



# 一种基于地外自主潜航器(Exo-AUV)的冰天体生命探测方法

王斌<sup>1,2</sup>, 秦洪德<sup>1,2\*</sup>

1. 哈尔滨工程大学智能海洋航行器技术全国重点实验室, 哈尔滨 150001;

2. 哈尔滨工程大学船舶工程学院, 哈尔滨 150001

\* 通讯作者, E-mail: qinhongde@hrbeu.edu.cn

收稿日期: 2023-11-20; 收修改稿日期: 2024-07-12; 接受日期: 2024-07-22; 网络版发表日期: 2024-09-29

国家杰出青年科学基金项目(52025111)和国家自然科学基金重点项目(51939003)资助

**摘要** 太阳系中,以木卫二和土卫二为代表的冰天体具有突出的生命潜力,可能在21世纪解答人类关于地外生命的终极问题。Exo-AUV能在冰壳中、冰水交界和海底等潜力区域执行生命探测任务,被NASA等机构寄予厚望。然而,具体在哪、基于何方法、开发何种Exo-AUV和技术、达到什么目标,是未来冰天体生命探测任务重要议题。本研究以木卫二为假想目标,探讨了冰天体生命探测任务的科学目标、可探测对象、潜力区域和生源性分析,提出了一种基于Exo-AUV的冰天体生命探测方法;解析了Exo-AUV在不同作业场景下的关键条件,提出了艇体、载荷和自主三方面基本技术要求;介绍了Exo-AUV的研究背景、研究现状和存在问题,提出了一套Exo-AUV概念开发技术路线和一种多Exo-AUV系统作业概念(ConOps for MEAS)。该系统将帮助行星科学家和天体生物学家探索冰天体、寻找强生源信号,甚至活体生命和前生命化学系统。

**关键词** 冰天体, 木卫二, 生命探测, 生命潜力, Exo-AUV

## 1 引言

2005年, *Science* 杂志在纪念创刊125周年之际发布了125个科学前沿问题,“我们是否孤独(Are we alone)?”(Kennedy和Norman, 2005)和“太阳系内地球之外是否存在或曾经存在生命(Is there—or was there—life elsewhere in the solar system)?”(AAAS, 2005)位列其中。2021年,上海交通大学联合*Science*发布了新版的“125问”,将上述两个旧问题进行整合后,再次提出“我们是否孤独(Are we alone)?”这一终极问题(Levine,

2021)。虽然天体生物学的历史不足百年(Cockell, 2001),但关于是否存在地外生命,在哪里能够发现地外生命,并不是世界进入现代才提出的新问题。古希腊人Leucippus和Democritus基于“原子论(Atomism)”猜测存在“无穷多个世界”(Dick, 1982);古罗马人Lucretius在其《物性论》(*On the Nature of Things*)中对“其他的世界,不同的人 and 生灵”进行了诗意的论述(Rouse, 1975);欧洲文艺复兴和启蒙运动时期的一些学者深受古典猜想的吸引, Bruno、Kepler和Huygens等皆通过天体观测为“多世界论(The Plurality of Worlds)”背书

中文引用格式: 王斌, 秦洪德. 2024. 一种基于地外自主潜航器(Exo-AUV)的冰天体生命探测方法. 中国科学: 地球科学, 54(11): 3553–3573, doi: 10.1360/SSTe-2023-0288

英文引用格式: Wang B, Qin H. 2024. An Icy Worlds life detection strategy based on Exo-AUV. *Science China Earth Sciences*, 67(11): 3515–3535, <https://doi.org/10.1007/s11430-023-1390-6>

(Roush, 2020); 1855年, 剑桥大学三一学院院长Whewell指出太阳系其他行星和地球一样存在生命的观点是缺乏且无视“物理原因”的, 认为只有地球位于可形成生命的行星轨道上(Whewell, 1853).

今天看来, Whewell的“物理原因”虽然存在错误, 但其结论却具有前瞻性. 20世纪诞生的行星宜居带理论(Habitable Zone)认为地表拥有液态水的宜居行星不仅要与恒星的距离适当, 还与恒星类型、行星体积、密度、内部构造和磁场等诸多因素相关(Ramirez, 2018), 已确认和潜在的类地宜居行星均不在太阳系. 然而, 一艘潜航器却点亮了在太阳系内发现地外生命的希望. 1977年, 当Alvin号在加拉帕格斯裂谷东部海域作业时, 意外地在海底发现了热液系统以及以化能合成为基础的生态(Karl等, 1980). 此后, 人类在极地冰下湖(Siegert等, 2001)、卤水湖(Murray等, 2012)、冰川深部(Malaska等, 2020)与地壳深部(D'Hondt等, 2019)等曾被视为生命荒漠的寡营养系统中也陆续发现了微生物. 极端环境微生物颠覆了人类对生命耐受力极限的认知, 而木卫二(Europa)等冰天体在过去30年的陆续发现(Hendrix等, 2019), 更为在21世纪解答“我们是否孤独(Are we alone)?”这一问题提供了希望.

木卫二(Europa)、土卫二(Enceladus)和土卫六(Titan)等冰天体拥有表面冰壳、冰下海洋与岩石海底等关键条件, 满足生命的基本需求(Hoehler等, 2020); 同时, 不同的冰天体也存在众多差异, 可容纳的生命和可探测对象或许不同, 可能存在与地球经验偏差的情况(German等, 2019). “我们能否解答在哪个天体, 用何种技术, 才能成功探测到生命?” German曾凝练地指出当下冰天体生命探测最根本的问题, 并与Hand等通过*Oceanography*于2022年6月的“行星海洋特刊”(Special Issue on Oceans Across The Solar System)呼吁更多从事行星、地球和海洋科学与技术工作的人加入到冰天体生命探测方法的讨论中(German等, 2022a).

在已知的冰天体中, 最有可能发现生命的区域在冰壳中、冰水交界和海底(Chyba和Phillips, 2001; Marion等, 2003; Figueredo等, 2003), 超越了传统探测器(例如, 环绕器、着陆器、移动探测车、探空气球和无人机等)的探测能力和范围, 开发专门的自主潜航器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV), 由其穿透冰壳, 并在海洋中释放, 自主执行生命探测任务, 是理想

的解决方案(Hendrix等, 2019; Hand等, 2020). 美国宇航局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)和德国宇航中心(Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR)已率先开展了木卫二和土卫二的AUV研制项目. 然而, 木卫二与月球体积相当, 表面被至少数公里厚的冰壳完全覆盖, 受到木星的强辐射, 冰下海洋最深处超过100km, 海底拥有巨大的静水压力(Nimmo和Pappalardo, 2016). 此外, 在巨大、无光、寡营养的环境中, 即使存在微生物, 其分布也很可能是稀疏且异质的(Hoehler等, 2022). 另外, 木卫二与地球还有长达半小时的通讯时间延迟、狭窄的通讯窗口与带宽(Wronkiewicz等, 2024). 这些苛刻的场景条件要求AUV必须穿冰入水, 像科学家一样在地外全球性冰海空间中自主执行复杂的生命探测任务. 为促进更有针对性地研究和交流, 不妨将这种在地外流体中自主作业的潜航器称为Extraterrestrial AUV或Exo-AUV.

本研究回顾了生命探测的目标和方法, 以木卫二为例, 提出了一种以生命潜力为科学目标, 适用于Exo-AUV的冰天体生命探测方法; 归纳了Exo-AUV的潜在作业场景条件和技术要求; 评述了Exo-AUV的开发历史和当下存在问题, 提出了一套Exo-AUV概念开发技术路线和一种多Exo-AUV系统作业概念(Concept of Operations for Multiple Exo-AUV System, ConOps for MEAS).

## 2 一种冰天体生命探测方法

与NASA和ESA不同, 本研究认为未来的冰天体生命探测任务应以生命潜力为科学目标, 并以此为基础设计了一套适合Exo-AUV的探测方法. 为了更好的介绍该方法, 本研究以木卫二为例分析了生命潜力作为科学目标的优越性; 根据相似环境假设和生态位理论提出了潜力区域推论; 列举了主要的可探测对象; 最后, 指出了当下主流的生源性分析方法存在的不足, 阐述了本探测方法的优势.

### 2.1 科学目标

NASA的木卫二快船号(Europa Clipper)和ESA的果汁号(Jupiter Icy Moons Explorer, JUICE)以宜居性(Habitability)为中心设定了科学目标(Dougherty等, 2011; Paczkowski等, 2022), 但这种设定存在问题. 首

先, 宜居性一词来源于生态学中栖息地(Habitat)的概念, 在天体生物学中描述地外某环境能够承载至少一种已知生命的能力(Cockell等, 2016); 这一定义还具有天然的二元性(Binary), 即对于某种已知的生命, 地外某环境只有宜居(Habitable)或不宜居(uninhabitable)两种结论, 这两种结论完全互斥, 不存在部分宜居(Cockell等, 2019). 然而, 宜居性的使用却早已突破了定义的范畴, 比如: 基于宜居性3大经典条件(Nealson, 1997)用望远镜或探测器遥测类地行星, 研究比地球“更宜居”的超宜居行星(Super Habitable Exoplanet); 在同一天体较大时空尺度下比较不同环境的宜居性, 讨论若干环境变量对总体宜居性的影响力; 以及用概率来描述宜居性(Cockell等, 2022). 这些问题诚然是具有一定研究意义的, 但无一例外都偏离了宜居性的科学内涵, 已经引起诸多争议(Cockell等, 2016, 2019; Heller, 2020; Lenardic和Seales, 2021; Cockell等, 2022). 对宜居性不够严谨的泛化应用暴露了其严格的生态学内涵及天然的二元性语言逻辑与地外生命探测宏大、复杂、多学科交叉的研究背景以及开放性、发散性、探索性的研究方法之间的矛盾. 或许, 宜居性这一传统概念已不能完美匹配当下和未来地外生命探测的全景, 以此为首要科学目标而设计的探测方法与装备恐难免逐渐增多的质疑. 此外, 木卫二等冰天体内部可能存在前生命化学系统(Barge等, 2022), 宜居性显然不涵盖这一内容(Cockell等, 2016), 若以宜居性为首要科学目标可能会错失重要发现.

NASA的木卫二着陆器(Europa Lander)的首要科学目标最初为发现生命(Hand等, 2017), 现在更新为发现生命信号(Hand等, 2022), 这两种设定均存在瑕疵: (1) 生命具有二元性内涵, 即被测对象要么是生命, 要么不是生命, 不存在中间情况. 即便理论上存在直接发现生命的可能, 但至今尚无公认的宇宙时空尺度下的生命定义(Kolb, 2019). 因此, 本研究认为直接将发现生命作为科学目标尚不妥当. (2) 木卫二着陆器开发团队对生命信号进行了模糊定义, 即“可作为生命证据的特征或测量”(Hand等, 2017, 2022), 巧妙地涵盖了所有可被解读为来自于生命过程的特征和测量, 为生命信号的范畴提供了一个实用的“容错空间”, 规避了因生命内在的二元性内涵、生命科学定义的缺失和生命信号的生源性(Biogenesis)不确定(即不确定采集到的生命信号来自于生命过程还是来自于非生命过程)而引

发的错误设定, 这些错误设定很可能影响装备开发、任务操作和探测结果的解读. 也正因此, 生命信号这种基于经验而非科学辩证, 定义模糊而不清晰的概念, 既受限于人类对于生命过程本质的理解, 又受限于探测仪器的感知能力, 仅适合作为一类可探测对象, 不适合作为地外生命探测任务的首要科学目标.

生命潜力(Biological Potential)是基于已知的科学理论来研究宇宙中生命诞生和生存的必需需求, 如具有特殊结构和功能的有机大分子、生化反应溶剂、可获取的能量、环境的理化条件等, 评价冰天体内部环境能够支持的生命数量、生产力、多样性和鲁棒性等(Hoehler等, 2020; German等, 2022b). 生命潜力作为冰天体生命探测任务的科学目标具有优势: 首先, 探测本就是通过先验知识做假设, 然后验证或证伪假设的过程, 而生命潜力具有天然的假设内涵, 避免了二元性的局限性和争议性. 其次, 生命潜力不仅关注生命的生存条件, 还关注其诞生条件, 既可应用于发现生命, 还可以用于研究前生命化学系统(Hoehler等, 2020). 此外, 探测冰天体未知环境的生命潜力, 可借鉴地球上的相似环境中的条件(Arrigo, 2022), 依托地球科学、地质学、海洋学、生物地球化学、环境科学、生态学、演化生物学、细胞生物学、分子生物学、合成生物学、系统化学等相关学科中的方法和工具, 具有一定的可操作性.

## 2.2 潜力区域

在有限的时间窗口和能源供给下, 探测器无法全面探测木卫二巨大的全球性冰海空间, 因此自主筛选生命潜力较优的区域异常重要. 为此, 本研究提出了潜力区域的推论. 首先, 天体生物学假设与冰天体相似的地球环境(简称相似环境)可作为研究参照(Klenner等, 2020). 其次, 生态学认为生命分布的多样性和生产力与其生境和生态位密切相关(Melo-Merino等, 2020). 本研究做出如下推论: 冰天体上与相似环境中生命多样性和生产力水平较高区域的生境或生态位接近的区域的生命潜力可能较高, 这种区域称为潜力区域. 在潜力区域, 探测器可能发现生命信号甚至活体生命, 值得优先和深入探测. 需要注意的是, 潜力区域也和生命潜力一样都是假设, 需要通过探测来验证或证伪, 这种假设将有助于探测器规划探测任务.

木卫二上生命潜力突出的区域主要分布在冰中、冰水交界处和海底(Chyba和Phillips, 2001; Marion等, 2003; Figueredo等, 2003).

