

# Oceanic Cobalt-Rich Crust Sampling Innovation and Development Trend

Li Li<sup>1,2</sup>, Zhanzhao Li<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou Guangdong

<sup>2</sup>Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land and Resources, Guangzhou Guangdong

<sup>3</sup>China University of Petroleum (Beijing), Beijing

Email: 1415904422@qq.com

Received: Nov. 1<sup>st</sup>, 2016; accepted: Dec. 3<sup>rd</sup>, 2016; published: Dec. 6<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Ocean cobalt-rich crust contains abundant metal elements and rare earth elements which make it a kind of deep-sea mineral resources with strategic significance. In this paper, we reviewed the actuality of cobalt-rich crust exploration in China, and present a comprehensive introduction of the characteristics of different sampling equipment and the innovation of new sampling techniques. The technological trend and prospects were also analyzed.

## Keywords

Ocean Mining, Cobalt-Rich Crust, Sampling Techniques, Development Tendency

---

# 大洋富钴结壳采样技术革新及发展趋势

李力<sup>1,2</sup>, 李占钊<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广东 广州

<sup>2</sup>国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广东 广州

<sup>3</sup>中国石油大学(北京), 北京

Email: 1415904422@qq.com

收稿日期: 2016年11月1日; 录用日期: 2016年12月3日; 发布日期: 2016年12月6日

## 摘要

大洋富钴结壳富含多种陆地稀缺的金属及稀土元素, 是具有重要战略意义的深海矿产资源。本文综述了我国大洋富钴结壳勘探研究现状, 全面介绍了不同采样设备特点及新式采样技术革新, 同时展望了相关技术的发展趋势和前景。

## 关键词

大洋采矿, 富钴结壳, 采样技术, 发展趋势

## 1. 引言

占地球表面积 2/3 的海洋拥有包括富钴结壳、多金属铁锰结核、热液硫化物等在内的丰富矿产资源。随着陆地矿产资源的急剧消耗和海洋地质调查的逐步深入, 海底矿产成为了全球最重要的资源接替远景[1]。

富钴结壳是大洋中典型的水成沉积矿床, 主要指产于水深 500~4000 m 的海山、岛屿斜坡上岩石表面的壳状自生铁锰氧化物及氢氧化物沉积物。由于富含钴、钛、磷、铅、铂、钼、碲、铈等金属元素和稀土元素[2], 使得富钴结壳成为大洋底部最具吸引力的矿产资源之一。其中, 钴的平均含量是多金属结核的 4 倍, 较陆地原生矿高数十倍, 铂平均含量则高于陆地相应矿床 80 倍[3]。根据调查结果, 太平洋、大西洋和印度洋中都分布有大量的钴结壳矿藏, 其资源总量可能达到 10 亿 t。

由于富钴结壳覆盖面积广、钴含量特别丰富, 具有重要的经济价值, 成为了各国竞相争夺的对象。自上世纪 80 年代以来, 美国、日本、德国、法国、俄罗斯等国家陆续展开了针对大洋富钴结壳的地质调查, 并对采样、勘探、开发等关键技术进行了系统研究。我国的陆上铂金属资源潜力有限, 钴更是急缺矿种之一, 加快大洋富钴结壳各项调查技术的发展突破, 推进在国际海域矿区内的勘探事业, 具有非常迫切的现实意义和战略意义[4]。

## 2. 我国富钴结壳采样技术现状

海洋地质调查、资源勘探和矿产评估是圈定富钴结壳矿区的必要环节, 而海底采样技术的应用则在以上各方面都占据着举足轻重的地位[5], 只有采取到一定数量的沉积物样品, 才能进行直接的结构分析和成分分析, 从中获取的地质信息是相关研究的重要前提和基础; 海底采样技术和设备的更新与改进, 则可为矿区圈定提供更为准确的数据信息, 加速海洋资源勘探与地质调查的进程。

