水下环境都有可能破坏水下遗址。由于海洋地球物理探测技术对水下文化遗产不会造成破坏,因此被联合国教科文组织2001年《保护水下文化遗产公约》所提倡^[26]。国外研究定期采用海洋地球物理探测技术而非人员潜水对水下沉船遗址进行扫测,通过对比扫测影像资料,实现了对水下遗址的长期监测。荷兰水下考古学家利用多波束测深系统从2002年至2009年,每年对一艘18世纪的沉船进行重复式扫测,通过对比多波束声呐图监测该遗址的渐变过程以及侵入式扰动的程度^[26]。

同时,随着网络与计算机计算能力的提升,水下遗址的展示与虚拟复原不仅成为现实,而且逐步得到推广,为文化遗产的保护提供了新的保障。例如,通过对遗址进行高精度的数字化测量,对相关

数据资料进行存储,并且实现水下遗址的复原与虚拟重建^[21-23]。总之,借助多种水下考古探测技术,考古学家可以在非扰动水下遗址的情况下获取水下遗址高精度的、可用于矫正和测绘的图像和数据,为水下遗址的监测、复原及虚拟展示提供基础(图7)。

3.5 加强国际合作与知识共享

水下文化遗产探测涉及多学科的合作,需要多方面的技术和资源支持。因此,国际合作和知识共享在水下文化遗产探测中具有重要作用。首先,国际合作可以促进水下文化遗产的共同保护和研究。多国合作进行水下勘探可以弥补单个国家的资源和技术限制,同时避免因为私人或商业利益掠夺和破坏水下文化遗产。其次,知识共享是促进水下文化遗产探测和保护的重要手段。在水下探测中,各种技术和方法不断更新和发展,而不同国家、机构和研究人员都有自己的研究成果和经验。如果各方之间能够分享数据、研究成果、技术经验和最佳实践,将大大提高水下文化遗产探测和保护的效率与质量。此外,知识共享还可以避免重复工作,节省资源和时间。

在实践中,国际合作和知识共享已经在水下文化遗产探测和保护中得到了广泛应用。例如,联合国教科文组织通过国际水下考古项目和协作网络等机制,促进了各国之间的合作和知识共享。

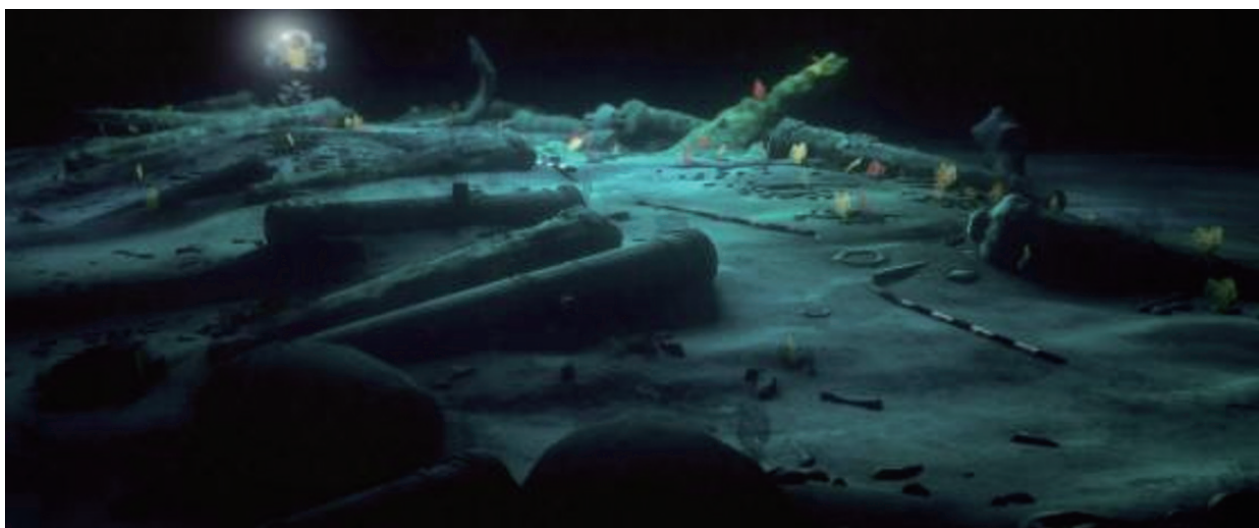


图7 达索系统公司虚拟海底沉船的残骸,帮助水下考古学家模拟水下操作

参考文献 (References)

