

DOI: 10.3724/SP.J.1224.2016.00201

“走向蔚蓝——深潜、深钻、深网”专刊

# 进大海探索，入无人之境

## ——自主水下航行器引领海洋科学新发现

张燕武

(蒙特瑞湾海洋研究所，莫斯兰丁，加利福尼亚，美国 95039)

**摘要:** 对无垠海洋的探索，呼唤水下机器人，让研究人员从海上的辛苦和历险中解脱出来。无人、无缆的自主水下航行器就是一种水下机器人，它携带一系列物理、化学、生物传感器测量海水特性，探寻海洋动态过程，还可以趋近海底进行地质测绘。自主水下航行器能运行智能化算法来完成传统方法难以企及的科学任务。文中给出了两例展示自主水下航行器引领的科学发现：对海底火山喷发的新岩浆的精确测绘，以及对有害藻类聚集层的峰值采样。

**关键词:** 自主水下航行器；海洋科学；海底火山；有害藻类聚集层

**中图分类号:** P71

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1674-4969(2016)02-0201-07

地球表面 71% 的面积被大海覆盖，一望无际的海面下蕴藏着一个丰富多彩的世界。大海是我们家园的一部分，但我们对深海的了解还不及对月球表面的了解。对海洋认识的欠缺很大程度上归咎于测量手段的不足。海洋辽阔而深邃，且常有惊涛骇浪。卫星只能观测到大海表面。而从船舶上吊放仪器测量海水的传统方式效率低、耗费高，船员和科学家既辛苦又历险。因此，让机器人代替人下海，一直是海洋研究者奋斗的目标。

### 1 水下孤胆英雄

经过几十年的艰辛历程，自主水下航行器——AUV (Autonomous Underwater Vehicle) 从少量研制到成熟运行，已逐渐成为探索海洋的一支生力军。AUV 不拖带电缆，投放入水后即自主航行，勇往直前，好似一个孤胆英雄。

AUV 的能源是电池，大脑是计算机。AUV 在水下的导航基于对航速、航向和姿态的测量以

及利用声呐测速。此外，AUV 会周期性地浮上水面利用卫星全球定位系统校正航行误差。AUV 携带各种物理、化学、生物传感器，在大海里进行高时空分辨率的测量。由于电磁波在水中骤然衰减，AUV 的“视听”主要依靠声波。AUV 可携带多种声呐，分别用于避免碰撞、搜寻目标、测量水流速度、海底距离和地形、海底沉积层特性、以及定位导航和水下通信。

根据驱动方式的不同，AUV 可分为两类：螺旋桨驱动的 AUV，以及没有螺旋桨、依靠一个浮力控制装置驱动的 AUV (也叫 glider——水下滑翔机)。蒙特瑞湾海洋研究所 (Monterey Bay Aquarium Research Institute (MBARI)) 研制的螺旋桨驱动的 Dorado AUV 见图 1。螺旋桨驱动的 AUV 航行轨迹灵活多样，既可水平航行，亦可沿锯齿状轨迹航行。伍兹霍尔海洋研究所 (Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI)) 研制的螺旋桨驱动的 Sentry AUV 见图 2，它借助独特的

收稿日期: 2015-11-27; 修回日期: 2016-01-11

作者简介: 张燕武 (1969-), 男, 博士, Senior Research Specialist, 研究方向为设计自主水下航行器的信号处理和智能化采样方法。E-mail: yzhang@mbari.org

流线外形和可变换方向的螺旋桨,能够快速潜至海底附近测量,在遇到复杂的海底地形时灵活升降,游刃有余。水下滑翔机的运行,则是通过控制一个油囊充胀或缩小来调节浮力,其上浮或下沉的垂直运动可通过机翼转化为具有水平运动分量的锯齿状航行轨迹。Webb Research Corporation 研制的 Slocum 水下滑翔机见图 3。



图1 MBARI Dorado AUV 长 4.2 m, 中央截面直径 0.53 m。在 AUV 中段装有 10 个快速水样采集器 (Copyright MBARI. 上图摄影: 本文作者; 下图摄影: Larry Bird and Alana Sherman)。