冰壳中存在不同形式的液态水, 如冰晶格间的液态水、卤水囊中的液态水、冰受到外部刺激融化的水、裂缝中的水, 甚至大型冰下湖(Pappalardo和Barr, 2004). 在地球冰川深部、南极冰下湖等相似环境中已探明存在微生物(Siebert等, 2001), 木卫二的冰壳有可能保留了来自冰表和海洋的营养物质, 具有一定的生命潜力.

由于木卫二冰壳的层叠、升沉等运动(Pappalardo等, 1998; McKinnon, 1999; Collins和Nimmo, 2009; Ashkenazy等, 2018; Buffo等, 2020), 冰水交界处可能汇集了来自表面的氧化剂和来自海底的还原剂, 易富集在冰下裂缝、洞穴或其他具有明显不连续边界的冰下底壳中(Figueredo等, 2003; Martin和McMinn, 2018). 地球极地冰下相似环境中已经探明存在化能生物的群落(Christner等, 2006), 木卫二的冰水交界处具有较高的生命潜力.

在木卫二的海底, 可能会有热液裹挟着营养物质从岩石层中涌出(Russell等, 2014). 地球上的热液区是化能生命的绿洲(Karl等, 1980), 碱性热泉甚至被认为是地球生命最早的摇篮(Russell, 2003; Martin和Russell, 2007; Martin等, 2008). 木卫二的地质运动活跃, 生命潜力突出, 可能在海底探测到生命甚至前生命化学系统(Vance和Melwani Daswani, 2020).

在地球深部, 水渗入岩层, 在元素衰变辐射作用下生成氧气与过氧化氢(Kargel等, 2000), 会为矿物微生物提供营养和化学能, 木卫二的海底深部中也拥有相似的条件, 具有一定的生命潜力.

在冬季, 木卫二的冰壳向下生长, 冰水交界处如存在生命信号、活体生命或死后的遗骸(Life relics), 可能会被冷冻后嵌入冰层; 而冰壳存在板块运动, 通过挤压、破碎、翻转使局部冰壳底面上翻成为新的冰壳表面; 此时, 喷泉会从冰壳裂缝中喷出, 羽流物在高空遇冷形成雪和冰晶, 冰雪降落后将冰壳表面覆盖. 木卫二高纬度地区受到的电磁辐射较低, 原来嵌在冰水交界处的生命遗骸及其他生命信号在足够厚的积雪、近乎真空、极低温度的保护下可在冰表浅层长期保存(Paranicas等, 2009; Patterson等, 2012; Nordheim等, 2018). 生命遗骸是一种特殊的生命信号, 特殊在原本

栖息在冰下的活体生命, 却被保存在非栖息地(即冰表浅层), 冰表浅层虽然生命潜力极低, 但某些局部能够显现的生命证据的性质和丰富性较高, 即“生命信号潜力”(Biosignature Potential)(German等, 2022b)较高, 因此也是有价值的潜力区域.

### 2.3 可探测对象

冰天体生命探测任务中可采集和分析的对象即可探测对象, 比如冰、海流、海水、地形、羽流、辐射、水中微粒、有机大分子、遗传物质等. 可探测对象被Exo-AUV的载荷感知或捕捉, 在不同类型的传感器下可表达为形态、结构、成分、运动、分布和理化性质等多维度的环境变量和参量, 包括但不限于: (1) 冰的温度、深度、厚度、孔隙度, 冰中的盐层、陨石、陨铁等异物; (2) 冰中水与冰下海水的温度、密度、盐度、深度、流速、pH值、透光度、辐照度、浊度和氧化还原电位; (3) 溶于水的二氧化碳、氧气、氢气、甲烷、氨、铵根、亚硝酸根、硝酸根、金属离子、有机大分子等物质的浓度; (4) 重力场、磁场、电磁辐射、不同空间尺度下的冰壳与海底的地质与地理特征等.

这些环境变量与参量可以描述冰中或水中的生境, 构建计算模型, 表征生命潜力或生命信号潜力, 是Exo-AUV规划生命探测任务的基础.

根据已知的地球生物学知识, 有一些环境变量和参量仅来自于“生命过程”, 而另一些既可来自于“生命过程”, 也可来自于“非生命过程”, 需要进一步进行生源性分析. NASA EL-SDT把这些可能暗示生命存在的测量笼统称为生命信号, 并对典型的生命信号进行了归纳, 包括但不限于(Neuveu等, 2018): (1) 达尔文式进化, 不同阶段的细胞形态; (2) 色素、DNA或RNA等功能性分子, 同手性(Homochirality)、聚电解质骨架(Polyelectrolyte Backbone)等功能性分子结构; (3) 营养的吸收和废物的排泄, 同位素的含量异常, 成对存在的氧化剂和还原剂, 复杂有机物分子和金属元素分布不符合热力学平衡态或动力学稳态的现象; (4) 潜在生物分子和单元(如ATP、藿烷、组氨酸)等“非生界”未发现的分子, 核酸低聚物、肽链、PAH(多环芳烃化合物)等复杂有机物; (5) 氨基酸、核碱基、脂质等生物聚合物的基本单元; (6) 受生命活动影响的地质特征, 如叠层石、丘状或微生物诱导的沉积构造.

## 2.4 探测方法

解译生命信号是来自生命过程还是非生命过程, 即生源性分析, 是地外生命探测的重要内容之一. 生源性分析常引用的判定原则是: “生命是最后的假设(Life is the hypothesis of last resort)”, Sagan等(1993)认为任何探测结果都应当排除所有的非生可能后才能判定为生命的证据. 然而在实际探测任务中, 该原则却不易应用.

在生命探测时, 直接获得DNA、RNA、色素和活细胞这种生源性强的生命信号(强生源信号)的可能性较低(Neveu等, 2018), 而发现营养物质、金属元素、氨基酸等生源性不强的生命信号的可能性更高, 这导致假阳结果的概率较高(Ménez等, 2018); 作为寡营养系统, 木卫二只能容纳极少量的单细胞生命, 即使存在生命, 其分布可能极其稀疏, 如果木卫二上的生命也如地球生命一样分布异质, 那么探测结果假阴的概率较高(Hoehler等, 2022); 低温系统中生命信号可能拥有更长的驻留时间(Residence Time), 比如出现氨基酸驻留时间接近甚至超过其手性变化周期, 将导致探测结果难以判断(Truong等, 2019), 而现代合成生物学的发展(Wolos等, 2020)会加剧这种争议性.

为了让木卫二着陆器自主完成高可信度的生源性分析, NASA生命探测的阶梯(Ladder of Life Detection, LoLD)研究小组筛选了15种相互正交(即相互独立、互相不可替代的)的典型生命信号, 构建了一个基于二元决策理论的专家诊断框架(Neveu等, 2018). 该框架下, 每一种生命信号的测量结果只有“阳性”或“阴性”两种互斥的结论, 一次完整的诊断要经历15次二元测量, 因此知识库中理论上存在32768(即 $2^{15}$ )种诊断结果. 由于每一种生命信号之间是相互正交的, 这既避免了重复无效的计算, 保证知识库中32768种结果是不重叠的; 更重要的是, 避免了由于单一生命信号生源性不强而导致的模棱两可的结果, 大大增加了诊断系统的可信度. 这套方法类似医生诊断患者的病灶, 但医生诊断关键优势在于拥有大量可信样本印证过的知识库, 合理训练后可以相对高效和准确地诊断. 然而, 天体生物学样本过于稀少, 导致该方法筛选的15项评判标准缺乏足量的样本证据和理论做支撑, 无法保证诊断结果均能逼近真实情况. 另一些学者认为二元诊断的方法不够严谨, 期待基于生命信号的集合,

运用贝叶斯方法或效用理论(Utility Theory)推测生命存在的概率(Pohorille和Sokolowska, 2020). LoLD研究组借鉴了反对者的观点, 进而提出了生命探测置信区间(Confidence of Life Detection Scale, CoLD)试图对典型生命信号的测量结果进行概率估计(Green等, 2021).

在地外未知的苛刻环境中, 有限的探测窗口下, 二元诊断方法采用若干标志性的特征测量组合, 具有突出的便捷性, 而贝叶斯方法基于大量统计数据做概率计算, 能够实现更多的参变量的分析验证, 在理论上更具说服力. 然而, 如果考虑实际应用场景, 这些方法仍不完善. 首先, 考虑到强生源性信号和活体生命分布的稀疏性和异质性, 在木卫二巨大的全球性冰海空间中随机采样, 获得弱生源信号的可能性更高, 而基于这样的测量数据集, 无论采用二元诊断框架判决, 还是采用贝叶斯方法计算分析, 其结论效力均存疑. 此外, 这两种方法均依赖地球相似环境建立的知识库或标准数据集. 然而, 任何生源性分析方法, 如果最终没有在木卫二上得到验证, 仅仅基于地球标准数据集, 通过探测器可携带的少量科学载荷, 在苛刻的环境下自主进行生源性分析, 其结果也是存疑的.

本研究认为探测是包含假设、采样、分析和验证的过程. 如果仅依赖生源性分析, 而忽略了另外3个重要环节, 那么未来将很难在木卫二等冰天体上找到强生源信号或活体生命, 探测结果的可信度将大打折扣. 为了进一步提升探测能力, 本研究在设定科学目标、归纳可探测对象、分析潜力区域、探讨生源性分析后, 最终在此提出了一种冰天体生命探测方法(图1).

假设地球生物学理论在冰天体依然适用. 使用地球上相似环境中微生物的分布和相关环境变量和参量, 构建生态位模型(Ecological Niche Model, ENM)推测物种的生命需求, 如果将结果投射到冰天体潜力区域的数据集合中, 可以进而推测功能相似物种的时空分布和分布概率. 通过不断扩充相似环境中不同物种的模型库, 可以推测在冰天体环境中潜在物种的多样性和生产力水平, 即生命潜力(见图1假设1), 如发现活体生命则可验证生命潜力假设(见图1验证1).

冰天体上有些潜力区域可能会保留生命的遗骸、碎片、排泄物或活动痕迹, 还有一些地形特征可能会富集生命所需的营养物质, 利用相似环境建立的模型可以推测生命信号潜力(见图1假设2), 并通过采集的

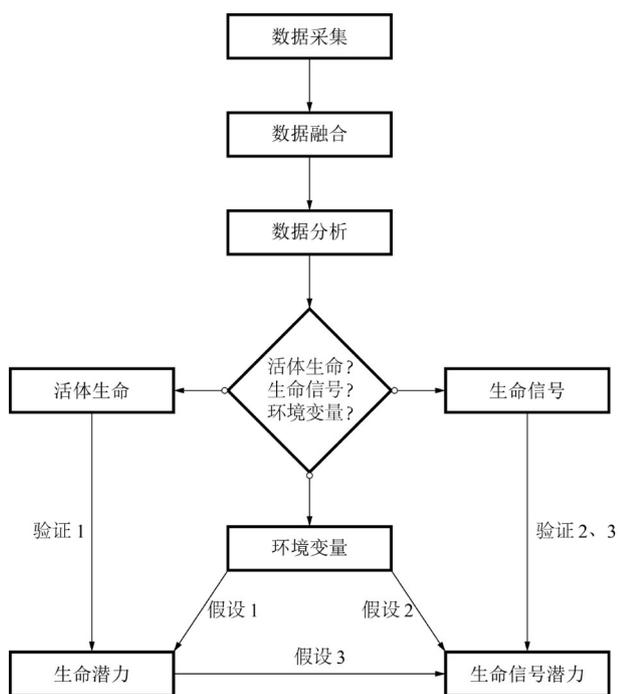


图 1 一种冰天体生命探测方法

生命信号验证假设(见图1验证2)。

地球生命的分布是高度异质的,但生命会随环境变化、转移和损耗(Hoehler等, 2022),在载荷的感知下表达为某些生命信号,这些生命信号在水中往往以生命为中心分布。根据相似环境中的生命信号与生命的空间分布的关系,通过生命潜力(见图1假设1)可以推测生命信号潜力(见图1假设3),在潜力区域发现假设的生命信号即可验证生命信号潜力(见图1验证3),并修正对生命潜力的假设。

应用本方法,研究人员可以利用地球相似环境的ENM推测冰天体局部区域的生命潜力,筛选潜力区域,并发现潜力区域中生命潜力较高的局部微区,有助于高效地采集到生源性强的数据;基于生态、发育、代谢、遗传以及前生命化学系统的理论模型,实现多对象、多尺度、多维度的数据采集和分析,发现关键环境变量和参量,以及生源性强、相互正交的生命信号,甚至活体生命;通过实测数据建立冰天体生命探测的数据模型,验证、证伪和修正初始假设,逐步提升探测效率和分析的可信度。

Exo-AUV在水下具有突出运动优势,可定深、定速、定向航行或滑翔覆盖大尺度空间,还能在局部定点悬停或栖驻;可搭载多种遥测或原位数据采集器,

以及多学科的分析仪器;具有先进的自主性,可以通过假设、采集、分析和验证闭环操作,自主学习并升级计算模型。结合本研究提出的探测方法,Exo-AUV能够充分发挥其优势和潜力,帮助行星科学家和天体生物学家找到强生源信号甚至活体生命,验证关于生命潜力的假设。

## 2.5 关于前生命化学探测

显然,组成生命系统的基本单位,特别是核糖体、酶等功能性蛋白质和遗传物质的前体,以及一些基础反应机制,应在生命诞生前出现。基于系统化学和合成生物学等新领域的研究成果,以生命潜力为科学目标的探测可以尝试把关注点从生命的生存条件切换为某些与生命诞生相关的化学反应的发生条件(物质与环境条件)。