我国对大洋深海底富钴结壳矿产资源的调查与研究起步较晚, 1987 年“海洋四号”科学考察船首次采取了富钴结壳样品。通过二十余年的大力发展, 相关工作取得了显著成果, 依据海洋地质调查工作的阶段性和采样技术的发展历程, 可大体上将我国富钴结壳资源调查工作分为两个时期: 第一时期始于 1997 年航次, 以资源预查或普查为目标, 进行靶区选择和侦察性的调查。该时期富钴结壳地质取样主要依赖抓斗、拖网等传统取样方法, “大洋一号”和“海洋四号”调查船在中、西太平洋进行了 8 个航次、数十座海山的富钴结壳前期调查工作, 在麦哲伦海山区和中太平洋海山区都已发现资源前景较好的富钴结壳矿区。自 2002 年以后航次, 我国富钴结壳资源调查进入了详查阶段。该时期工作要求对部分调查过的海山进行加密取样, 为结壳矿区圈定和矿区申请做相关准备。在这一时期, 勘探工作逐步深入, 调查研究对采样精度和深度提出更高的要求, 调查取样方法随之不断改进, 使用的设备也得到更新换代。调查方法增加了取样地理位置准确为特点的深海浅钻和可视抓斗, 并逐渐以深海浅钻和可视抓斗取样为主。

通过新方法、新技术的应用,我国大洋富钴结壳调查工作取得突破,在2013年取得了西北太平洋富钴结壳矿区的专属勘探权和优先开采权,成为世界首个拥有3个海底矿区的国家[6]。

近几年来,海洋地质调查仪器也有了不同程度的发展和创新,一大批更先进、高精度的调查仪器不断涌现[7]。本文旨在结合海洋地质调查实际工作,通过梳理各种传统采样方法和新型采样方法的技术特点、相关设备、适用范围以及应用情况,对我国大洋富钴结壳资源调查工作展开全面介绍,并着眼国际最新成果,对相关采样技术的发展趋势和前景进行展望。

### 3. 传统采样技术应用

我国的大洋富钴结壳调查工作,早期主要依靠“大洋一号”和“海洋四号”科考船,通过其搭载的无缆抓斗、拖网、箱式取样等传统海底采样设备进行资源普查与评估。传统海底取样技术与设备虽然与20世纪末逐步发展起来的新型海底取样设备在高新技术应用方面存在诸多差距,但以其作业成本低,对船舶、绞车、海况等条件要求不高等优点,成为海洋地质调查不可替代的专用设备,为我国富钴结壳专属经济区的圈定奠定了坚实基础,并一直以旺盛的生命力存在和发展:

#### 3.1. 抓斗和箱式采样

抓斗和箱式采样都是最早发明和使用的技术手段之一,由于具有体积小、易搬运、易装卸、操作简单、取样效率高的特点而被广泛采用。抓斗采样器由斗体和释放板两部分组成,主要用于采取海底0.3 m~0.4 m深的浅表层土砂样。箱式取样器由箱体、铲刀和释放板组成,主要应用于采取不受扰动的海底表层沉积样品,采集样品可供沉积物结构构造分析[8]。

以上两种采样方法在浅海各种底质类型和地形海区均得到良好应用,但受限于设备强度,无法满足深海样品的采样工作。同时,采集样品多局限于海底表层,难以获取深层、连续性富钴结壳。

#### 3.2. 拖网采样

结壳拖网是早期资源普查中最主要调查手段,一般用于采取海洋基岩、砾石及粗碎屑样品(图1)。富钴结壳拖网设备由拖斗、尼龙网袋及保护钢缆组成,配以绞车、导航定位和测深仪等辅助设备。作业时综合利用辅助设备定位,通过绞车将拖网放置在海底,保持钢缆具有一定倾斜角度,利用船速、漂速或收拉缆绳等动力拖动拖斗沿着海山斜坡拖去样品。拖网没有统一的尺寸,可根据实际需要定制拖体的尺寸与网具尺寸及网眼大小。我国具备在水深达4000~6000 m的海底进行富钴结壳采样能力,“海洋四号”科学调查船在东太平洋探测介壳是用的拖网体重量240 kg,开口尺寸1200×500 mm [5]。

拖网作业由于对船体相应硬件配置要求较低而被广泛采用,但在实际工作中亦有其局限性甚至危险性:1) 采用的拖网往往无法准确在水下定位,其采样结果仅代表拖网行进轨迹,无法进行定点定位准确取样;2) 实际工作情况表明,拖网站位取得的钴结壳厚度往往要小于浅钻和电视抓斗采样站位厚度,同时所采样品泥沙俱下,往往缺乏针对性;3) 受海况、海底地形、水深和各类型结壳的不同生长特征等因素的综合影响,拖斗勾住海底、丢拖斗、拖不到样品等情况经常发生,严重时甚至拉断钢缆,造成重大损失。因此,一直以来,怎样安全、高质、高效地进行结壳拖网是科考人员不断探讨和解决的问题。

