

文章编号: 1004-4051(2023)09-0182-05

DOI: 10.12075/j.issn.1004-4051.20230672

# 地球系统科学理念下地质数据采集趋势及启示

唐晓倩<sup>1,2</sup>, 王菲菲<sup>1</sup>

(1. 北京中矿联咨询中心, 北京 100029;

2. 成都理工大学, 四川 成都 610059)

**摘要:** 当前科学技术革命深刻演进, 全球性气候、资源、环境等问题日益凸显, 越来越多的地质机构倡导地球系统科学理念, 地质工作也步入重大转型发展阶段。为了探寻新形势下我国地质数据的采集策略, 本文提出了地球系统科学理念下地质数据采集需要着眼于多圈层、长时序、全属性的数据。地质数据采集工作具有自动化、实时化、智能化、集群化、立体化的趋势。新形势下, 要以系统观为指导构建多元数据体系以解决具体资源环境问题; 持续健全“立体式”数据采集网络以掌握全域地质、自然资源、生态等基础数据; 积极研发更多智能采集技术以应对人工智能的迅猛发展; 打造高集成度的数据采集工作体系以满足地质工作高质量发展的内在需求。

**关键词:** 地球系统科学; 地质数据; 数据采集; 发展趋势; 数据采集策略

**中图分类号:** TD-9 **文献标识码:** A

## Trends and implications for geological data collection in the concept of earth system science

TANG Xiaoqian<sup>1,2</sup>, WANG Feifei<sup>1</sup>

(1. Beijing CMA Consulting Center, Beijing 100029, China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The current science and technology are undergoing profound evolution, and global issues such as climate, resources, and environment are becoming increasingly prominent. More and more geological institutions advocate for the concept of earth system science. Geological work has entered a major stage of transformation and development. In order to explore the geological data collection strategy in the new situation. This paper proposes that the geological data collection in the concept of earth system science needs to focus on data with multiple layers, long time series, and full attributes. The geological data collection has the trend of automation, real-time, intelligence, clustering, and three-dimensional. In the new situation, diversified data system guided by system perspective needs to be built to address specific resource and environmental issues; the “three-dimensional” data collection network needs to be continuously improved to grasp basic data on geology, natural resources, ecology, and other aspects of the entire region; more intelligent collection technologies need to be actively developed to cope with the rapid development of artificial intelligence; highly integrated data collection system needs

收稿日期: 2023-09-08 责任编辑: 刘硕

第一作者简介: 唐晓倩(1986—), 男, 汉族, 浙江嘉兴人, 硕士, 工程师, 主要从事地质矿产等方面研究, E-mail: txq0219@126.com。

通讯作者简介: 王菲菲(1979—), 女, 锡伯族, 北京人, 硕士, 高级工程师, 主要从事工程管理方面研究, Email: wff\_791001@126.com。

引用格式: 唐晓倩, 王菲菲. 地球系统科学理念下地质数据采集趋势及启示[J]. 中国矿业, 2023, 32(9): 182-186.

TANG Xiaoqian, WANG Feifei. Trends and implications for geological data collection in the concept of earth system science[J]. China Mining Magazine, 2023, 32(9): 182-186.

to be created to meet the inherent needs of high-quality development in geological work.

**Keywords:** earth system science; geological data; data collection; developing trend; data collection strategy

## 0 引言

地球科学在过去数百年时间中不断发展, 学科分类持续细化, 数据主要以学科体系为框架进行采集。随着全球性资源环境问题的出现, 科学家们意识到在某一个或几个学科内不能给出有效解决方案, 而是需要全面认知地球系统各圈层的变化规律和实时状态, 才有条件预测未来趋势和做出应对, 这对原有地球科学数据的采集和利用方式提出了新挑战。美国地质调查局(USGS)在2020年提出EarthMAP愿景, 要对地球系统进行监测、分析和预测<sup>[1]</sup>。同时, 以大数据、云计算为代表的新一代信息技术的发展, 促使很多科学领域由“实验归纳”“模型推演”范式快速向“仿真模拟”“密集数据分析”的范式转变, 新范式对地球科学数据的类别、体量、架构和时效性都有新要求。随着物联网、传感、通讯、人工智能等技术的快速发展, 有些领域已经涌现出一批自动化、智能化的新型数据采集装备, 这些技术进步是未来提升数据采集能力的重要支撑力量。在倡导地球系统科学理念和新技术快速变革的大背景下, 地质数据采集应如何调整, 是关系到地质工作如何转型发展的重要命题。

### 1 地球系统科学数据采集的若干模式

地球系统科学理念下的数据采集需要着眼于多圈层、长时序、全属性的数据, 主要有以下三个尺度的模式。

#### 1.1 具体地区的多元数据体系构建

从解决具体地区、具体问题的需求出发, 着眼于人地相互作用系统, 不拘于学科、不囿于领域、不限于手段, 采集、搜集和整合所有影响问题解决各类数据, 为解决问题创造基础数据条件。以美国粉河盆地煤系资源开发对环境 and 地方经济影响研究为例, 将煤炭和煤层气开发作为主要变量, 分析煤系资源开采对地表、地下水、地表水、特定栖息地和经济收益等方面的影响。研究工作主要搜集了人地作用系统相关领域的的数据, 包括煤、煤层气、地表水、地下水、部分野生动物栖息地、牧草、土地扰动和土地所有权的数量与位置等数据, 补充采集了煤和煤层气的开发数据, 构建了多元数据体系, 为分析和预测不同能源开发情景下对水资源、生态资源、经济和社会效益的影响提供了基础。再以盆地二氧化碳地质封存选址工作为例, 目标是寻找安全、稳定、环境风