- [1] 肖付民, 刘雁春, 暴景阳, 等. 海道测量学概论[M]. 北京: 测绘出版社, 2006.
- [2] 国家文物局考古研究中心. 水下考古学概论[M]. 北京: 科学出版社, 2023.
- [3] George F B. A brief history of underwater detection and survey techniques used in underwater archeology[C]//The Application of Recent Advances in Underwater Detection and Survey Techniques to Underwater Archeology. Bodrum, Turkey: Uluburun Publishing, 2004: 9-16.
- [4] Green J. Maritime archaeology: A technical handbook[M]. London: Elsevier Academic, 2004.
- [5] Johnston P, Poole M. Marine surveillance capabilities of the AutoNaut wave-propelled unmanned surface vessel (USV)[C]//Proceedings of OCEANS 2017-Aberdeen. Piscataway, NJ: IEEE, 2017.
- [6] New Atlas. DARPA hands autonomous sub-hunter prototype over to the US navy[EB/OL]. (2018-02-05) [2024-03-01]. <http://newatlas.com/darpa-actuv-us-navy/53247>.
- [7] 丁见祥. 大海寻踪: 深海考古的发生与发展[J]. 中国文化遗产, 2019(5): 4-12.
- [8] Woods Hole Oceanographic Institution. History of Alvin [EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.whoi.edu/what-we-do/explore/underwater-vehicles/hov-alvin/history-of-alvin>.
- [9] JAMSTEC. Deep submergence research vehicle shinkai 6500[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.jamstec.go.jp/e/about/equipment/ships/shinkai6500.html>.
- [10] Ker Than. James cameron reaches deepest point[EB/OL]. [2024-03-05]. <https://www.nationalgeographic.com/adventure/article/120325-james-cameron-mariana-trench-challenger-deep-deepest-science-sub>.
- [11] Jollivet D, Desbruyères D, Copley J. Nautilic and remotely operated vehicles provide access to deep-sea hydrothermal vents[J]. Oceanography, 2011, 24(1): 30-38.
- [12] Dasset S, Damus R, Morash J. Use of GIBs in AUVs for underwater archaeology[J]. Sea Technology, 2003, 44(12): 22-27.
- [13] Allotta B, Costanzi R, Ridolfi A, et al. The ARROWS project: Adapting and developing robotics technologies for underwater archaeology[J]. IFAC-PapersOnLine, 2015, 48(2): 194-199.
- [14] McCarthy J, Wiseman C, Woo K, et al. Beneath the top end: A regional assessment of submerged archaeological potential in the Northern Territory, Australia[J]. Australian Archaeology, 2022, 88(1): 65-83.
- [15] Menna F, Agrafiotis P, Georgopoulos A. State of the art and applications in archaeological underwater 3D recording and mapping[J]. Journal of Cultural Heritage, 2018, 33: 231-248.
- [16] Chen J, Wang H, Ma K, et al. 3D underwater archaeological survey using acoustic and optical imaging approaches[J]. Journal of Cultural Heritage, 2017, 26: 151-158.
- [17] Ioannidis K P, Moraiti M, Skarlatos S. Acoustic and optical combined techniques for 3D documentation of underwater archaeological sites[J]. Journal of Cultural Heritage, 2014, 15(6): 690-696.
- [18] Jurkovic I, Mihovilić D. The discovery of 16th- ad 17th-century shipwrecks in Rijeka, Croatia: New insights into global maritime trade[J]. International Journal of Nautical Archaeology, 2016, 45(2): 347-360.

- [19] Taher M, Mourabit T, Etebaai I, et al. Detection and mapping of shipwrecks in Al-hoceima coastal using remote sensing[J]. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 2022, 23(5): 218–223.
- [20] Stathis C S. The 373 B. C. Helike (Gulf of Corinth, Greece) earthquake and tsunami, revisited[J]. *Journal of Field Archaeology*, 2022, 93(1): 444–457.
- [21] Pydyn A, Popek M, Kubacka M, et al. Exploration and reconstruction of a medieval harbour using hydroacoustics, 3-D shallow seismic and underwater photogrammetry: A case study from Puck, southern Baltic Sea[J]. *Archaeological Prospection*, 2021, 28(4): 527–542.
- [22] Tine Missiaen. 2D and 3D acoustic investigation of a submerged archaeological site near Ostend, Belgium. 7th. Workshop "Seabed Acoustics", November 19/20, 2015 in Rostock–Warnemünde, German[EB/OL]. [2024-03-01]. <https://www.innomar.com/applications/user-workshop/seabed-acoustics-2015#Conference%20Presentations%20and%20Posters>.
- [23] Missiaen T, Evangelinos D, Claerhout C, et al. Archaeological prospection of the nearshore and intertidal area using ultra-high resolution marine acoustic techniques: Results from a test study on the Belgian coast at Ostend–Raversijde[J]. *Geoarchaeology*, 2018, 33(3): 386–400.
- [24] Pacheco–Ruiz R, Adams J, Pedrotti F, et al. Deep sea archaeological survey in the Black Sea–Robotic documentation of 2, 500 years of human seafaring[J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2019, 152: 103087.
- [25] Traviglia A, Cottica D. Remote sensing applications and archaeological research in the Northern Lagoon of Venice: The case of the lost settlement of Constanciacus[J]. *Journal of Archaeological Science*, 2011, 38(9): 2040–2050.
- [26] 蒂斯·马尔拉维德, 乌吕克·格林, 芭芭拉·埃格. 水下文化遗产行动手册[M]. 国家文物局水下文化遗产保护中心, 译. 北京: 文物出版社, 2013.
- [27] 宋建忠. 深海藏珍——发现南海西北陆坡一号、二号沉船[N]. 光明日报, 2023–10–22(12).

The trends of underwater archaeological exploration technology outside of China

LI Bin

National Centre for Archaeology, Beijing 100013, China

Abstract This paper reviews underwater archaeological exploration technologies outside of China, including traditional marine geophysical exploration technology based on acoustic, optical and electrical methods, unmanned underwater archaeological exploration technology, deep-sea archaeological exploration technology, remote sensing exploration technology and high-precision underwater exploration technology. Additionally, it introduces seven practical cases of underwater archaeological exploration technologies abroad. Five trends in the development of underwater archaeological exploration technology abroad are put forward: first, multi-source exploration of underwater archaeology; second, the increasing significance of deep-sea research in this field; third, integration with big data and artificial intelligence technology; fourth, monitoring and virtual restoration of underwater sites; fifth, international cooperation and knowledge sharing.

Keywords underwater archaeology; underwater cultural heritage; underwater archaeological exploration technology ●



(责任编辑 傅雪)