#### 3.3. 重力柱状取样

不同于抓斗、拖网等技术只能满足洋底表层沉积物的普查工作,重力柱取样技术最早解决了海底未固结沉积物连续性柱状样品采集的难题。由于设备结构简单、使用方便、一般不受水深限制而被广泛应用到富钴结壳资源精细调查评价工作中。



**Figure 1.** Dredge equipment for cobalt-rich crust sampling  
**图 1.** 富钴结壳拖网设备

重力取样的其基本原理是取样器依靠自身重力作用贯入海底, 取得近似于贯入深度的海底沉积物样品。根据触底方式的不同, 其技术设备可分为重力柱状取样器和重力活塞取样器两种: 重力柱状取样器由重锤、取样管组成; 重力活塞取样器由重锤、取样管、释放器系统、活塞系统等组成(图 2)。国内使用重力柱状取样设备的重量从几百公斤到 3 t 不等, 装管长度从 2~18 m, 其贯入深度取决于海底的硬度和取样器的结构形状与配重, 一般样品收获长度在几十厘米至十米之间[9]。

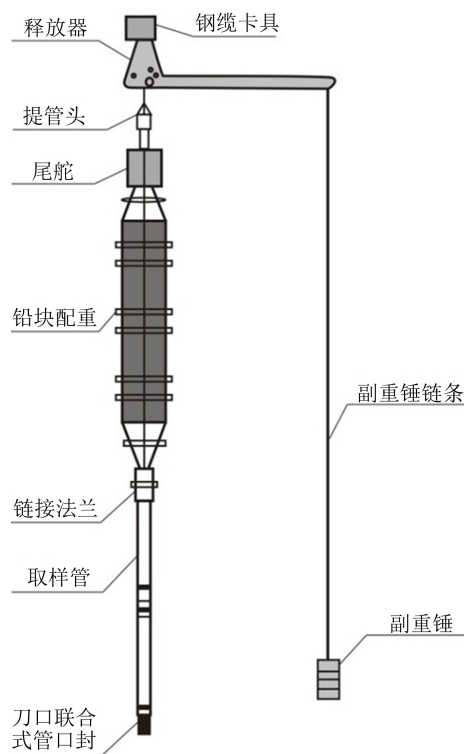
作为传统采样技术, 由于缺少可视、可控和必要的动力源, 重力柱状取样技术也存在其缺陷。首先, 重力取样技术无法在硬质岩石类海底开展工作, 在缺乏配套可视化装备的情况下对于工区海底底质判断成为了其应用的障碍。在复杂地形区和特定目标区难以开展有效采样, 通常只能进行不可控的盲采样; 其次, 随着取样器贯入深度的增加, 取样管内摩擦力急剧增大, 容易发生取样管内样品被压实的“桩效应”, 造成样品原始物理参数的改变[10]。

#### 4. 新型采样技术应用

采样技术的发展主要体现在对传统技术的改进和新技术的发明与应用两方面: 电视抓斗、长重力活塞取样等采样方法, 都是针对传统采样技术缺陷进行技术升级而产生的。而深海浅钻、水下机器人(ROV)等新型采样技术则是海洋地质调查仪器在可视化、精细化发展趋势中应运而生的新发明[11]。2002 年我国“大洋一号”科考船重新进行了调查系统的总体设计, 完成了现代化增改装, 安装了深海照相机系统、深海浅地层岩心钻机、电视抓斗等一大批先进的大型设备。2009 年“海洋六号”综合调查船正式启用, 其搭载的水下声学定位、长重力活塞取样、ROV 等系统具有国际先进技术及设备。至此, 新型采样技术在我国大洋富钴结壳调查工作中开始得到了广泛应用。本文选取了以下几种具有代表性的新型富钴结壳采样技术进行介绍。