然而,前生命化学系统的探测既不能像生命探测那样可以参考地球上相似环境的生态学理论和知识库,也无法通过罕见的化石记录和生物学的系统发育树来穿越数十亿年的历史迷雾猜测何时、何地、如何、曾发生了什么。前生命化学反应还被后来诞生的生化反应所抑制和替代(Barge等, 2022)。科学界至今仍难以书写地球生命诞生的编年史,甚至难以还原当时的物质与环境条件。

本研究侧重于通过环境变量和参量推测和发现强生源信号,然后逐级递进发现生命;认为以生命潜力为科学目标的探测未来有希望应用于研究生命诞生和前生命化学系统,但并不是本研究的重点。

## 3 Exo-AUV冰天体生命探测任务的场景条件与技术要求

上文已探讨了生命探测任务的4大基础设定,即科学目标、潜力区域、可探测对象和探测方法。Exo-AUV的探测任务可理解为:在冰天体的冰中、冰水交界、海底和海底深处等潜力区域航行,结合远端遥测和近端原位感知技术,长时间自主采集和分析可探测的环境变量和参量,利用地球相似环境的ENM假设生命和生命信号潜力,通过多对象、多尺度、多维度的生源性分析和验证,发现相互正交、生源性强的生命信号或直接发现活体生命来验证假设。

把Exo-AUV从地球布放至木卫二的冰下海洋无

疑是前所未有的挑战。为此, NASA和DLR设想了一套探测系统, 包含: 重型运载火箭、环绕器、着陆器、穿冰器和水下探测器共5个主要装备, 整个探测任务由发射、行星际飞行、环绕、着陆、穿冰和水下作业6步构成(Cwik等, 2018)。本研究参考该系统, 以木卫二为例, 尝试着重探讨穿冰入水和水下作业任务。

本研究先将任务拆解为若干作业场景, 再把每个作业场景解构为: 作业环境、被测对象、关键操作和探测器本体4类信息, 这些信息的集合称为场景条件。此外, 本研究从探测系统的角度探讨了一些会影响探测结果的场景条件。场景条件与探测方法将共同决定: Exo-AUV及其穿冰载具如何自主抵达哪些潜力区域, 如何自主采集和分析哪些可探测对象, 如何将哪些数据传回地球? 这些问题将启发本研究关于Exo-AUV的技术要求和作业概念的思考。

### 3.1 穿冰探测

作为Exo-AUV的穿冰载具, 穿冰器将会在着陆器着陆后适时启动, 自主穿冰入水并沿途探测。本节探讨穿冰器在穿冰探测过程中的部分关键场景条件和技术要求。

木卫二外层为冰壳, 根据厚壳理论(Thick Shell Theory), 其厚度可能超过100km; 即使依据薄壳理论(Thin Shell Theory), 冰壳也厚达近10km(Billings和Kattenhorn, 2005)。冰壳可分为3层: 最上层为传导层, 冰的温度低(约100K)、硬度大、异物较多、穿冰难度大; 中间为对流层, 物理性质类似地球上的冰川冰; 第三层为疏松层, 孔隙度高, 冰的温度高, 最底部温度约为273K(Nimmo和Pappalardo, 2016)。

冰壳也像地壳一样, 板块之间存在运动、挤压、层叠甚至上下翻转, 翻转过的冰表浅层可能保留了水下的生命信号。暴露的生命信号会被辐射破坏, 但在冰雪的遮蔽下可能得以保存, 富集羽流沉降物的冰表浅层具有生命信号潜力。此外, 冰中的卤水囊、冰下湖, 以及穿冰融水, 可能富含生命信号甚至活体生命(Pappalardo等, 1998; McKinnon, 1999; Marion等, 2003; Pappalardo和Barr, 2004; Collins和Nimmo, 2009; Ashkenazy等, 2018)。

在穿冰过程中, 穿冰器可采用视觉与光谱成像对冰壳环境成像, 采集沿途的环境信息和生命信号; 使用机载系统采集水样温度、盐度、压力、密度、离子

浓度、pH值和氧化还原电位等理化属性; 利用显微镜和拉曼光谱对水样中的微粒采集形态, 结构与化学信息; 分离和纯化后的样品可进行质谱分析, 如发现遗传物质可进行基因测序; 最后对生命信号完成生源性分析(Dachwald等, 2020; Lawrence等, 2023)。

探测器如果仅依靠传统太阳能电池板供电, 难以穿透至少数公里厚的冰壳。小型模块化核裂变反应堆(SMR)和放射性同位素热电机(RTG)是潜在的能源方案, SMR发电产生的“废热”有助于热法穿冰, RTG的技术更成熟, 但能否保障长期作业有待论证(Stone等, 2018)。

热法、激光和机械钻法是被探讨最多的穿冰壳方法。采用热法穿透上层低温冰的速度慢、耗能大, 但热法可以全程利用SMR辐射的“废热”, 既不需要考虑钻具的损耗和寿命, 也不需要考虑碎屑转运的问题。如果遇到盐矿、陨铁和陨石等异物障碍, 可用喷嘴辅助转向或清障。冰对1050nm激光的吸收效果远大于水, 激光穿冰可解决热法在冰表的真空闪蒸问题。光纤的光通量较大, 可以在传输大量光能的同时减低缆线的总重, 但光纤中的光能在冰壳中耗散很强, 每1km光纤约耗散12%的光能到冰壳中, 因此不宜用激光进行大纵深穿冰。机械钻法可以把上层低温冰直接切碎, 具有更快的穿冰速度, 对于一些体量小的盐矿也可以利用钻具直接穿透, 但机械钻法必须要转运碎屑以避免通道堵塞。大纵深的钻进还要考虑机械磨损问题。当下的研究趋势是: 先将激光或机械钻与热法混合穿透低温传导层, 再依靠热法穿透厚度较大的对流层和高温的疏松层。激光或钻头可以克服冰表真空闪蒸和上层低温冰吸热量大等问题, 还可以有效避免光能耗散、碎屑阻塞和机械损耗等问题, 混合穿冰(Hybrid Penetration)应是Exo-AUV在木卫二冰下布放的最优解, 而低温传导层的厚度将是影响方案选择的关键因素(Stone等, 2020)。

无论何种方法, 穿冰能耗和穿冰速度均与穿冰器的截面积相关, 截面积越大、耗能越大、速度越慢, 因此穿冰器形态均为细长体, 但如果细长比(长度比直径)过大, 也会因表面积过大而造成热能的浪费(Aamot, 1968)。穿冰器的型式决定了它内部搭载Exo-AUV的舱段也只能是细长(柱)形, 这直接限制了Exo-AUV的设计型式(Durka等, 2022)。

冰下的定位、导航与通讯十分重要。穿冰器可应

用声呐或微波(合成孔径雷达)等传感器计算自身在冰中的位姿,判断障碍物的尺寸、位置,规划路径、主动避障,在预定区域入水.释放Exo-AUV后,穿冰器可作为水下基站为Exo-AUV提供导航、通讯、数据交换和充电服务(Waldmann等, 2018).

### 3.2 冰水交界探测

穿冰器在下降时可通过声呐或合成孔径雷达测量与水层的距离,逐渐减速直至穿透冰壳时停止下降.穿冰器浸入水中的部分可适时释放Exo-AUV执行水下探测.本节探讨Exo-AUV在冰水交界探测过程中的部分关键场景条件和技术要求.

冰水交界便是冰壳的疏松层与冰下海洋交界的区域.此处的冰、卤水和海水混合物进行着持续交替的结晶和溶解过程,因此这里也被称为共晶界面(Deming, 2002).冰水交界处的静水压力约为冰壳的压力,冰和水的温度约等于273K,水的密度接近于纯水.尽管水动力泵的缘故,疏松层的底部总体是平整的(Jansen等, 2021),但卤水会因重力或结晶等原因从冰壳底部排入海中,也可能存在由于冰壳板块运动造成的洞穴、裂缝、冰下山峰或盆地等地形(Pappalardo和Barr, 2004).

木卫二是固态卫星,具有岩石地幔甚至金属核心,具备生命所需的碳、氢、氧、氮、磷、硫等基础元素,和具有催化效果的过渡金属元素.这些物质并未像火星一样暴露在缺乏大气保护的地表,而是被海洋溶解,被冰壳保护在内部(Hand等, 2020).冰壳表面有来自木卫一的硫(Carlson等, 1999),以及冰壳在阿尔法( $\alpha$ )和贝塔( $\beta$ )粒子辐射下形成的过氧化氢、氧气和游离氧(Delitsky和Lane, 1998),这些氧化剂会向下渗透到海洋,或者由于冰壳运动局部翻转直接进入海洋.海底热泉羽流中的硫化氢、氢气,以及有机碳等还原剂会随着海流上升至冰水交界处(Bire等, 2022).氧化剂和还原剂的共存构成了热力学非平衡态条件,使化学能驱动生化反应自发进行;作为生化反应的最佳溶剂,水将来自地幔的各种元素运输到冰水交界处参与反应(Jansen等, 2021).冰水交界处疏松多孔的共晶界面为生命提供了区隔化的庇护所和巨大的催化反应表面积;不仅能够保存营养物质,还可以通过卤水排泄或水的冲洗排出代谢物;冰水分界处陡峭的浓度梯度,既能满足生命对氧化剂的需求,还能防止生命被氧化致死(Martin和McMinn, 2018).冰水交界生的生命和生命

信号潜力很高,有可能发现生源性强的生命信号,甚至活体生命和前生命化学系统.

地球生命的时空分布高度异质,因而在寡营养的未知环境中寻找微生物十分困难;但生命都会随环境而变化、转移和损耗,表达为可探测的生命信号,并在水中以生命为中心扩散(Hoehler等, 2022),结合基础环境信息,运用本研究提出的探测方法,Exo-AUV可以假设生命潜力,还可以推测潜在生命的空间分布和概率.此外,在冰中和冰下水中,生命稀疏地分布在三维空间中,而穿冰器探测受限于近乎一维的运动轨迹,Exo-AUV虽然可以三维作业,但可探测目标的稀疏性对其续航力要求很高;木卫二的冰水交界汇集了多项生命条件,生命潜力较高,提供了一个相对友好、宽广、易抵近的水下二维探测界面.在地球的极地和寒地,冰水交界处微生物(比如硅藻)的分布在不同观测尺度下呈现不同的特征与规律,这种现象跨越了从大于10km到小于1 $\mu$ m的多个尺度(Cimoli等, 2020);Exo-AUV在水下的机动性、稳定性和自主性具有优势,既能够进行6自由度运动,并能够大范围滑翔,对10km以上的海洋环境进行生物地球化学探测,还能够在水中悬停、顶栖或底栖对微区进行原位显微观测和分子生物学实验,运用本研究提出的探测方法根据分析结果自主决定探测对象,规划任务和运动路径.最后,在所有水下潜力区域中,冰水交界处的可探测范围最大、作业深度最浅、静水压力最小,这对艇体及载荷的开发和操作是十分友好的.

根据本研究提出的探测方法,Exo-AUV可先利用声呐对冰底进行大范围远场梳状扫描,识别冰脊、底辟、裂缝、洞穴、卤水排泄及其他地质地理特征,整个航行过程中持续进行环境参数采集,如:温度、盐度、浊度、压力、密度、离子浓度、pH值和氧化还原电位等理化属性;然后,根据ENM筛选生命潜力或生命信号潜力高的区域,并规划探测任务;此后,依次对潜力区域进行视觉、激光和光谱的近场扫描,降低航速并提高扫描分辨率和环境参数的采样率,内部荧光显微镜和拉曼光谱仪会对采集到的水样进行分析,寻找潜在的营养和代谢物,复杂的有机物大分子,以及内部含有发光或可染色物质、非布朗运动、具有类细胞形态的微粒(Nadeau等, 2016);随后,对于含有强生命信号的水样进行机载纯化、质谱分析和基因测序,获取更多的形态、结构、成分和活动信息,进一步分

析其生源性;最后,如确认发现微生物的基因片段、活体细胞甚至微生物群落,可顶栖至冰下,采用体外显微镜和拉曼探针对局部微区进行原位观测,逐步验证生命潜力的假设。

木星系与地球的平均距离约 $7.8 \times 10^8 \text{ km}$ ,通讯延迟超过0.5h,地球上的科学团队无法实时控制或频繁干预冰下作业,采集的样品如果返回地球实验室则需要历经数年。因此,Exo-AUV若要完成多对象、多尺度、多维度的生命探测任务,必须实现“科学自主(Science Autonomy)”(Wronkiewicz等, 2024)。此外,Exo-AUV在外太阳系作业,可携带的能源和物料有限,更无法依赖地球补给,因而不能对所有目标详细探测,必须自主规划任务和运动路径。

在地球,AUV可通过航位推算和海底地形辅助定位和导航,但是在长距离航行中的积累误差和偏移很大,需要长基线、短基线或超短基线等声学仪器提供定位,或者上浮至水面通过无线电获取卫星信号对定位纠偏(Barker等, 2020)。木卫二的冰壳将海洋与宇宙空间隔开,无线电信号会被冰壳和海洋完全吸收,冰下特征很难通过望远镜或轨道器直接获取。Exo-AUV在木卫二冰下入水时,既没有地图或先验数据辅助,也无法上浮与轨道器进行直接通讯定位;或将主要依赖航位推算(Dead Reckoning, DR)、惯性导航系统(Inertial Measurement Unit, IMU)和水下同步定位与建图技术(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)定位和导航,并借助冰下基站(穿冰器)提供的单信标声学信号进行定位纠偏;此外,随着在航行中持续采集冰底拓扑、冰下海洋环境变量和参量,甚至海底地形(或深度)等多维辅助信息,Exo-AUV或将逐步提升定位和导航的鲁棒性。