图2 WHOI Sentry AUV: 长 2.9 m, 高 1.8 m, 中央厚度 0.8 m (图引自 <http://www.whoi.edu/page.do?pid=38095&tid=201&cid=39036&ct=362#>)。



图3 Slocum 水下滑翔机: 长 1.5 m, 中央截面直径 0.2 m, 翼展 1.2 m<sup>[1]</sup> (图引自 <http://www.webbresearch.com/electricglider.aspx>)。

螺旋桨驱动的 AUV 速度较快 (约 1.5 m/s), 可以携带比较多的传感器 (包括声呐), 能够完成较为复杂的科学考察任务, 但螺旋桨耗电高, 因此该类 AUV 续航时间较短。水下滑翔机的滑翔速度慢 (约 0.3 m/s), 但没有螺旋桨这个主要的耗电环节, 而且只携带少量耗电量较低的传感器, 因而非常省电, 可以长时间航行。2009 年, 由 Rutgers University 运行的 Slocum 水下滑翔机横穿大西洋, 航程 5300km, 历时 221 天, 除了中途的一次短暂维护外 (清除附着在航行器上的贝类), 它孤军深入, 终达彼岸。2010 年, University of Washington 研制的 Seaglider 水下滑翔机在东北太平洋创造了完全自主航行 5528 km (历时 292 天) 的纪录。MBARI 研制的既有螺旋桨也有浮力控制装置的 Tethys 长程 AUV<sup>[2]</sup>, 兼具两类 AUV 的优点。

AUV 的运行深度取决于科学任务。用于研究海洋生物的 AUV 设计深度一般为几百米, 因为真光层 (即海洋浮游植物进行光合作用的浅水层) 的深度不超过 200 米, 大部分海洋生物生活在真光层里。用于研究海洋地质的 AUV 需要逼近海底, 设计深度为几千米。深度越大, 对水密舱、传感器、浮力材料的抗水压要求越高, AUV 的造价也就越高。螺旋桨驱动的 AUV 中, MIT 的 Odyssey AUV<sup>[3]</sup>、WHOI 研制 (由 Hydroid, Inc. 生产) 的 REMUS-6000 AUV<sup>[4]</sup>、MBARI 用于海底测绘的 Dorado AUV<sup>[5]</sup>、英国的 Autosub6000 AUV<sup>[6]</sup>、以及中国的潜龙一号 AUV<sup>[7]</sup> 都可达 6000m 海深。2011 年 4 月, REMUS-6000 AUV 找到了法航 447 坠机残骸并对其进行光学摄像以及声呐成像<sup>[4]</sup>, 其过程无异于海底寻针。水下滑翔机中, Spray 最深可达 1500m<sup>[1]</sup>。

AUV 研制初期的重点是航行器本身的硬件、软件系统, 目的是让航行器能够按照预先编程的路径、速度和姿态完成测量任务, 不丢失、不损伤, 确保简单航次善始善终, 在这个研究阶段, “AUV” 里的 “A——Autonomous” 主要体现在水下航行器是无人、无缆运行, 离真正的 “autonomous

(自主)”差距尚远。随着 AUV 的成熟运行，研究目标提升为让 AUV 增添智能，趋向真正的自主。

AUV 在航行中，时间、空间都在推移，因而 AUV 的测量记录揉合了海洋场在时间和空间的变化信息。而调节时间、空间揉合比例的“旋钮”就是 AUV 的速度。如果 AUV 跑得飞快，其测量记录就主要体现海洋场在空间上的变化；如果 AUV 跑得很慢，其测量记录就主要体现海洋场在时间上的变化。揉合谱原理 (Mingled Spectrum Principle)<sup>[8]</sup>对 AUV 的测量记录中时间和空间信息的揉合给出了简明的定量分析。这个原理可以用于优化选择 AUV 的速度，对用传统方法不易分辨的海洋信号进行准确分类<sup>[8]</sup>。

欲充分利用 AUV 的“自主”，需赋予其“相机行事”的智能，即根据检测到的海洋信号，自主调节航行和测量参数，以捕捉最重要的海洋信息。巧妙的信号处理方法让 AUV 有越来越强的能力去根据实时测量机动灵活地应对检测到的海洋信号。