##### 4.1. 电视抓斗

电视抓斗, 是传统采样技术结合新型仪器的代表性产品, 顾名思义是通过铠装电缆把可视化抓斗下



**Figure 2.** The general assembly drawing of the long gravity piston corer  
**图 2.** 长重力活塞取样器示意图

放至海底, 通过人工指令控制抓斗的开合完成采样过程的技术(图 3)。电视抓斗由通讯控制系统、甲板控制系统、主框架、斗体、摄像机、照明灯、高度计等组成。在传统技术基础上, 增加了新型机构设计与深水液压力系统、深水视觉与控制信号的远程波通讯、抓斗自动测控及甲板监视技术等最新的关键技术。由于在采样过程中可以对斗体进行可视化精确导航, 大大提高了设备性能稳定, 具有操控简便、实用性强的特点, 可在水深 4500 m 的海底进行各类地质样品的取样, 成为我国深海底富钴结壳调查不可或缺的采样仪器。2003 年 6 月, 我国第一代电视抓斗顺利通过专家组海试验收。现装备在“大洋一号”调查船上的电视抓斗外型尺寸 2.1 m × 1.4 m × 2.1 m, 重量 2.2 t, 最大可抓取 800 kg 以上的沉积物, 在大洋调查中, 电视抓斗曾成功抓取重 500 kg 的巨大砾状结壳[12]。

在实际使用过程中, 电视抓斗采样的缺点主要表现在当仪器在海底停留时间过长, 往往因船体移动, 绞车钢缆扯动倾角大, 容易造成抓斗拉偏或拉倒, 更为严重甚至把钢缆扯断, 使仪器丢失, 所以抓斗到达海底后, 一旦发现被抓取的目标, 要果断发出闭合信号, 并立即提升抓斗, 以避免危险发生[7]。

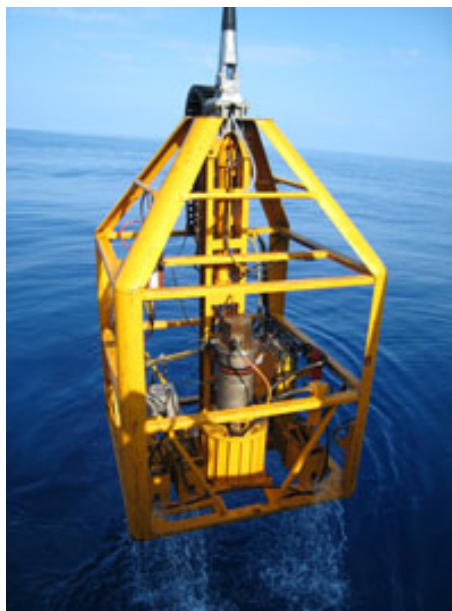
#### 4.2. 深海浅钻

深海浅钻是集机、电、液、光等多学科于一体的复杂采样设备系统, 不但能够实现定点获取结壳岩心样品, 而且勘探效率高、作业过程相对安全, 是目前富钴结壳资源勘查最重要的方法之一。

2003 年装备在“大洋一号”科考船上的深海浅钻机, 钻深 0.7 m, 作业水深 4000 m 以内, 连续几年在“大洋一号”科考船上进行富钴结壳资源调查, 是目前世界上同类产品在海底下取芯次数最多的设备[13]。搭载于“海洋六号”船的 1.5 m 深海浅钻系统更为先进, 主要由钻机本体(图 4)、甲板操作控制子系统、甲板高压供变电和水上水下通讯子系统等部分组成。其外形尺寸 2 m × 2 m × 3.1 m, 重 2.8 t, 适用水深 4000 m, 最大钻孔深度 1.5 m, 岩心直径 48 mm, 可钻取岩石硬度达到普氏硬度 8 级, 能满足 20°



**Figure 3.** Grab with TV sampling  
**图 3.** 电视抓斗抓取样品



**Figure 4.** The equipment of drill for deep seabed shallow strata  
**图 4.** 深海浅钻采样设备

坡面和四级海况条件下正常使用。在调查船动力定位支持下，设备可以保证安全高精度地对目标海山进行定点钻取富钴结壳岩心。

深海浅钻采样技术也有其局限性，主要表现在取样长度受地层类型强烈影响。均一、偏软的地层内取样岩心长度较长且完整；而含有多种岩石类型的复杂地层容易造成钻具堵塞。同时，富钴结壳多分布在海山坡体上，在坡度较大时浅钻难以放稳，需多次进行寻址作业，并容易造成光电复合缆损伤。