由于电磁波会被水吸收,声学信号是水中应用最广的通讯方式,Exo-AUV应在必要时刻通过声呐与冰下基站进行通讯,冰下基站会将信息通过电缆或光纤传递给冰面基站,冰面基站通过无线电信号将信息传递给环绕器或在特定通讯窗口与地球指挥中心直接通讯。当下,地外海洋的声场情况未知,而长距离的水下声学通信存在带宽窄、信噪比低、延迟长且误码率较高等局限,Exo-AUV应能适时自主返航至冰下基站,通过视觉或激光辅助与其对接,利用光纤传输数据量较大的探测信息,再由冰下基站发送至地球。如果Exo-AUV携带可充电电池,也可以在冰下基站边传输

数据边充电。地球的指挥中心也可以通过冰下基站与Exo-AUV的接口通讯、数据传输、分配任务、检测或更新固件。

### 3.3 海底探测

地球的海底曾被认为是生命的荒漠,直到20世纪70年代末Alvin号潜水器发现了海底热泉和以化能自养微生物为初级生产力的生态系统(Karl等, 1980)。木卫二的地质运动较活跃,很可能和地球一样存在海底热泉(Russell等, 2014)。海底热液区的生命潜力很高,很可能发现活体生命或者前生命化学系统(Vance和Melwani Daswani, 2020)。木卫二的海底环境条件苛刻,生命探测的作业场景复杂,对Exo-AUV提出了更多的技术要求。

木卫二的重力加速度约为 $1.3 \text{ m s}^{-2}$ ,木卫二的平均密度约为 $2989 \text{ kg m}^{-3}$ ,海水平均密度约为 $1050 \text{ kg m}^{-3}$ (Anderson等, 1998),海底的密度和盐度均会大于冰水交界处,水温会低于273K。木卫二冰水层的总厚度约为80~170km,海底静水压强约为109,200~232,050kPa。由于纯水在温度低于251K且压力高于210,000kPa时会形成冰-III(Ice III,是水的一种晶相,密度约为 $1,650 \text{ kg m}^{-3}$ ),因此如果冰水层总厚度超过153km,可能会形成冰-III可并沉积在木卫二海底(Marion等, 2003)。木卫二内部的潮汐运动和元素衰变会释放热量,这是海水能够维持液态的主要原因,其中一部分能量以化学能的形式储存在共价键中,可以驱动氧化还原反应,在无光的海底构成了生命系统的初级能量来源(Hand等, 2020)。

木卫二海底热液区的生命潜力较高:酸性海底热泉羽流富含硫化氢、有机碳、亚铁离子等还原剂,以及二氧化碳、硫单质、二氧化硫和硫酸盐等氧化剂(Kargel等, 2000);高温(>250°C)热液富含硫酸盐、硫化物和多种金属元素,遇低温海水冷却形成“黑烟囱”和热液金属矿床为化能自养微生物(如地球上的硫细菌和铁细菌等)提供理想生境(Jebbar等, 2020)。木卫二的矿物储量较丰富(Kuskov和Kronrod, 2005),海水从海底裂缝渗入岩层,与橄榄石、辉石等超镁铁质岩发生蛇纹岩反应,形成温度较低(<100°C)的碱性海底热泉,释放出钙镁离子和氢气(Russell, 2003);渗入地层的水受到海底深部元素衰变释放的阿尔法和贝塔粒子辐射,生成氧气和过氧化氢等氧化剂(Altair等, 2018);

热泉的热流和共存的氧化剂与还原剂,同时具有热力学非平衡态和动力学非稳态特征,是典型的耗散系统,能驱动羽流物、热液和海水发生反应,形成碳酸钙、碳酸镁沉积物,这些沉积物中有细密的微孔,不仅可以为化能自养微生物(如地球上的产甲烷菌和产乙酸菌)提供理想的生境,还为前生命化学反应提供了区隔化的空间和硫化亚铁半透膜,膜内外的质子梯度甚至被誉为生化反应的“第一推力”,微孔间的毛细管是天然的“流式反应炉”能够加速反应的速率,这些特征为地球古海洋碱性热泉生命诞生假说提供了支撑(Martin等, 2008). 另外,木卫二自转产生的科里奥利力会驱动海水冲刷海底岩石层,提升包括过渡金属在内各类元素的浸出率(Leaching Rate),促进水中生化反应的发生(Camprubi等, 2019).

木卫二的重力加速度虽然远低于地球,但其冰水层的总厚度远超地球海洋的深度,其最深处的海底静水压强可能达到地球最深处压强的2倍.地球上,AUV到过的海洋最深处(马里亚纳海沟底部)约为海面以下11km,静水压强约为11,000kPa,仅与木卫二水深80km处相当. Exo-AUV若要在木卫二海洋最深处航行并执行生命探测任务,如采用金属耐压壳体,其重量很可能会超过运载火箭的载重上限.当前,碳纤维有望应用在地球海底的最深处,但能否在木卫二海底最深处应用尚需探讨;软体结构潜器是当前另一个可能的方案,但如何提升软体潜器的艇体、载荷和自主性能,使其能够执行冰天体生命探测任务尚需发展.载荷系统(特别是采样系统和分析化学、细胞生物学和分子生物学的机载实验仪器),在高压、高盐、高温和低温海水中正常运行同样重要.

地球上的海底热泉通常沿地壳板块接触带分布,比如沿洋中脊、海沟和转换断层的海底热泉(German和Seyfried, 2014).然而,即便拥有丰富的地质和地理先验信息,在地球寻找深海热泉,仍需要借助大型船舶拖曳地震探测、AUV海底声学勘察和ROV抵近观察等多种手段共同完成.如果Exo-AUV在进入木卫二的冰下海洋前没有获得充足的先验信息,还可以通过来自海底的热液羽流来推测热液区位置.虽然木卫二的科里奥利力远小于地球,导致羽流的横向漂移较小,但由于木卫二海洋深度大,在较浅深度探测到的羽流截面积依然会非常大.按照传统的方法,Exo-AUV寻着羽流的源头方向盘旋下潜直至锁定热液区位置的航

程可能会长达数千公里.然而,羽流很可能不在冰下基站或上一个探测对象的正下方,Exo-AUV在地外海洋中只能通过大纵深地变浮力滑翔寻找可探测对象;当寻到热液区并采集了足量的数据后,Exo-AUV还有可能执行立刻返回冰下基站上传数据的任务,这对Exo-AUV的续航力和工作时长要求极高;如果可充电电池(如锂离子电池)难以支持Exo-AUV执行地外全海域空间的探测任务,RTG或者SMR可能是替代方案之一;此外,由于海底盐度高于冰水交界处,也可能存在温跃层,Exo-AUV既要潜入海底,又能返回冰下基站需要可变浮力设计.

热液区地形复杂,可探测对象常常富集在有限的三维空间内.当前已知的地球海底热泉烟囱最高可达20m(Christner等, 2006),自顶端至海床由多个热液喷口构成,有的热液区包含多个相邻的活跃烟囱,致使空间内的地形和理化梯度陡峭,创造了丰富的微小界面.化能自养微生物善于利用环境界面生存,在羽流中、喷口边缘、沉积物表面和热液矿床内部形成群落. Exo-AUV在发现并抵达木卫二的热液区后,可对羽流、喷口、烟囱外壁、沉积物矿床和海底深部等潜力热点(生命潜力高的局部微区)进行多对象、多维度和多尺度的生命探测,这对Exo-AUV的载荷系统提出了较高的技术要求.根据本研究提出的探测方法:首先,Exo-AUV可搭配声呐和视觉传感器(或激光雷达)对热液区进行由疏至密的三维扫描,识别地理和地质特征,同时采集环境信息(温度、盐度、压力、密度、离子浓度、pH值和氧化还原电位等理化属性);然后,根据ENM筛选生命潜力或生命信号潜力高的点位,规划后续采集任务;此后,抵近潜力高的“热点”微区,进行视觉和光谱的近场扫描,采集水样进行非侵入式和侵入式化学和生物学分析,判断其生源性;最后,可底栖,对海床进行地震探测,并可以通过钻探采集海底深部样品和信息.

热液区陡峭的三维地理和理化梯度、密集多样的可探测对象和复杂的探测任务对Exo-AUV的艇体性能也提出了较高的挑战.首先,Exo-AUV需要能够在冰下海洋中定深、定速、定向航行,适时可以定点悬停,具有较高的稳定性,实现基本的航行和探测任务;其次,考虑运行的经济性,应能大潜深变浮力滑翔,从而提升发现羽流和返航的能效;第三,应能高精度精细运动和采样,在必要时还可保持底栖姿态长时间原位

观测;最后,可以全天候执行采样和分析任务,甚至在必要时可进行射击、抓取和钻探等操作。

### 3.4 其他

上述3个典型作业场景在地球都有相似环境可以参考,如南极冰盖,极地和寒地的冰下湖泊与海洋,洋中脊、海沟和海底转换断层的热液区等(Arrigo, 2022)。然而,能够在地球相似环境中作业AUV并不意味着可以执行冰天体生命探测任务。本研究探讨的Exo-AUV及其穿冰载具虽然是冰天体生命探测任务的关键装备,但从全局视角观察,整套探测系统还包含运载火箭、环绕器和着陆器等装备,整套任务还包括火箭发射、行星际飞行、进入木卫二轨道和冰面着陆以及其他贯穿任务始终的关键环节,这些同样影响着Exo-AUV的研发。

首先,行星保护(Sherwood等, 2019)工作至关重要。任何从地球带入木卫二的生命及生命信号都将对整个生命探测任务产生不可逆转的破坏,复杂、漫长的探测周期使消毒杀菌工作充满挑战。

另外,在超长的服役周期内,辐射保护(Wang等, 2019)工作异常重要。包括Exo-AUV在内的整套探测系统在进入太空后都将暴露在宇宙射线中,而伽利略卫星的电磁辐射尤为强烈,超长的服役周期使得辐射保护工作更加困难。

此外,载荷的微型化和轻量化十分重要。载荷越重,火箭达到理想的速度所需的燃料就越多,飞船减速进入目标轨道所需燃料也越多。然而,生命探测任务的复杂性对载荷的需求前所未有,这使得装备小型化和轻量化工作异常艰巨。

如何应对带宽壁垒(Bandwidth Barrier)亦十分重要。生命探测要求多对象、多尺度和多维度地探测,然而通讯带宽却极窄(木卫二着陆器与地球间的通讯带宽仅有 $56\text{Kbit s}^{-1}$ )。基于探测任务的总体要求,先将巨量的数据智能归纳并排序,再在有限的带宽下发送,是通讯和科学智能(Science Autonomy)的难点(Wronkiewicz等, 2024)。

最后,航天工业具有独特的行业属性和技术特点,从型号论证、研发、设计、验证、制造到作业等阶段的技术标准和评价体系均与AUV所属的船舶与海洋工业有诸多不同,会对传统的AUV技术范式提出新的要求。

## 4 地外潜航器自主Exo-AUV

Exo-AUV的提出已超过25年(Horvath等, 1997; Carsey等, 1999), NASA与DLR等机构是该领域的先驱。本研究在探讨了冰天体生命任务的探测方法、场景条件和技术要求后,回顾了已开发的Exo-AUV,提出了一套Exo-AUV概念开发技术路线和一套多Exo-AUV系统作业概念(ConOps for MEAS)。

### 4.1 研究历程

木卫二的冰下海洋被证实后, NASA率先提出了一种能够穿冰入水的探测器概念,包含Cryobot (由Philberth Probe演化)和Hydrobot,前者属于一种穿冰器(Ice Penetrator),后者是一种Exo-AUV。Cryobot既是冰中探测器,还是Hydrobot的穿冰载具,Hydrobot将在水中释放并开展生命探测(Aamot, 1968; Horvath等, 1997; Muscettola等, 1998; Zimmerman等, 2001)。

NASA喷气推进实验室(Jet Propulsion Laboratory, 简称JPL)开发了多型新概念潜航器,其中BRUIE(Murphy, 2021)是一种轻型两轮冰下探测车,可以紧贴冰下行驶,抵近观察冰水交界的目标; Exobiology Extant Life Surveyor(简称EELS)(Schreiber等, 2020; Vaquero等, 2024)是专门为土卫二开发的蛇形潜航器,可自主爬入泉眼并潜至水中; Titan Turtle(Oleson等, 2020)是专门应用在土卫六烷烃湖的Exo-AUV,由专用无人机投放,可潜入海底、也可在海面航行; Probe using Radioisotopes for Icy Moons Exploration (简称PRIME)是一款采用了RTG电源的热钻混合型穿冰器(Bairstow等, 2012); Sensing with Independent Micro-swimmers (简称SWIM)是为PRIME穿冰器设计的变浮力微型Exo-AUV (Schaler等, 2022), 单体重约70g, 长度约12cm, 既可在冰水交界处定深、定速、定向航行,也可变浮力滑翔,航速约 $1\text{m s}^{-1}$ , 工作时长约2h, PRIME内部可装载50艘SWIM,旨在通过交替作业采集不同时段的环境变量和参量(1木卫二日约为85地球时)。JPL与伍兹霍尔海洋研究所(Woods Hole Oceanography Institute, 简称WHOI)正在联合开发Orpheus级微小型全海深Exo-AUV(Shank等, 2019), 设计重量约为250kg (Grebmeier, 2022), 拥有机械手、可底栖、可协同作业等优势功能,采用NASA提供的导航与控制系统,应用复合材料外壳,将在马里亚纳海沟底部作业。

美国佐治亚理工大学(Georgia Institute of Technology, Gatech)在NASA的资助下开发了一种鱼雷型可遥控Exo-AUV, 即IceFin(Meister等, 2018), 能够探测冰水交界处, 并通过数百米深的圆形冰洞进入了南极思韦茨冰川(Thwaites Glacier)下方的海洋(Schmidt等, 2023).