WHOI 的 Autonomous Benthic Explorer (ABE) AUV 是深海探幽的老功臣，Dr. Yoerger 带领的小组为 ABE AUV 设计了一种由粗扫到细觅的三步搜索法<sup>[9]</sup>，可以准确找到海底热液喷口，定位误差小于 5 m。MBARI 用于采集水样的 Dorado AUV 上装有多个快速水样采集器，我们设计了一种方法，使 AUV 能够自主捕捉海洋生物信号峰值并触发采集器<sup>[10]</sup>，采回最有意义的水样，供岸上实验室分析。

## 2 入无人之境，探未解之谜<sup>[11]</sup>

AUV 机动灵活，携带各种仪器，可谓耳聪目明。波涛汹涌的海面下，传统研究方式举步维艰之时，正是 AUV 探幽解谜之日。如下两例，足显 AUV 身手。

### 2.1 海底地质精细勘查

陆地上的火山喷发蔚为壮观。地质学家考察陆上火山，虽险象环生，但毕竟看得见、摸得着。海底的火山活动却深不可及，难以观测。一筹莫

展之际，深海 AUV 挺身而出。它可以潜至海底，贴近海底游弋，对海底火山活动所引起的海底地形的变化做出准确测量。

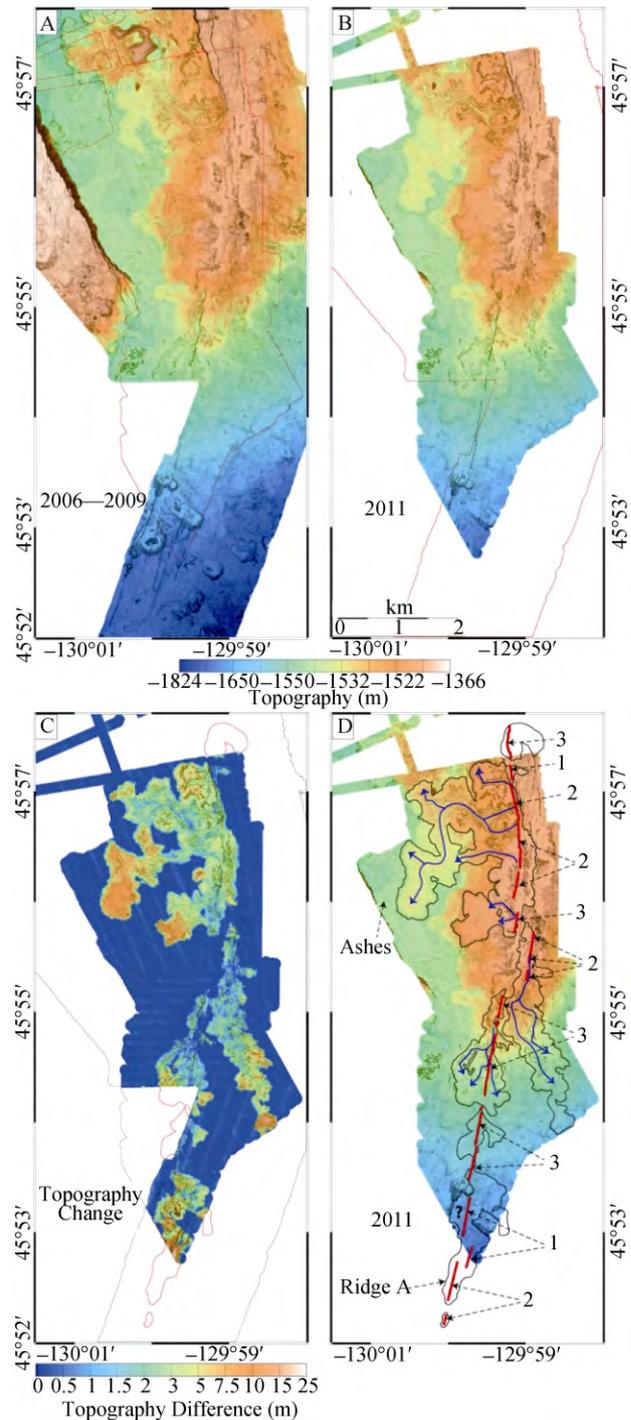


图 4 Axial 海山岩浆喷发前、后的地貌如子图 A、B 所示，两者之差 (子图 C) 显示新岩浆流的厚度和分布。精细地貌由 MBARI 的深海 AUV 携带的多波束声呐测绘而成。(图引自文献[5]，感谢 Nature Publishing Group 许可引用)