### 4.3. 水下机器人 ROV 取样

水下机器人(Remote Operated Vehicle = ROV)，主要用于深海极端环境下科学考察取样和多种条件下

海底观察取样作业, 是对深海浅钻技术的有力补充。在大洋海山复杂地形下, 每当选址海山的斜度大于 $20^{\circ}$ 时, 深海浅钻取样钻机难于座底, 无法取得富钴结壳并存在很大施工风险。以 ROV 为平台, 设计并加装富钴结壳采样器, 可为我国大洋资源勘查、评价和矿区圈定提供可靠地质样品数据的同时, 也为开采富钴结壳提供实用的工程数据[14]。

ROV 主要由通讯控制系统、液压控制系统、电力配送系统、液压补偿系统、浮力调节系统、摄像照明系统和光纤传输系统等组成。其设备本身是集成性平台, 预留有控制接口、液压接口, 配有机械臂, 可在水面对机械手进行遥控操作和协调作业, 以实现常规取样设备无法完成的复杂取样工作。目前, 我国“海马号”ROV (图 5) 作业最大水深为 4500 m, 已完成多次下潜采样任务。由我国自主研制的“蛟龙号”载人潜水器成功下潜突破 7000 m, 2013 年, “蛟龙号”在西北太平洋航段采回了一块富钴结壳样品 [15], 为我国未来深海运载技术和矿产资源的勘探开采奠定了基础, 也标志这我国在大洋富钴结壳探测、深潜及采样技术方面达到了国际先进水平, 进入“机器人时代”。

## 5. 新老采样技术对比

综上所述, 传统采样方式具有体积小、成本低廉、操作简易等优点, 但其采样精度低, 风险系数较高, 注定将被时代摒弃, 而新式采样技术虽然目前尚存在造价不菲、故障较多等缺点, 但以后技术趋于完善, 投入量化生产, 以上问题将迎刃而解。

## 6. 富钴结壳采样技术的发展趋势

21 世纪是海洋的世纪, 世界各国争夺海洋资源、开发海洋潜能, 美国、俄罗斯、德国、日本、法国等国都已相继完成了深海富钴结壳相关的技术储备。目前中国的金属钴很大程度上依赖进口, 加速推进深海资源调查和开采具有迫切的现实意义[16]。纵观当今大洋富钴结壳采样技术的特征可以看出, 对传统设备的技术升级和新发明的集成应用是行业未来发展的主要趋势。新技术的应用成为传统方法的补充, 在传统调查仪器的基础上, 通过提高采样精度和技术上的创新, 更为准确地揭示更多的深海富钴结壳的



Figure 5. ROV equipment  
图 5. 水下采样机器人 ROV

信息, 其主要发展趋势表现在以下方面:

(1) 实时操控性: 同轴缆线和光缆的应用使得实时数据传输和同步动力操控深刻的改变了海洋地质取样设备的取样方式。数据传输可以将海底视频信号同步传输至甲板监视器实现可视化, 并可以通过甲板控制系统对水下设备进行自主动力控制。完成对海底寻址、钻进动力头工作过程的彩色电视实时同步监控, 同时还可进行钻机运行传感器数据的上传显示和操作指令的下传。电视抓斗、深海浅钻等技术都是在传统采样技术上, 通过搭载实时操控系统改进而成, 使得大洋采样过程更具主动性和针对性。

(2) 动力定位系统: 大洋富钴结壳资源调查受海流、风力、波浪等外界作用影响, 导致效率和精度下降, 甚至对设备造成损坏。随着船舶动力定位的使用, 船舶可以长时间保持在预设点位或轨迹, 让精确取样成为现实[17]。通过在海底摄像、海底拖网、深海浅钻、重力活塞取样和 ROV 技术中配置动力定位系统, 可以实现对海底位置的水下精确定位。在作业过程中, 可将预设的海底取样坐标点精度由以往的 500 半径缩减精确到 10 m, 大大提高了作业效率与作业效果, 是未来取样工作的发展趋势。