美国斯通宇航公司(Stone Aerospace Inc., 简称SAI)在NASA的资助下相继开发了VALKYRIE(Stone等, 2014)、ARCHIMEDES(Stone等, 2020)和PRO-METHEUS(Richmond等, 2021)共3款穿冰器, 以及DepthX(Kumagai, 2007)、Endurance(Gulati等, 2010)、Atemis(Kimball等, 2018)和Sunfish(Richmond等, 2018)共4款Exo-AUV. 完成了人类首次水下洞穴的三维同步定位建图(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM)和水下生命地球化学建图(Bio-geochemical Mapping, BGCM)等工作(Fairfield等, 2007; Sahl等, 2010).

德国DLR资助了木卫二探索者(Europa Explorer, 简称EurEx)、土卫二探索者(Enceladus Explorer, EnEx)和冰川湖探索与快速穿冰技术(Technologies for Rapid Ice Penetration and subglacial Lake Exploration, TRIPLE)等研究, 并开发了多型Exo-AUV. 其中, ROBEX Tramper(Wenzhöfer等, 2016)履带车能在海底长时作业; ROBEX MOTH Glider(Waldman等, 2014)采用翼身设计, 可在海中大范围滑翔; AUVx(Hanff等, 2017)足够微小, 但功能有限, 可作为冰下信标辅助交汇; DeepLeng AUV(Hildebrandt等, 2013)采用鱼雷型艇体, 可配合IceShuttle Teredo(Wirtz和Hildebrandt, 2016)穿冰器使用. nanoAUV 2和IceCraft 2(Nitsh和Meckel, 2023)穿冰器是DLR的最新设计, 其中nanoAUV 2也采用了鱼雷型艇体, 但配备了滑翔翼, 艇长约为0.5m, 直径约为0.1m, 航速约 $1\text{m s}^{-1}$ , 既能够定深、定速、定向航行又能够变浮力滑翔, 整套系统计划于2028年在南极冰盖Dome-C进行野外实验.

## 4.2 存在问题

NASA在1975年就发射了维京号探测器(Viking 1和Viking 2), 拉开了利用航天器探测地外生命的历史序幕(Klein等, 1976; Clark, 2001), 但最终由于对生命探测的认知局限导致的“失意”影响深远, 其后近50年没有新的地外生命原位探测专项任务.

回溯历史, 展望未来的木星系和土星系生命探测任务, 当下已开发的Exo-AUV多数仍基于传统AUV的艇型和载荷, 执行预设的单一作业内容, 被动地随航采集环境变量和参量. 这些设备远未充分发挥其潜力和优势: 可在不同海域空间航行, 进行多尺度探测; 可原位实现多对象、多维度数据采集, 机载实现多学科分析; 可高度自主规划和执行复杂的水下生命探测任务.

本研究认为, 导致上述情况的原因可能有3点: 其一, 尚无基于Exo-AUV的冰天体生命探测方法; 其二, 尚未全面、深入地归纳和探讨Exo-AUV执行冰天体生命探测任务的潜在场景条件; 其三, 尚无基于冰天体生命探测任务的Exo-AUV概念开发技术路线.

## 4.3 一种Exo-AUV概念开发技术路线

本研究提出了一套基于未来冰天体生命探测任务的Exo-AUV概念开发技术路线(详见图2). 该路线将Exo-AUV的概念开发分为任务层和方案层, 任务层可帮助开发者分析影响概念设计的任务元素. 而方案层则帮助开发者基于任务要求, 结合Exo-AUV作业的场景条件, 提炼技术要求, 设计和评价Exo-AUV的概念.

在任务层中, 首要的元素便是确定“探什么?”即科学目标, 这是研发设计工作的基础; 然后, 在此基础上, 结合冰天体的基本环境条件、科学假设、Exo-AUV的探测能力, 研究“在哪? 测什么? 怎么测?”(即潜力区域、可探测对象和探测方法).

基于科学目标和探测方法, Exo-AUV在潜力区域中航行、采集、分析可探测对象, 验证假设的过程便是其作业场景. 作业场景可解析为环境条件、Exo-AUV本体、被测对象和关键操作约4类场景条件. 不

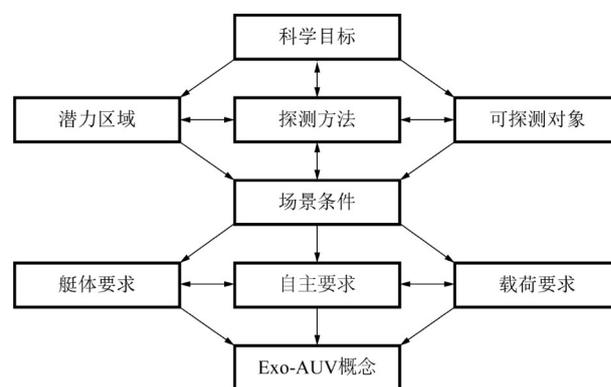


图2 Exo-AUV概念开发技术路线简图

同的场景条件组合对Exo-AUV的艇体、载荷和自主要求不同。提炼这些技术要求便可以设计或评价潜在的概念, 而一个优秀的概念应尽可能多地覆盖目标区域和对象, 依照探测方法, 高效、优质地实现科学目标。

值得关注的是, 任务的科学设定会随着人类对冰天体认知的逐渐加深而变化, 而装备与技术的开发也应随之迭代, 避免由于认知偏差而采用了不准确甚至错误的技术路线或方案, 避免孤立地解决局部技术或工程问题而忽视任务的全局。

#### 4.4 一种多Exo-AUV系统作业概念(ConOps for MEAS)

在当前的技术范式下, 开发一艘满足航天工业标准, 经过数年的行星际飞行并成功降落至木卫二表面预定位置后, 还能够穿透数十公里厚的冰壳进入冰下海洋, 长时间自主执行多对象、多尺度、多维度的生命探测任务, 并及时将探测结果传回地球的Exo-AUV, 将极具挑战。然而, 在满足生命探测任务技术要求的前提下, 还要保证Exo-AUV能够放入穿冰器内部, 整个系统的体积和重量还不能超过木星系任务的运载能力, 这些苛刻的要求使得Exo-AUV及其穿冰载具可选的概念十分有限。

通过梳理Exo-AUV的技术要求, 可以发现两个突出特点: 首先, 技术要求项的数量、系统和操作的复杂度胜于历史上曾出现过的任何AUV。其次, 其中多项技术要求对总体概念有截然不同的影响, 甚至很难兼容: 比如, 冰中、冰下和海底3个潜力区域对Exo-AUV的艇体和载荷性能的要求是完全不同的; 而且, 冰壳、冰底和海流等对象的特征长度较大, 需要长距离航行, 并随航自适应采样, 而局部及微区的化学、生物和地质相关对象的特征长度较小, 需要长时间、原位、高精度观测。若由1艘Exo-AUV完成全部任务, 恐怕将无法避免不同场景下载荷的闲置, 空间、重量和能源的浪费, 个体操纵性和鲁棒性、系统生存力和作业效率的降低。

综上, 潜力区域和可探测对象的复杂性, 与木星系探测任务有限的运载能力和较高的风险性构成了Exo-AUV概念开发的核心矛盾。基于本研究提出的探测方法和场景解析, 将潜力区域和可探测对象进一步细分, 将艇体与载荷的性能和功能细分, 整合匹配性高的技

术要求, 开发细分场景下的子Exo-AUV, 发挥多Exo-AUV系统(Multiple Exo-AUV System, MEAS)在空间、重量和能源经济性, 个体操纵性和鲁棒性、集体协同作业效率和生存力高的多方面优势。此外, 通过集成电路和微机电系统(MEMS)技术, 使温盐深仪(CDT)、声呐、激光雷达、摄像机、光谱仪、质谱仪、荧光显微镜、基因测序仪、微流控系统等载荷集成成为芯片实验室(Lab on a Chip, LoC), 将大大降低艇体和载荷的体积、功率和重量。限于本文的研究范围, 我们将侧重探讨多Exo-AUV系统作业概念(ConOps for MEAS)。

根据特征长度的大小, 本研究将Exo-AUV(含穿冰载具)的可探测对象分为两类(详见表1)。基于本研究提出的探测方法, 在冰下或海底, 可先探测海水或地形等特征长度较大的对象, 并由此在较大空间尺度上构建ENM; 然后, 在生命潜力较高的区域探测局部地形、构造和微观特征, 验证生命潜力; 最后, 通过逐一完成小尺度空间探测来验证较大尺度空间下的生命潜力。上述探测需要Exo-AUV既能够在较大尺度的二维平面或三维立体空间中梳状扫描、定深定速定向航行和滑翔, 对较大的可探测对象进行采样和分析, 还能够在小尺度平面或空间中稳定地悬停、顶栖或底栖, 长时间、原位、精细地作业。

不同的作业空间、作业环境、可探测对象、采样程序和航行方式适配不同的载荷模块和艇体型式。本研究根据可探测对象的特征长度大小将载荷模块分为两类(详见表1), 即勘测(Survey)模块(简称: 模块S)和观测(Observation)模块(简称: 模块O), 在下文分别为其提出了适配的艇体型式, 最终实现2艘Exo-AUV和1套穿冰载具的协作, 共同完成冰中和冰水交界, 甚至海底的生命探测任务(详见图3)。

对于冰中探测, 鱼雷型回转体是穿冰载具最适合的艇体型式。由于Exo-AUV完全置于其内部, 且运动路线为沿重力向下近似为一维垂线, 穿冰载具可通过声学导航和智能控制系统规划下潜路径, 控制航向、速度和位姿, 穿透冰层, 并调用Exo-AUV的载荷模块沿途自适应采样和分析。在冰下基站模式下, 穿冰载具将提供导航、通信、数据交互和充电服务。本研究将Exo-AUV的穿冰载具称为Exo-AUV Carrier(简称EAC)。

一艘航速适中、续航力大、航速/航向/位姿稳定

表 1 不同潜力区域中的可探测对象和科学载荷

可探测对象	分辨率/ 特征长度	维度	科学载荷
潜力区域1: 冰中 (大、中尺度和小尺度)			
空间特征		一维垂线(近似)	
较大对象	冰裂缝、断层	dm/≥km	模块S: 辐射计、地震仪、磁力计、重力仪、声呐、温盐深仪、密度计、压力计、pH值测试仪、溶解氧测试仪、光度计、浊度计
	湖泊、河流	dm/≥km	
	盐矿	dm/≥km	
较小对象	冰中局部构造	cm/m	模块O: 激光雷达、深度相机 体外光谱成像仪、体外光学显微镜 取样针、枪管、钻头 离子选择电极、氧化还原电位测试仪 体内拉曼光谱仪、体内荧光体积显微镜 质谱/色谱仪 基因测序仪
	陨石、碎屑等固体	mm/dm	
	卤水囊等局部微区	mm/cm	
	融水	mm/cm	
	水中微粒	sub μm/mm	
	有机大分子	nm/sub μm	
	遗传物质	nm/sub μm	
潜力区域2: 冰水交界 (大、中尺度和小尺度)			
空间特征		二维平面(近似)	
较大对象	海流	dm/≥km	模块S: 辐射计、地震仪、磁力计、重力仪、声呐、温盐深仪、密度计、压力计、pH值测试仪、溶解氧测试仪、光度计、浊度计
	海水	dm/≥km	
	冰底地形	dm/≥km	
较小对象	冰底局部构造	cm/m	模块O: 激光雷达、深度相机 体外光谱成像仪、体外光学显微镜 取样针、枪管、钻头 离子选择电极、氧化还原电位测试仪 体内拉曼光谱仪、体内荧光体积显微镜 质谱/色谱仪 基因测序仪
	卤水排泄	mm/dm	
	共晶界面等微区	mm/cm	
	微区水	mm/cm	
	水中微粒	sub μm/mm	
	有机大分子	nm/sub μm	
	遗传物质	nm/sub μm	
潜力区域3: 海底 (大、中尺度和小尺度)			
空间特征		三维立体, 大潜深	
较大对象	海流	dm/≥km	模块S: 辐射计、地震仪、磁力计、重力仪、声呐、温盐深仪、密度计、压力计、pH值测试仪、溶解氧测试仪、光度计、浊度计
	海水、羽流	dm/≥km	
	热液区地形	dm/≥km	
较小对象	羽流柱	cm/m	模块O: 激光雷达、深度相机 体外光谱成像仪、体外光学显微镜 取样针、枪管、钻头 离子选择电极、氧化还原电位测试仪 体内拉曼光谱仪、体内荧光体积显微镜 质谱/色谱仪 基因测序仪
	热液喷口	mm/dm	
	沉积物等局部微区	mm/cm	
	微区水	mm/cm	
	水中微粒	sub μm/mm	
	有机大分子	nm/sub μm	
	遗传物质	nm/sub μm	

性高、可通过变浮力适应冰下和海底温跃层的艇体(比如扁平型设计), 在搭载模块S后, 可以完成冰下大尺度二维平面的探测任务。如能克服木卫二海底巨大的静水压力, 通过加装滑翔翼或者采用翼身艇体, 还

能够覆盖海底的大尺度探测任务。本研究将采用上述艇体、搭载模块S的Exo-AUV简称为EAS。

冰下小尺度二维平面探测对航速和续航力并无突出要求, 但艇体必须充分发挥模块O的功能和性能, 能

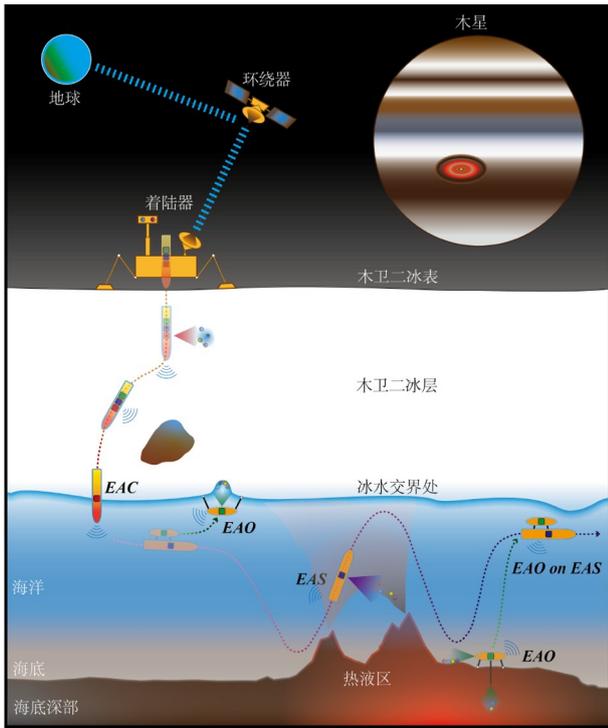


图3 一种多Exo-AUV系统作业概念

能够在冰下局部微区长时间定点悬停或顶栖,在保障艇体的位姿稳定性的同时,完成冰下微区的精细任务.全驱动设计,搭配顶栖支架的扁平轴对称艇体(比如圆盘型)适合此类场景.海底热液区的三维小尺度任务与之类似,但探测空间拓展到了三维,全驱动设计、搭配底栖支架的圆盘型艇体仍能胜任,但球形是理论上的最佳选择.本研究将采用上述艇体、搭载模块O的Exo-AUV简称为EAO.