Juan de Fuca 海岭位于太平洋板块和 Juan de Fuca 板块接缝处, 海底地震和火山活动频发。2011 年 4 月, 在海岭上的 Axial 海山的火山口(深度约 1400 m), 岩浆喷发。喷发停歇后的同年 8 月, MBARI 的科学家在这个海域投放 Dorado 深海 AUV。Dorado 潜至海底火山喷发区域, 在海底上方仅 50m 的高度航行, 用多波束声呐精确测绘火山口周围的海底地貌, 水平方向分辨率为 1m, 垂直方向精度为 0.2m, 测绘结果如图 4B 所示<sup>[5]</sup>。火山喷发之前(2006—2009), Dorado AUV 在这个区域也已作过多次测绘, 如图 4A 所示。火山喷发前、后的地形高度之差如图 4C 所示, 此图清楚地显示出新岩浆流的厚度和分布, 其最高厚度达 15 米。科学家在回收 AUV 之后, 立即投放有缆水下航行器(remotely operated vehicle, 简称 ROV)作后续勘查。ROV 依据 AUV 生成的精确地形图, 在火山口周围摄像并采集岩样, 验证了新岩浆流的分布和性质。使用深海 AUV, 我们才能逐步解开海底火山之谜。

## 2.2 对海洋生态过程的检测、跟踪及采样

人类赖以生存的氧气有一半是来自于海洋浮游植物的活动。海洋浮游植物通过光合作用吸收二氧化碳、生产氧气, 并合成有机物而成为食物链上最基础的一环。然而, 海洋浮游植物并非尽善尽美, 某些藻类可以产生对鱼类、海洋哺乳动物、海鸟乃至人类有害的毒素。例如, 硅藻中的拟菱形藻属(*Pseudo-nitzschia*)产生的软骨藻酸(domoiic acid)就是一种神经毒素, 通过食物链上传被人食入后, 会对人的神经系统造成损害。2015 年年底, 美国加利福尼亚州沿海出产的蟹类体内检测出高含量的软骨藻酸, 因而被禁捕、禁食。

研究有害藻类的特性, 需要采集有代表性的水样进行生化分析。海洋浮游植物经常聚集在薄层里(薄层的厚度仅一米左右), 聚集层的地点和深度随着季节、风向、风速以及洋流的变化而变化, 时隐时现, 飘忽不定。用船舶搜寻浮游植物

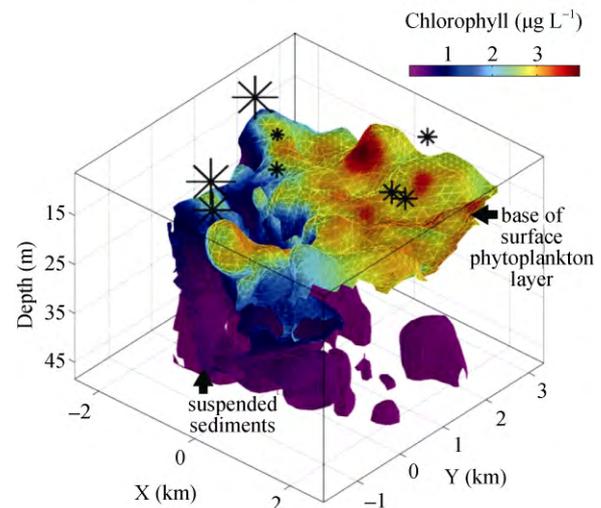


图 5 蒙特瑞湾的浮游植物聚集层(标为黄红色)以及悬浮的海底沉积物(标为紫色)。水体测量及水样采集由 MBARI 的快速水样采集 AUV 完成。星号的尺寸代表每个水样中软骨藻酸毒素的水平。(图引自文献[12], 感谢 Elsevier 许可引用)