(3) 设备集成化: 取样设备功能多样化: 未来的海底取样设备将是具有多种功能的作业结合体, 而不仅仅是单一的取样器。在海底行进的可视化取样装备基本就相当于海底摄像系统, 因其配备的高清摄像系统实时传输记录着视频信号。目前在电视抓斗上可以搭载 CTD、采水器等各种传感器探测装置进行实时信号记录、传输与显示, 通过甲板供电进行长时间的拖曳观测和即时采取水样, 极大的提高了探测效率, 在一定意义上替代拖体。ROV 系统更是一个开放各种调查设备的集成接入, 可接入新的海洋取样设备及各种工具[5] (耿雪樵等, 2009)。

## 7. 结论

伴随着人类社会的飞速发展, 自然资源日益减少, 而占地球表面积的 71% 的海洋底部却蕴藏着极具潜力的富钴结壳资源, 而相关开采技术早已成为全世界各国研究热点。我国在海洋资源勘探方面较之美日法德等大国起步较晚, 技术设备也相对落后, 但随着我国对海洋调查的日益深入和科技的高速发展, 调查设备也渐渐与国际顶尖水平缩小差距, 迈上新的台阶。曾经为大洋富钴结壳开采立下汗马功劳的诸如拖网、箱式和抓斗等老式取样设备将渐渐退出历史舞台, 而新式采样设备如深海浅钻、电视抓斗和水下机器人(ROV)等目前已成为大洋作业的主力设备, 笔者相信在不久的将来, 随着更加高精度、高清晰的水下可视装备研发成功, 新式富钴结壳采样技术定会为我国大洋科考事业做出重大贡献。

## 参考文献 (References)

- [1] 武光海, 周怀阳, 杨树锋, 陈汉林. 大洋富钴结壳研究新进展[J]. 高校地质学报, 2001, 7(4): 379-389.
- [2] 周向前, 刘志强. 大洋钴结壳中有价金属开发技术的综述[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(11): 89-92.
- [3] 陈新明, 吴鸿云, 丁六怀, 等. 富钴结壳开采技术研究现状[J]. 矿业研究与开发, 2008, 28(6): 1-19.
- [4] 梁平, 石海林, 崔波, 等. 洋底富钴结壳的开采方法[J]. 金属矿山, 2002, 2(11): 20-22.
- [5] 耿雪樵, 徐行, 刘方兰, 等. 我国海底取样设备的现状与发展趋势[J]. 地质装备, 2009, 10(4): 11-16.
- [6] 陈剑尚, 冉孟胶. 大洋富钴结壳地质特征及其成因机制[J]. 中山大学研究生学刊(自然科学、医学版), 2015, 36(1): 29-34.
- [7] 程振波, 吴永华, 石丰登, 等. 深海新型取样仪器——电视抓斗及使用方法[J]. 海岸工程, 2011, 30(1): 51-54.
- [8] 蓝先洪, 温珍河, 李日辉, 等. 海底地质取样的技术标准[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(2): 50-55.
- [9] 阮锐. 海底重力取样技术的探讨[J]. 海洋测绘, 2011, 1(1): 3-7.
- [10] 曾宪军, 伍忠良, 郝小柱. 海洋地质调查方法与设备综述[J]. 气象水文海洋仪器, 2009(1): 111-120.
- [11] 盛堰, 谭鹰, 陈宗恒, 等. ROV 在我国海洋区域地质调查中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2013, 29(11): 67-71.
- [12] 王苗苗, 顾玉民, 杨帆. 海底可视技术在大洋科考中的应用和发展趋势[J]. 海洋技术, 2012, 31(1): 115-118.



- 
- [13] 于彦江, 段隆臣, 刘方兰, 等. 深海浅钻在富钴结壳资源勘查中的应用[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(11): 89-92.
- [14] 田烈余, 盛堰. 基于海马号 ROV 富钴结壳的钻取技术研究[J]. 机电工程技术, 2015, 44(11): 13-15.
- [15] 戴瑜, 刘少军. 深海采矿机器人研究: 现状与发展[J]. 机器人, 2013, 35(3): 363-375.
- [16] 何清华, 李爱强, 邹湘伏. 大洋富钴结壳调查进展及开采技术[J]. 金属矿山, 2005, 347(5): 4-7.
- [17] 何水原, 罗伟东, 于彦江, 等. 动力定位系统在大洋富钴结壳调查中的应用[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(10): 57-64.

**期刊投稿者将享受如下服务:**

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [ams@hanspub.org](mailto:ams@hanspub.org)