EAS既要覆盖较大的探测空间,还要保证能够续航至EAC. EAO不善远航,可通过特殊设计实现与EAS水下组合和分离,由EAS运载EAO至远离冰下基地的目的地. EAO完成局部探测后,等待EAS将其运至EAC或下一个探测目的地. EAC、EAO和EAS可实现数据交换,最终通过EAC将信息传回地球. EAO可采用可充电电池,而EAC和EAS可采用SMR或微型RTG供电,并能够为EAO充电.一套EAC、EAS和EAO共同构成了最简单的多Exo-AUV系统(MEAS).

木卫二是寡营养系统,具有至少数公里厚的冰层,其冰下海洋是地球海洋的2倍,有限的可探测对象稀疏、异质地分布在巨大的全球性冰海空间中,远超1套简单的多Exo-AUV系统(MEAS)的覆盖范围.因此,

着陆点的选择是Exo-AUV及其穿冰载具能否高效作业,甚至成功发现生命的关键环节之一.木卫二赤道附近的混沌区域(Chaotic Terrain)是理想的着陆点之一:首先,冰壳较薄且较薄、较新,易于穿透,且冰表和冰中生命信号潜力较高;其次,该区域下方冰水交界处可能存在更多的氧化剂,生命潜力更高;此外,根据詹姆斯·韦伯天文望远镜的最新观测,该区域表面分布了大量的二氧化碳冰层,暗示冰下海洋存在碳源(Villanueva等, 2023; Trumbo和Brown, 2023).

基于本研究提出的探测方法和多Exo-AUV系统作业概念(ConOps for MEAS),着陆点如果在混沌区域,整个探测任务在有限的时间、空间、工具和能源投入下可能收获更多有价值的信息.如有必要,未来还可布局多次发射任务,基于多套MEAS搭建覆盖全球冰海空间的探测网络.

## 5 总结与建议

木卫二、土卫二等冰天体具备微生物生存的基本条件.对冰天体的冰中、冰水交界和海底等生命潜力较高的区域开展生命探测,很可能发现强生源信号、活体生命,甚至解答生命诞生的问题. Exo-AUV可自主、高效地实现原位、多对象、多尺度、多维度的探测,是行星科学家和天体生物学家探索冰天体、寻找地外生命的关键装备.

本研究以木卫二为例,提出以生命潜力作为冰天体生命探测的科学目标,因为生命潜力既符合探测任务的假设内涵,又避免了二元性结论,可用于发现生命信号、活体生命和前生命化学系统.推测、评价和验证生命潜力需要依据大量可感知的环境变量和参量,其中一些可能作为生命证据的被称为生命信号.即使在地球,也存在生命繁盛和生命稀少的地区,探测木卫二的生命潜力应优先选择那些生命潜力和生命信号潜力较高的区域.基于相似环境假设和生态学理论,本研究提出了潜力区域的推论,并认为冰中、冰水交界和海底等区域的生命潜力和生命信号潜力最突出.然而,当下主流的探测方法都普遍重视生源性分析,而忽略了如何采集到高生源性信号.在寡营养系统中,生命的分布是稀疏且异质的.即使在冰下或海底这些理论上生命潜力较高的区域,如果仅采集到弱生源信号,那么无论二元诊断框架还是贝叶斯方法都难以得

出高可信的分析结果。

值得强调的是,本研究认为一个完整的探测任务至少应包含:假设、采样、分析和验证4个环节。而Exo-AUV及其穿冰载具几乎可以抵达冰表以下任何潜力区域,并通过搭载多种科学载荷实现原位、多对象、多尺度、多维度的数据采集和分析。本研究基于生态位的思想,提出了一种全新的冰天体生命探测方法。运用该方法,Exo-AUV可自主、高效地推测生命潜力最突出的局部微区,采集到更多相互正交的强生源信号甚至活体生命;此外,还能利用冰天体上的实测数据验证、证伪或修正地球上建立的数据模型。该方法发挥了Exo-AUV在水下探测的优势,避免了仅依赖被动采集的数据进行生源性分析的不足,将假设、采集、分析和验证4个环节整合,形成了完整、闭环、可自主演化的冰天体生命探测方法。该方法将帮助Exo-AUV在有限的能源储备、物料供应和人为干预下,在木卫二上百公里厚、覆盖全球、寡营养的冰水层中发现强生源信号甚至活体生命和前生命化学反应,最终验证生命潜力。

本研究还以木卫二为例,将穿冰探测、冰水交界探测、海底探测3个典型作业场景解析为:作业环境、被测对象、关键操作和探测器本体4类场景条件,结合火箭发射、行星际飞行、进入木卫二轨道、冰表着陆等前序环节中的相关条件,提出了Exo-AUV及其穿冰载具的主要技术要求。

木卫二的冰壳和冰下海洋都是全球性的,冰壳可厚达数十公里,海底最深处静水压力甚至会达到马里亚纳海沟底部的2倍。穿冰载具可搭载SMR或RTG电源和热源,采用热钻混合穿冰法和节能艇型,利用声呐或合成孔径雷达辅助导航,使用侧向喷嘴或辅热协助转向和避障,穿透冰壳,将Exo-AUV布放入水中,并作为水下基站为其提供导航、通讯、数据交换和充电服务。Exo-AUV可采用耐压艇体材料,搭载RTG电源和高性能的导航、通讯模块,在海中不同深度、大范围、长时间定深、定速、定向航行,通过变浮力设计实现滑翔,对生命潜力较高的局部微区抵近、悬停,必要时在冰下顶栖、海底底栖,覆盖从大到小不同尺度的海域空间。

为了在巨大的冰海空间中发现稀疏、异质分布的强生源信号和活体生命,Exo-AUV及其穿冰载具要搭载多种科学载荷,利用声学、视觉、光谱、电化学、

分析化学、细胞生物学和分子生物学仪器载荷,逐步聚焦从数公里到亚微米不同特征长度的对象,原位采集形态、结构、成分、运动、分布、理化等多维度信息,在线完成生态位和生源性分析。木卫二距离地球遥远,运载火箭的有效负载十分有限,冰表以上受到木星的强辐射,防护材料需求量较高,在保障探测能力的前提下,应用MEMS技术,实现载荷的小型化和轻量化。

木卫二与地球通讯延迟长达0.5h,通信带宽和窗口期十分狭窄,无法实现频繁的人工干预和高通量的数据交换,复杂的生命探测任务将依赖探测器的自主性。首先,Exo-AUV及其穿冰载具应基于声学、光学等感知方法自主定位、导航、规划路径,操控推进器、舵机和浮力调整航速和位姿。此外,基于本研究提出的探测方法,Exo-AUV还应实现科学自主,能够在不同尺度空间中自主推测、筛选潜力区域,规划探测任务,自主调用多种科学载荷直接或通过机载试验完成数据采集和分析,自主验证生命潜力和生命信号潜力的假设,自主更新计算模型,自主对重要数据进行筛选、概括、排序和通讯。

本研究评述了美国和欧洲开发的Exo-AUV,认为现有设计大多不具备处理复杂生命探测任务的能力,远未发挥出Exo-AUV平台的潜力。为了避免未来的冰天体生命探测任务重蹈维京号的覆辙,本研究提出了一套基于冰天体生命探测任务的Exo-AUV概念开发技术路线。该路线包含了影响Exo-AUV概念的关键元素,帮助开发者从科学目标开始研究Exo-AUV可探测的潜力区域和对象,设计探测方法,总结关键的场景条件,提炼所有的技术要求,从艇体、载荷和自主3个方面对概念进行设计或评价。

基于该技术路线,本研究还提出了一种多Exo-AUV系统作业概念(ConOps for MEAS)。一套最简单的多Exo-AUV系统(MEAS)包括一艘穿冰载具EAC、一艘搭载勘测模块的EAS和一艘搭载观测模块的EAO。EAC搭载RTG或SMR电源及热源,采用热钻混合法穿冰,EAS和EAO可置于EAC内部,3者均可实现声学通信,也可通过光纤接口实现数据互联。EAS可采用可折叠翼身艇体,搭载RTG电源,可长时间、大范围、定深、定速、定向航行,也可实现全海深滑翔,执行冰水交界处和海底大尺度空间、大特征长度对象的探测任务。EAO可采用圆盘型艇体,全驱动设计,配备可充电电池,搭载多种MEMS科学载荷,适合局部微

区小特征长度对象的探测. EAS可以和EAO在水中机械连接后作业, 也可两者分别作业, EAS可作为EAO的运载器, 并为其提供充电和数据交换服务. 由于木卫二不同的潜力区域的场景条件区别较大; 可探测对象较多, 有的特征尺度超过1km, 有的小于1 $\mu$ m; 测量尺度也从全球性冰海空间跨越至局部微区. 若要将众多复杂的技术要求兼容到1艘Exo-AUV上, 将造成不同场景下载荷的闲置, 艇体空间、重量和能源的浪费, 对火箭有限的运力和空间也将是挑战. 本研究提出的MEAS系统可以有效地解决上述问题, 能够大大提升个体操纵性和鲁棒性、系统生存力和作业效率. 如果存在重大发现, 还可通过多次发射任务、多点穿冰, 基于多套MEAS系统搭建覆盖全球冰海空间的探测网络.

近年来, 我国在各领域发展迅速, 诞生了一系列耳熟能详的尖端装备和技术; 然而, 在基础科学领域仍鲜有重大发现(林巍等, 2020). 探测地外生命将高度依赖探测装备和技术的重大科学研究和重大国家工程, 具有极高的科学意义; 其衍生价值也能融入社会生产和生活中, 催生更多福泽民生、提升国家竞争力的颠覆性技术; 符合我国的基本国情、长久国策和国际地位. 美国和欧洲在该领域起步虽早, 但在Exo-AUV这一关键环节并未建立绝对优势. 我国可在顶层建立管理地外生命探测工程的组织机构, 统筹相关基层单位提案、研讨、决策、开发和任务落实; 培养多学科交叉的研究体系、团队和人才; 论证目标天体、科学目标、工程实施和技术开发路线; 分阶段、分层次、分领域地开展专项研究和任务实施. 当下, 以Exo-AUV为突破口逐步开展冰天体生命探测任务的装备与技术的开发、开展专项探测任务, 对我国这样肩负民族复兴使命和人类共同命运的大国, 具有极高的战略意义.