聚集层, 效率低、耗费高。即便找到了一个聚集层, 用吊放采样的传统方法采集水样时, 很容易错过薄层里浮游植物的峰值点。搜索、跟踪浮游植物聚集层以及峰值采样皆为难题, AUV 可当此任。

2010 年 10 月, 在美国加利福尼亚州的蒙特瑞湾(Monterey Bay), MBARI 的携带快速水样采集器的 Dorado AUV 与 Tethys 长程 AUV 协作, 跟踪一个海洋浮游植物聚集层<sup>[12]</sup>。Dorado AUV 在垂直面上沿着锯齿状轨迹(深度范围: 2m 至 50m)反复穿过这个浮游植物层(图 5 中的黄红色薄层, 深度在几米和十几米之间不等)。浮游植物富含叶绿素, 因此在这个薄层内, 叶绿素荧光信号最强。AUV 实时运行峰值捕捉算法<sup>[10]</sup>, 在穿越浮游植物薄层的瞬间, 在叶绿素荧光信号的峰值点触发水样采集器。

在采得的叶绿素峰值水样中, 软骨藻酸毒素的水平各不相同(图 5 里, 星号的尺寸对应于每个水样中软骨藻酸毒素的水平)。在悬浮的海底沉积物(图 5 里标为紫色)与浮游植物薄层的交汇处, 软骨藻酸的水平最高<sup>[12]</sup>。先前的实验室研究发现, 铁、铜元素对拟菱形藻属产生软骨藻酸的

过程有很强的调节作用，且机制不尽相同<sup>[13]</sup>。这次海上实验表明，在悬浮的海底沉积物与浮游植物薄层交汇之处，海底沉积物中所含的痕量金属元素促使浮游植物薄层内的菱形藻属产生的软骨藻酸毒素水平明显升高。此次实验揭示了浮游植物聚集层里的软骨藻酸毒素水平与悬浮的海底沉积物之间的关联，加深了海洋生态学家对有害藻类的勃发和分布特性的认识，AUV 功莫大焉。

### 3 宏图徐展，来日方长

多个 AUV 共同作业可以显著提高观测功效<sup>[14] [15]</sup>。依靠水声通讯技术<sup>[16]</sup>，AUV 之间可以交流信息，相应地调节航行轨迹和队形，以获得对海洋场在空间、时间上的优化测量。多个 AUV 可以协同完成科学任务<sup>[17] [18] [19]</sup>，不用再单兵苦战。

海洋观测网络的基础架构，是从岸上基站延伸至海底节点的光电缆向安装在海底节点上的一系列观测仪器提供电能和宽带通信，以实现海水变化和海底地质活动的长时间、不间断的监测<sup>[20] [21] [22]</sup>。然而固定位置的测量，只知此处，不知彼处。AUV 加入海洋观测网络，让海洋观测顿生活力。AUV 的长处是大范围游动搜索，短处是无法对同一空间点不间断监测，知此时难知彼时。固定平台和 AUV 两者协同，则长短互补，“攻”（游动搜索）“守”（长期监测）兼备<sup>[23]</sup>。两类平台实时观测海洋物理、化学、生物过程并不断交流信息，而且根据海洋环境和信号的变化，自主调节测量和运行参数，以捕捉最重要的海洋信息，这就是自适应的海洋观测<sup>[23]</sup>。一个海洋观测网络的综合效能，取决于固定平台和移动平台的功能互补以及自适应观测能力的增强。Curtin 等学者构想的包括卫星、船舶、浮标、水下节点、水下漂流仪（floats）以及协调运行的多组 AUV 的自主海洋采样网络 AOSN（Autonomous Oceanographic Sampling Networks）<sup>[24]</sup>正在从蓝图变为现实。

二十多年前 Bellingham 博士将他的 MIT AUV 命名为 *Odyssey*<sup>[3]</sup>。“*Odyssey*”在字典中的意思是

“a long and challenging journey”（一条充满挑战的长路），源自希腊史诗 *Odyssey*（奥德赛）里讲述英雄 *Odysseus* 在海上不畏艰险、长途跋涉的故事。AUV 的研究工作走的就是这么一条长路，为了我们的水下英雄装备精良，智慧增强，勇而不孤，深翔远航。

### 致谢

我十几年前在 MIT / WHOI Joint Program 攻读博士学位期间，两位导师 Prof. Arthur Baggeroer 和 Dr. James Bellingham 以及 Dr. Albert Williams III、Prof. Chrystostomos Chrystostomidis、Prof. John Leonard 和其他老师对我悉心指导，带我踏上 AUV 研究之路。在 MBARI 工作的十年里，我继续有幸在 Dr. James Bellingham 的领导下，参加研制长程 AUV，并主导设计用 AUV 对海洋生态过程进行自主检测、跟踪、采样的方法。我感谢 MBARI 的 John Ryan、Julio Harvey、Robert McEwen、Michael Godin、Brian Kieft、Brett Hobson、Jordan Stanway、Thomas Hoover、Hans Thomas、Duane Thompson、Douglas Conlin、Eric Martin、David Clague、David Caress、Douglas Au、Robert Vrijenhoek、Francisco Chavez、Christopher Scholin 等同事的热情帮助和并肩努力，以及 David and Lucile Packard Foundation 对 MBARI 研究项目的资助。我感谢同济大学汪品先院士和周怀阳教授的约稿邀请。他们和祖国的其他科学家们对海洋的真知灼见，让我受益匪浅。我也感谢《工程研究》编辑部热情的帮助和细致的工作。

### 参考文献

- [1] D. L. Rudnick, R. E. Davis, C. C. Eriksen, D. M. Fratantoni and M. J. Perry. Underwater Gliders for Ocean Research[J]. Marine Technology Society Journal, 2004, 38(2): 73-84.
- [2] J. G. Bellingham, Y. Zhang, J. E. Kerwin, J. Erikson, B. Hobson, B. Kieft, M. Godin, R. McEwen, T. Hoover, J. Paul, A. Hamilton, J. Franklin and A. Banka. Efficient Propulsion for the Tethys Long-Range Autonomous Underwater Vehicle[C]. Proc. IEEE AUV'2010, 2010, Monterey, CA.
- [3] J. G. Bellingham. Have robot, will travel[J]. Methods in