## 参考文献

- 林巍, 李一良, 王高鸿, 潘永信. 2020. 天体生物学研究进展和发展趋势. *科学通报*, 65: 380–391
- Aamot H W C. 1968. Instruments and methods instrumented probes for deep glacial investigations. *J Glaciol*, 7: 321–328
- Altair T, de Avellar M G B, Rodrigues F, Galante D. 2018. Microbial habitability of Europa sustained by radioactive sources. *Sci Rep*, 8: 1–8
- American A A S. 2005. So much more to know. *Science*, 309: 78–102
- Anderson J D, Schubert G, Jacobson R A, Lau E L, Moore W B, Sjogren W L. 1998. Europa's differentiated internal structure: Inferences from four Galileo encounters. *Science*, 281: 2019–2022
- Arrigo K. 2022. Research in analog environments to enable studies of ocean worlds. *Oceanography*, 35: 39–44
- Ashkenazy Y, Sayag R, Tziperman E. 2018. Dynamics of the global meridional ice flow of Europa's icy shell. *Nat Astron*, 2: 43–49
- Bairstow B, Lee Y H, Howell S, Donitz B, Choukroun M, Perl S. 2012. Thermal Analysis of Landers using Radioisotope Power Systems on Ice Worlds. IEEE Aerospace Conference
- Barge L M, Rodriguez L E, Weber J M, Theiling B P. 2022. Determining the “biosignature threshold” for life detection on biotic, abiotic, or prebiotic worlds. *Astrobiology*, 22: 481–493
- Barker L D L, Jakuba M V, Bowen A D, German C R, Maksym T, Mayer L, Boetius A, Dutrieux P, Whitcomb L L. 2020. Scientific challenges and present capabilities in underwater robotic vehicle design and navigation for oceanographic exploration under-ice. *Remote Sens*, 12: 2588
- Billings S E, Kattenhorn S A. 2005. The great thickness debate: Ice shell thickness models for Europa and comparisons with estimates based on flexure at ridges. *Icarus*, 177: 397–412
- Bire S, Kang W, Ramadhan A, Campin J M, Marshall J. 2022. Exploring ocean circulation on icy moons heated from below. *J Geophys Res-Planets*, 127: e07025
- Buffo J J, Schmidt B E, Huber C, Walker C C. 2020. Entrainment and dynamics of ocean-derived impurities within Europa's ice shell. *J Geophys Res-Planets*, 125: e06394
- Camprubi E, de Leeuw J W, House C H, Raulin F, Russell M J, Spang A, Tirumalai M R, Westall F. 2019. The emergence of life. *Space Sci Rev*, 215: 56
- Carlson R W, Johnson R E, Anderson M S. 1999. Sulfuric acid on Europa and the radiolytic sulfur cycle. *Science*, 286: 97–99
- Carsey F D, Chen G S, Cuns J, French L, Kern R, Lane A L, Stolorz P, Zimmerman W, Ballou P. 1999. Exploring Europa's ocean: A challenge for marine technology of this century. *Mar Technol Soc J*, 33: 5–12
- Christner B C, Royston-Bishop G, Foreman C M, Arnold B R, Tranter M, Welch K A, Lyons W B, Tsapin A I, Studinger M, Priscu J C. 2006. Limnological conditions in subglacial lake Vostok, Antarctica. *Limnol Oceanogr*, 51: 2485–2501
- Chyba C F, Phillips C B. 2001. Possible ecosystems and the search for life on Europa. *Proc Natl Acad Sci USA*, 98: 801–804
- Cimoli E, Lucieer V, Meiners K M, Chennu A, Castrisios K, Ryan K G, Lund-Hansen L C, Martin A, Kennedy F, Lucieer A. 2020. Mapping the in situ microspatial distribution of ice algal biomass through hyperspectral imaging of sea-ice cores. *Sci Rep*, 10: 21848

- Clark B C. 2001. Viking redux: Viking success and lessons for the future. *Astrobiology*, 1: 509–512
- Cockell C S. 2001. “Astrobiology” and the ethics of new science. *Interdisciplinary Sci Rev*, 26: 90–96
- Cockell C S, Bush T, Bryce C, Direito S, Fox-Powell M, Harrison J P, Lammer H, Landenmark H, Martin-Torres J, Nicholson N, Noack L, O’Malley-James J, Payler S J, Rushby A, Samuels T, Schwendner P, Wadsworth J, Zorzano M P. 2016. Habitability: A review. *Astrobiology*, 16: 89–117
- Cockell C S, Stevens A H, Prescott R. 2019. Habitability is a binary property. *Nat Astron*, 3: 956–957
- Cockell C S, Samuels T, Stevens A H. 2022. Habitability is binary, but it is used by astrobiologists to encompass continuous ecological questions. *Astrobiology*, 22: 7–13
- Collins G, Nimmo F. 2009. Chaotic terrain on Europa. In: Pappalardo R T, McKinnon W B, Khurana K, eds. Europa. Tucson: The University of Arizona Press. 259–81
- Cwik T, Zimmerman W, Graya A, Nesmitha B, Casillasa R P, Mullera J, Bell D, Bryanta S, Karapetiana A, Otisa R, Handa K, Brandt M, Zacny K, Senguptac A. 2018. A technology architecture for accessing the oceans of icy worlds. Bremen: International Astronautical Congress (IAC)
- Dachwald B, Ulamec S, Postberg F, Sohl F, de Vera J P, Waldmann C, Lorenz R D, Zacny K A, Hellard H, Biele J, Rettberg P. 2020. Key technologies and instrumentation for subsurface exploration of ocean worlds. *Space Sci Rev*, 216: 83
- Delitsky M L, Lane A L. 1998. Ice chemistry on the Galilean satellites. *J Geophys Res*, 103: 31391–31403
- Deming J W. 2002. Psychrophiles and polar regions. *Curr Opin Microbiol*, 5: 301–309
- D’Hondt S, Pockalny R, Fulfer V M, Spivack A J. 2019. Subseafloor life and its biogeochemical impacts. *Nat Commun*, 10: 3519
- Dick S J. 1982. Plurality of Words: The Extraterrestrial Life Debate from Democritus to Kant. Cambridge: Cambridge University Press. 9–10
- Dougherty M, Grasset O, Bunce E, Coustenis A, Blanc M, Coates A, Coradini A, Drossart P, Fletcher L, Hussmann H, Jaumann R, Krupp N, Prieto-Ballesteros O, Tortora P, Tosi F, Hoolst T V. 2011. JUICE Assessment Study Report. Technical Report. ESA
- Durka M J, Smith M W E, Ullman M J, Cassler B, Otis R, Cwik T A, Hockman B J, Barry M M. 2022. Modeling a class of thermal ice probes for accessing the solar system’s ocean worlds. *Acta Astronaut*, 193: 483–495
- Fairfield N, Kantor G, Wettergreen D. 2007. Real-time SLAM with otree evidence grids for exploration in underwater tunnels. *J Field Robotics*, 24: 03–21
- Figueredo P H, Greeley R, Neuer S, Irwin L, Schulze-Makuch D. 2003. Locating potential biosignatures on Europa from surface geology observations. *Astrobiology*, 3: 851–861
- German C R, Seyfried W E. 2014. Hydrothermal Processes. In: Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry. 2nd ed. Oxford: Elsevier. 8: 191–233
- German C R, Blackman D K, Fisher A T, Girguis P R, Hand K P, Hoehler T M, Huber J A, Marshall J C, Seewald J, Shock E. 2019. Exploring ocean worlds: A systems-level approach for the search for life beyond Earth. Bellevue: AGU Astrobiology Science Conference
- German C R, Arrigo K R, Murray A E, Rhoden A R. 2022a. Planetary oceanography: Leveraging expertise among Earth and planetary science. *Oceanography*, 35: 10–16
- German C R, Blackman D K, Fisher A T, Girguis P R, Hand K P, Hoehler T M, Huber J A, Marshall J C, Pietro K R, Seewald J S, Shock E L, Sotin C, Thurnherr A R, Toner B M. 2022b. Ocean system science to inform the exploration of ocean worlds. Ocean system science to inform the exploration of ocean worlds. *Oceanography*, 35: 16–22
- Grebmeier J M. 2022. Applying understanding of Earth systems, including climate change, to exploration of other ocean worlds. Applying understanding of Earth systems, including climate change, to exploration of other ocean worlds. *Oceanography*, 35: 45–53
- Green J, Hoehler T, Neveu M, Domagal-Goldman S, Scalice D, Voytek M. 2021. Call for a framework for reporting evidence for life beyond Earth. *Nature*, 598: 575–579
- Gulati S, Richmond K, Flesher C, Hogan B P, Murarka A, Kuhlmann G, Sridharan M, Stone W C, Doran P T. 2010. Toward autonomous scientific exploration of ice-covered lakes-Field experiments with the ENDURANCE AUV in an Antarctic Dry Valley. Anchorage: IEEE International Conference on Robotics and Automation. 308–315
- Hand K P, Murray AE, Garvin J B, Brinckerhoff W B, Christner B C, Edgett K S, Ehlmann B L, German C R, Hayes A G, Hoehler T M, Horst S M, Lunine J I, Nealon K H, Paranicas C, Schmidt B E, Smith D E, Rhoden A R, Russell M J, Templeton A Sm Willis P A, Yingst R A, Phillips C B, Cable M L, Craft K L, Hofmann A E, Nordheim T A, Pappalardo R P, Project Engineering Team. 2017. Report of Europa Lander Science Definition Team, Technical Report, NASA
- Hand K P, Sotin C, Hayes A, Coustenis A. 2020. On the habitability and future exploration of ocean worlds. *Space Sci Rev*, 216: 95
- Hand K P, Phillips C B, Murray A M, Garvin J B, Maize E H, Gibbs R G, Reeves G E, Martin A M S, Tan-Wang G H, Krajewski J, et al. 2022. Science goals and mission architecture of the Europa lander mission concept. *Planet Sci J*, 3: 22
- Hanff H, Kloss P, Wehbe B, Kampmann P, Kroffke S, Sander A, Firvida

- M B, Einem M, Bode J F, Kirchner F. 2017. AUV x—A novel miniaturized autonomous underwater vehicle. Aberdeen OCEANS Conference. 1–10
- Heller R. 2020. Habitability is a continuous property of nature. *Nat Astron*, 4: 294–295
- Hendrix A R, Hurford T A, Barge L M, Bland M T, Bowman J S, Brinckerhoff W, Buratti B J, Cable M L, Castillo-Rogez J, Collins G C, Diniega S, German C R, Hayes A G, Hoehler T, Hosseini S, Howett C J A, McEwen A S, Neish C D, Neveu M, Nordheim T A, Patterson G W, Patthoff D A, Phillips C, Rhoden A, Schmidt B E, Singer K N, Soderblom J M, Vance S D. 2019. The NASA roadmap to ocean worlds. *Astrobiology*, 19: 1–27
- Hildebrandt M, Albiez J, Fritsche M, Hilijegerdes J, Kloss P, Wirtz M, Kirchner F. 2013. Design of an autonomous under-ice exploration system. San Diego: IEEE/Mts Oceans. 1–6
- Hoehler T M, Bains W, Davila A, Parenteau M, Pohorille A. 2020. Life's requirements, habitability, and biological potential. In: Meadows V S, Arney G N, Schmidt B E, Des Marais D J, eds. *Planetary Astrobiology*. Tucson: The University of Arizona Press. 37–69
- Hoehler T M, Bowman J S, Craft K L, Willis P A, Winebrenner D P. 2022. Leveraging Earth hydrosphere science in the search for life on ocean worlds. *Oceanography*, 35: 23–29
- Horvath J C, Carsey F D, Cutts J, Jones J, Johanson E D, Landry B, Lane A Lynch G, Jezek K, Chela-Flores J, Jeng T, Bradley A. 1997. Searching for ice and ocean biogenic activity on Europa and Earth. San Diego: SPIE Conference. 3111: 490–500
- Jansen J, MacIntyre S, Barrett D C, Chin Y P, cortés A, Forrest A L, Hrycik A R, Martin R, McMeans B C, Rautio M, Schwefel R. 2021. Winter Limnology: How do hydrodynamics and biogeochemistry shape ecosystems under ice? *J Geophys Res-Biogeosci*, 126: e2020JG006237
- Jebbar M, Hickman-Lewis K, Cavalazzi B, Taubner R S, Rittmann S K M R, Antunes A. 2020. Microbial diversity and biosignatures: An icy moons perspective. *Space Sci Rev*, 216: 1–47
- Kargel J S, Kaye J Z, Head III J W, Marion G M, Sassen R, Crowley J K, Ballesteros O P, Grant S A, Hogenboom D L. 2000. Europa's crust and ocean: Origin, composition, and the prospects for life. *Icarus*, 148: 226–265
- Karl D M, Wirsén C O, Jannasch H W. 1980. Deep-sea primary production at the Galápagos hydrothermal vents. *Science*, 207: 1345–1347
- Kennedy D, Norman C. 2005. What don't we know? *Science*, 309: 75
- Kimball P W, Clark E B, Scully M, Richmond K, Flesher C, Lindzey L E, Harman J, Huffstutler K, Lawrence J, Lelievre S, Moor J, Pease B, Siegel V, Winslow L, Blankenship D D, Doran P, Kim S, Schmidt B E, Stone W C. 2018. The ARTEMIS under-ice AUV docking system. *J Field Robotics*, 35: 299–308
- Klein H P, Lederberg J, Rich A, Horowitz N H, Oyama V I, Levin G V. 1976. The Viking Mission search for life on Mars. *Nature*, 262: 24–27
- Klenner F, Postberg F, Hillier J, Khawaja N, Reviol R, Stolz F, Cable M L, Abel B, Nölle L. 2020. Analog experiments for the identification of trace biosignatures in ice grains from extraterrestrial ocean worlds. *Astrobiology*, 20: 179–189
- Kolb V M. 2019. Defining life: Multiple Perspectives. In: Kolb V M, ed. *Handbook of Astrobiology*. Boca Raton: CRC Press. 57–63
- Kumagai J. 2007. Swimming to Europa. *IEEE Spectr*, 44: 33–40
- Kuskov O L, Kronrod V A. 2005. Internal structure of Europa and Callisto. *Icarus*, 177: 550–569
- Lawrence J D, Mullen A D, Bryson F E, Chivers C J, Hanna A M, Plattner T, Spiers E M, Bowman J S, Buffo J J, Burnett J L, Carr C E, Dichek D J, Hughson K H G, King W, Glenn Lightsey E, Ingall E, McKaig J, Meister M R, Pierson S, Tomar Y, Schmidt B E. 2023. Subsurface science and search for life in ocean worlds. *Planet Sci J*, 4: 22
- Lenardic A, Seales J. 2021. Habitability: A process versus a state variable framework with observational tests and theoretical implications. *Int J AstroBiol*, 20: 125–132
- Levine A G. 2021. A Sponsored Supplement to Science 125 Questions: Exploration and Discovery. Booklet, Science/AAAS Custom Publishing Office
- Malaska M J, Bhartia R, Manatt K S, Priscu J C, Abbey W J, Mellowicz B, Palmowski J, Paulsen G L, Zacny K, Eshelman E J, D'Andrilli J. 2020. Subsurface *in situ* detection of microbes and diverse organic matter hotspots in the Greenland Ice Sheet. *Astrobiology*, 20: 1185–1211
- Marion G M, Fritsen C H, Eicken H, Payne M C. 2003. The search for life on Europa: Limiting environmental factors, potential habitats, and Earth analogues. *Astrobiology*, 3: 785–811
- Martin A, McMinn A. 2018. Sea ice, extremophiles and life on extraterrestrial ocean worlds. *Int J AstroBiol*, 17: 1–16
- Martin W, Russell M J. 2007. On the origin of biochemistry at an alkaline hydrothermal vent. *Phil Trans R Soc B*, 362: 1887–1926
- Martin W, Baross J, Kelley D, Russell M J. 2008. Hydrothermal vents and the origin of life. *Nat Rev Microbiol*, 6: 805–814
- McKinnon W B. 1999. Convective instability in Europa's floating ice shell. *Geophys Res Lett*, 26: 951–954
- Meister M, Dichek D, Spears A, Hurwitz B, Ramey C, Lawrence J, Philleo K, Lutz J, Lawrence J, Schmidt B E. 2018. Icefin: Redesign and 2017 Antarctic field deployment. Charleston: IEEE/MTS OCEANS Conference. 1–5