- Oceanography, 2014, 10: 5-20.
- [4] M. Purcell, D. Gallo, G. Packard, M. Dennett, M. Rothenbeck, A. Sherrell and S. Pascaud. Use of REMUS 6000 AUVs in the Search for the Air France Flight 447[C]. Proc. MTS/IEEE Oceans'2011, 2011, Kona, HI.
- [5] D. W. Caress, D. A. Clague, J. B. Paduan, J. F. Martin, B. M. Dreyer, W. W. C. Jr, A. Denny and D. S. Kelley. Repeat bathymetric surveys at 1-metre resolution of lava flows erupted at Axial Seamount in April 2011[J]. Nature Geoscience, 2012, 5(7): 483-488.
- [6] S. McPhail. Autosub6000: A deep diving long range AUV[J]. Journal of Bionic Engineering, 2009, 6: 55-62.
- [7] 封锡盛, 李一平. 海洋机器人 30 年[J]. 科学通报, 2013, 58: 2-7.
- [8] Y. Zhang, A. B. Baggeroer and J. G. Bellingham. Spectral-Feature Classification of Oceanographic Processes Using an Autonomous Underwater Vehicle[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 726-741.
- [9] C. R. German, D. R. Yoerge, M. Jakuba, T. M. Shank, C. H. Langmuir and K.-I. Nakamura. Hydrothermal Exploration with the Autonomous Benthic Explorer[J]. Deep-Sea Research I, 2008, 55: 203-219.
- [10] Y. Zhang, R. S. McEwen, J. P. Ryan and J. G. Bellingham. Design and Tests of an Adaptive Triggering Method for Capturing Peak Samples in a Thin Phytoplankton Layer by an Autonomous Underwater Vehicle[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2010, 35(4): 785-796.
- [11] 张燕武. 进大海探索, 入无人之境[C]. 名家讲座, 2013, 深圳大学城.
- [12] J. Ryan, M. McManus, R. Kudela, M. L. Artigas, J. Bellingham, F. Chavez, G. Doucette, D. Foley, M. Godin, J. Harvey, R. M. III, M. Messie, C. Mikulski, T. Pennington, F. Py, K. Rajan, I. Shulman, Z. Wang and Y. Zhang. Boundary influences on HAB phytoplankton ecology in a stratification-enhanced upwelling shadow[J]. Deep Sea Research II, 2014, 101: 63-79.
- [13] M. Maldonado, M. Hughes, E. Rue and M. Wells. The effect of Fe and Cu on growth and domoic acid production by Pseudo-nitzschia multiseriata and Pseudo-nitzschia australis[J]. Limnology and Oceanography, 2002, 47(2): 515-526.
- [14] J. S. Willcox, J. G. Bellingham, Y. Zhang and A. B. Baggeroer. Performance Metrics of Oceanographic Surveys with Autonomous Underwater Vehicles[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2001, 26(4): 711-725.
- [15] Y. Zhang, J. G. Bellingham and Y. Chao. Error Analysis and Sampling Strategy Design for Using Fixed or Mobile Platforms to Estimate Ocean Flux[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2010, 27(3): 481-506.
- [16] L. Freitag, M. Grund, S. Singh and P. K. K. B. J Partan. The WHOI micro-modem: an acoustic communications and navigation system for multiple platforms[C]. Proc. MTS/IEEE Oceans'2005, 2005, Washington, DC.
- [17] N. E. Leonard, D. A. Paley, R. E. Davis, D. M. Fratantoni, F. Lekien and F. Zhang. Coordinated Control of an Underwater Glider Fleet in an Adaptive Ocean Sampling Field Experiment in Monterey Bay[J]. Journal of Field Robotics, 2010, 27(6): 718-740.
- [18] J. Heidemann, M. Stojanovic and M. Zorzi. Underwater Sensor Networks: Applications[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2011, 370: 158-175.
- [19] F. Zhang, G. Marani, R. N. Smith and H. T. Choi. Future Trends in Marine Robotics[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2015, 22(1): 14-122.
- [20] C. R. Barnes, M. M. R. Best, F. R. Johnson, L. Pautet and B. Pirenne. Challenges, benefits, and opportunities in installing and operating cabled ocean observatories: Perspectives from NEPTUNE Canada[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2013, 38(1): 144-157.
- [21] H. Xu, Y. Zhang, C. Xu, J. Li, D. Liu, R. Qin, S. Luo and D. Fan. Coastal Seafloor Observatory at Xiaoqushan in the East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(26): 2839-2845.
- [22] 彭晓彤, 周怀阳, 吴邦春, 吕枫, 吴正伟, 杨灿军, 李培良, 李德俊, 金波, 冯正平, 李德平, 美国 MARS 海底观测网络中国节点试验[J]. 地球科学进展, 2011, 26(9): 991-996.
- [23] 张燕武. 自适应海洋观测[J]. 地球科学进展, 2013, 28(5): 537-541.
- [24] T. Curtin, J. G. Bellingham, J. Catipovic and D. Webb. Autonomous Oceanographic Sampling Networks[J]. Oceanography, 1993, 6(3): 83-94.

## Autonomous Underwater Vehicles Lead to Scientific Discoveries in the Oceanic Wilderness

Zhang Yanwu

*(Monterey Bay Aquarium Research Institute, 7700 Sandholdt Road, Moss Landing, CA 95039, U.S.A.)*

**Abstract:** Exploration of the vast oceans calls for underwater robots to free man from laborious and risky adventures on the sea. Autonomous underwater vehicles (AUVs) are unmanned, untethered robots that carry a suite of physical, chemical, and biological sensors to measure water properties and investigate dynamic ocean processes. Deep-rated AUVs can approach the seafloor to map geological features. Intelligent algorithms enable the AUVs to achieve scientific goals that are beyond the capabilities of traditional means. We present two examples demonstrating AUVs' key roles in scientific findings: precise mapping of lava newly erupted from a submarine volcano, and peak sampling from a harmful algal patch.

**Keywords:** autonomous underwater vehicle (AUV); ocean science; submarine volcano; harmful algal patch