- Melo-Merino S M, Reyes-Bonilla H, Lira-Noriega A. 2020. Ecological niche models and species distribution models in marine environments: A literature review and spatial analysis of evidence. *Ecol Model*, 415: 108837
- Ménez B, Pisapia C, Andreani M, Jamme F, Vanbellingen Q P, Brunelle A, Richard L, Dumas P, Réfrégiers M. 2018. Abiotic synthesis of amino acids in the recesses of the oceanic lithosphere. *Nature*, 564: 59–63
- Murphy R R. 2021. Planetary rovers in science fiction. *Sci Robot*, 6: eabh3165
- Murray A E, Kenig F, Fritsen C H, McKay C P, Cawley K M, Edwards R, Kuhn E, McKnight D M, Ostrom N E, Peng V, Ponce A, Priscu J C, Samarkin V, Townsend A T, Wagh P, Young S A, Yung P T, Doran P T. 2012. Microbial life at  $-13^{\circ}\text{C}$  in the brine of an ice-sealed Antarctic lake. *Proc Natl Acad Sci USA*, 109: 20626–20631
- Muscettola N, Nayak P P, Pell B, Williams B C. 1998. Remote agent: To boldly go where no AI system has gone before. *Artif Intelligence*, 103: 5–47
- Nadeau J, Lindensmith C, Deming J W, Fernandez V I, Stocker R. 2016. Microbial morphology and motility as biosignatures for outer planet missions. *Astrobiology*, 16: 755–774
- Nealson K H. 1997. The limits of life on Earth and searching for life on Mars. *J Geophys Res*, 102: 23675–23686
- Neveu M, Hays L E, Voytek M A, New M H, Schulte M D. 2018. The ladder of life detection. *Astrobiology*, 18: 1375–1402
- Nimmo F, Pappalardo R T. 2016. Ocean worlds in the outer solar system. *J Geophys Res-Planets*, 121: 1378–1399
- Nitsh M, Meckel S. 2023. The Triple-nanoAUV: An autonomous underwater vehicle to explore the oceans of icy moons. Technical Report. University of Bremen
- Nordheim T A, Hand K P, Paranicas C. 2018. Preservation of potential biosignatures in the shallow subsurface of Europa. *Nat Astron*, 2: 673–679
- Oleson S R, Hartwig J W, Landis G A, Walsh J, Lorenz R D, Paul M V. 2020. Titan Turtle: NIAC Phase II Design for a Submersible Vehicle for Titan Exploration. Las Vegas: ASCEND (Accelerating Space Commerce, Exploration, and New Discovery) Conference
- Paczkowski B, Ray T, Choukroun M, Brooks S, Steinbruegge G, Gudipati M, Piqueux S, Blacksborg J, Cochran C, Diniega S, Elder C, Roberts J, Ernst C, Luspay-Kuti A. 2022. Europa Clipper Instrument Summaries. Technical Report. NASA
- Pappalardo R T, Barr A C. 2004. The origin of domes on Europa: The role of thermally induced compositional diapirism. *Geophys Res Lett*, 31: L01701
- Pappalardo R T, Head J W, Greeley R, Sullivan R J, Pilcher C, Schubert G, Moore W B, Carr M H, Moore J M, Belton M J S, Goldsby D L. 1998. Geological evidence for solid-state convection in Europa's ice shell. *Nature*, 391: 365–368
- Paranicas C, Cooper J F, Garrett H B, Johnson R E, Sturmer S J. 2009. Europa's radiation environment and its effects on the surface. In: Pappalardo R T, McKinnon W B, Khurana K, eds. Europa. Tucson: The University of Arizona Press. 529–544
- Patterson G W, Paranicas C, Prockter L M. 2012. Characterizing electron bombardment of Europa's surface by location and depth. *Icarus*, 220: 286–290
- Pohorille A, Sokolowska J. 2020. Evaluating biosignatures for life detection. *Astrobiology*, 20: 1236–1250
- Ramirez R M. 2018. A more comprehensive habitable zone for finding life on other planets. *Geosciences*, 8: 280
- Richmond K, Flesher C, Lindzey L, Tanner N, Stone W C. 2018. SUNFISH@: A human-portable exploration AUV for complex 3D environments. Charleston: IEEE/MTS Oceans. 1–9
- Richmond K, Hogan B, Lopez A, Harman J, Myers K, Guerrero V, Lanford E, Ralston J C, Tanner N, Siegel V, Stone W C. 2021. PROMETHEUS: Progress toward an integrated cryobot for ocean world access. New Orleans: AGU Fall Meeting
- Rouse W H. 1975. Lucretius: On the Nature of Things. Cambridge: Harvard University Press. 177–180
- Roush W. 2020. Extraterrestrials, Cambridge: The MIT Press. 25–29
- Russell M J. 2003. The importance of being alkaline. *Science*, 302: 580–581
- Russell M J, Barge L M, Bhartia R, Bocanegra D, Bracher P J, Branscomb E, Kidd R, McGlynn S, Meier D H, Nitschke W, Shibuya T, Vance S, White L, Kanik I. 2014. The drive to life on wet and icy worlds. *Astrobiology*, 14: 308–343
- Sagan C, Thompson W R, Carlson R, Gurnett D, Hord C. 1993. A search for life on Earth from the Galileo spacecraft. *Nature*, 365: 715–721
- Sahl J W, Fairfield N, Harris J K, Wettergreen D, Stone W C, Spear J R. 2010. Novel microbial diversity retrieved by autonomous robotic exploration of the world's deepest vertical phreatic sinkhole. *Astrobiology*, 10: 201–213
- Schaler E, Ansari A, Howell S, Lee H J, Smith M, Rajguru A, Tosi L P, Hao Z, Kim J D. 2022. SWIM: Sensing with Independent Microswimmers. Authorea Preprints
- Schmidt B E, Washam P, Davis P E D, Nicholls K W, Holland D M, Lawrence J D, Riverman K L, Smith J A, Spears A, Dichek D J G, Mullen A D, Clyne E, Yeager B, Anker P, Meister M R, Hurwitz B C, Quartini E S, Bryson F E, Basinski-Ferris A, Thomas C, Wake J, Vaughan D G, Anandkrishnan S, Rignot E, Paden J, Makinson K. 2023. Heterogeneous melting near the Thwaites Glacier grounding line. *Nature*, 614: 471–478

- Schreiber D A, Richter F, Bilan A, Gavrilov P V, Lam H M, Price C H, Carpenter K C, Yip M C. 2020. ARCSnake: An Archimedes' Screw-Propelled, Reconfigurable Serpentine Robot for Complex Environments. Paris: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). 7029–7034
- Shank T M, Machado C, German C R, Bowen A, Leighty J, Kelsh A, Smith R, Hand K P. Development of a new class of autonomous underwater vehicle (AUV), Orpheus, for the exploration of ocean world analogues. 2019. The Woodlands: Lunar and Planetary Institute Ocean Worlds 4 Conference. 2168: 6021
- Sherwood B, Ponce A, Waltemathe M. 2019. Forward contamination of ocean worlds: A stakeholder conversation. *Space Policy*, 48: 1–13
- Siegert M J, Ellis-Evans J C, Tranter M, Mayer C, Petit J R, Salamatin A, Priscu J C. 2001. Physical, chemical and biological processes in Lake Vostok and other Antarctic subglacial lakes. *Nature*, 414: 603–609
- Stone W C, Hogan B, Siegel V, Lelievre S, Flesher C. 2014. Progress towards an optically powered cryobot. *Ann Glaciol*, 55: 2–13
- Stone W, Hogan B, Siegel V, Harman J, Clark E, Pradhan O, Gasiewski A, Howe S, Howe Troy. 2018. Project VALKYRIE: Laser-Powered Cryobots and Other Methods for Penetrating Deep Ice on Ocean Worlds. In: Badescu V, Zacny K, eds. *Outer Solar System*. Cham: Springer. 47–165
- Stone W, Siegel V, Hogan B, Richmond K, Hackley C, Harman J, Flesher C, Lopez A, Lelievre S, Myers K, Nathan W. 2020. Novel Methods for Deep Ice Access on Planetary Bodies. In: Bar-Cohen Y, Zacny K, eds. *Advances in Extraterrestrial Drilling*. New York: CRC Press. 215–245
- Trumbo S K, Brown M E. 2023. The distribution of CO<sub>2</sub> on Europa indicates an internal source of carbon. *Science*, 381: 1308–1311
- Truong N, Monroe A A, Glein C R, Anbar A D, Lunine J I. 2019. Decomposition of amino acids in water with application to *in-situ* measurements of Enceladus, Europa and other hydrothermally active icy ocean worlds. *Icarus*, 329: 140–147
- Vance S D, Melwani Daswani M. 2020. Serpentinite and the search for life beyond Earth. *Phil Trans R Soc A*, 378: 20180421
- Vaquero T S, Daddi G, Thakker R, Paton M, Jasour A, Strub M P, Swan R M, Royce R, Gildner M, Tosi P, Veismann M, Gavrilov P, Marteau E, Bowkett J, de Mola Lemus D L, Nakka Y, Hockman B, Orekhov A, Hasseler T D, Leake C, Nuernberger B, Proença P, Reid W, Talbot W, Georgiev N, Pailevanian T, Archanian A, Ambrose E, Jasper J, Etheredge R, Roman C, Levine D, Otsu K, Yearicks S, Melikyan H, Rieber R R, Carpenter K, Nash J, Jain A, Shiraiishi L, Robinson M, Travers M, Choset H, Burdick J, Gardner A, Cable M, Ingham M, Ono M. 2024. EELS: Autonomous snake-like robot with task and motion planning capabilities for ice world exploration. *Sci Robot*, 9, doi: 10.1126/scirobotics.adh8332
- Villanueva G L, Hammel H B, Milam S N, Faggi S, Kofman V, Roth L, Hand K P, Paganini L, Stansberry J, Spencer J, Protopapa S, Strazzulla G, Cruz-Mermy G, Glein C R, Cartwright R, Liuzzi G. 2023. Endogenous CO<sub>2</sub> ice mixture on the surface of Europa and no detection of plume activity. *Science*, 381: 1305–1308
- Waldmann C, Kausche A, Iversen M, Pototzky A, Looye G, Montenegro S, Bachmayer R, Wilde D. 2014. MOTH—An underwater glider design study carried out as part of the HGF alliance ROBEX. *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles (AUV)*. 1–3
- Waldmann C, de Vera J-P, Dachwald B, Strasdeit H, Sohl F, Hanff H, Kowalski J, Heinen D, Macht S, Bestmann U, Meckel S, Hildebrandt M, Funke O, Gehrt J J. 2018. Search for life in ice-covered oceans and lakes beyond Earth. New Orleans: 2018 IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)
- Wang J Z, Ma J N, Qiu J W, Tian D, Zhu A W, Zhang Q X, Zhou A S. 2019. Optimization design of radiation vault in Jupiter orbiting mission. *IEEE Trans Nucl Sci*, 66: 2179–2187
- Wenzhöfer F, Lemburg J, Hofbauer M, Lehmenhecker S, Faerber P. 2016. TRAMPER. Monterey: IEEE/MTS OCEANS. 1–6
- Whewell W. 1853. *Of the Plurality of Worlds: An Essay*, London: John W. Parker West Strand Press. 208–259
- Wirtz M, Hildebrandt M. 2016. IceShuttle Teredo: An ice-penetrating robotic system to transport an exploration AUV into the ocean of Jupiter's moon Europa. Guadalajara: 67th International Astronautical Congress (IAC). 26–30
- Wołos A, Roszak R, Żądło-Dobrowolska A, Beker W, Mikulak-Klucznik B, Spólnik G, Dygas M, Szymkuć S, Grzybowski B A. 2020. Synthetic connectivity, emergence, and self-regeneration in the network of prebiotic chemistry. *Science*, 369, doi: 10.1126/science.aaw1955
- Wronkiewicz M, Lee J, Mandrake L, Lightholder J, Doran G, Maureri S, Kim T, Oborny N, Schibler T, Nadeau J, Wallace J K, Moorjani E, Lindensmith C. 2024. Onboard science instrument autonomy for the detection of microscopy biosignatures on the ocean worlds life surveyor. *Planet Sci J*, 5: 19
- Zimmerman W, Bonitz R, Feldman J. 2001. Cryobot: An ice penetrating robotic vehicle for Mars and Europa. Big Sky: IEEE Aerospace Conference. 311–323

(责任编辑: 魏勇)