险低的二氧化碳地下储存空间, 需要搜集目标区内基础地质和水文地质特征, 地层岩性、孔隙度、化学属性和岩石力学参数, 活动断裂、地震、地质灾害等特征, 咸水层、煤矿采空区、枯竭油气藏的分布范围及层位, 地形地貌、人口密度、城镇分布等地面条件, 矿业权、林权、土地所有权等已有数据, 还需要补充采集500 m以下的地层、断裂和褶皱构造等数据, 确保二氧化碳封存选址的科学合理、泄露风险最小、环境干扰最低<sup>[2]</sup>。

#### 1.2 区域尺度的岩土水气生数据联合采集

为获取圈层物质运动和能量转化的动态数据, 采用“以点带面, 以小见大”的理念, 选择不同类型的代表性区域建设野外观测站网, 配备必要的调查、观测、探测和监测技术装备, 为同一时空条件的圈层数据耦合分析创造条件, 为分析更大尺度的圈层相互作用提供“窗口”。美国建设了10个地球关键带观测站, 在典型地区以分水岭限定的封闭、半封闭区域为观测对象, 旨在研究发生在岩石、土壤、水、空气以及生物之间的相互作用<sup>[3-6]</sup>。观测站通过实时监控水文通量、气候条件和土壤的温度、含水率及导电率等参数, 开展区域性地球化学、地球物理调查, 采取水、土壤和岩石等样品进行分析测试, 利用遥感、摄像和雷达等监测动植物情况, 利用上述技术手段实现岩土水气生多元数据采集, 为监视地表作用过程和预测未来趋势创造了基础数据条件<sup>[7]</sup>。美国地球关键带观测站网已为区域水文功能研究和水资源管理、花岗岩基岩与红杉林的协同演化等研究工作提供了基础数据, 为认识关键带和水文功能的联系、基岩风化对植被的控制发挥了重要作用<sup>[5]</sup>。

#### 1.3 全球尺度上的多要素多属性数据提取

卫星对地观测具有覆盖面全、重复周期短、应用领域广等特点, 能够获取全球绝大多数地区的地表信息和地球物理信息, 通过对原始数据进行不同时段、不同用途、不同层次的提取分析, 能为解决全球性资源环境问题提供基础数据。美国实施的全球卫星观测系统记录了1972年以来的地表数据, 这些数据可以应用于土地利用变化、森林变化、城镇化、地球变暖、矿产资源、自然灾害和地貌景观等领域<sup>[8-9]</sup>。随着传感器技术的快速发展, 观测的分辨率和精度大幅提升, 卫星观测的服务领域不断深化和拓展。例如我国2018年发射的海洋二号B卫星通过装载海

洋波谱仪和海洋散射计,可以用于测量海面高度、有效波高、海流和重力场参数,海面温度、海面风速、海冰、海洋上空降雨量、水蒸气含量、液态水含量等海洋动力环境参数<sup>[10]</sup>。可以展望,未来卫星观测技术能够提取出更高精度的风、雨等气候数据,森林、草原、湿地、地表水、土壤、冰川、荒漠等自然资源与生态数据<sup>[9]</sup>,地表形变、地质灾害等陆表位移数据<sup>[11]</sup>,重力场、磁力场等地球物理数据。

## 2 地质数据采集的重要趋势

当前物联网、大数据、人工智能等技术正推动各行各业大变革,地质相关领域的数据采集工作具有以下几个重要的趋势。

### 2.1 数据采集自动化

得益于无人装备的日趋成熟和传感器技术的快速进步,某些领域已经实现自动采集数据。国际上先进的无人水下滑翔机通过装载特定传感器,可以自动获取压力、电导率、温度、湍流、海流、硝酸盐以及溶解氧等海洋环境参数<sup>[12]</sup>。无人船搭载水质传感器可以更高效率地自主获取水体的温度、盐度、蓝绿藻、氨氮、总磷等水质数据<sup>[13]</sup>。我国已经有无人机装载的航磁、航拍、激光雷达等技术,应用于地质找矿、国土空间用途管制、地质灾害防治等工作<sup>[14-15]</sup>。

### 2.2 数据采集实时化

依托物联网和 5G 即时通讯技术,地震、地质灾害等监测领域实现了数据采集、传输、预警或展现的快速完成。我国地震台网能够在 2 min 内监测和定位国内 2.5 级(里氏震级)以上的地震<sup>[16]</sup>。对于地质灾害而言,陕西省 205 起地质灾害成功预报案例的分析结果显示:预警发出后地质灾害在 1 h 内发生的比例为 12.2%; 1~3 h 发生的比例为 15.6%; 3 h 以上发生的比例为 72.2%,预警提前至 1 h 内就可以发挥重要作用<sup>[17]</sup>。依托现代化的地质灾害监测预警体系,我国目前具备泥石流提前数分钟至十几分钟、崩塌和滑坡提前数分钟至数小时发出预警的技术条件和能力<sup>[18]</sup>。

### 2.3 采集技术智能化

随着大数据、人工智能等技术的发展,很多数据采集设备不仅能实现自动化运行,还能够自主分析、判断和决策,采集智能化水平不断提高。海洋浅地层剖面探测系统可以实现根据不同回波时间来推断海洋底质成分,结合不同底质层声速、地形地貌、多波束回波强度等数据,实现海洋底质层的智能分类<sup>[19]</sup>。我国正在研发的 5 000 m 深度智能钻探技术,基于孔底在线数据、地表即时数据和岩心快速测试信息等多元信息融合,实现钻压、转速等钻进参数的智能化

控制,自主调整钻进操作以规避异常状态,提高钻探作业的安全性、效率和取芯质量<sup>[20]</sup>。随着地球科学领域数据的增加和汇聚、知识库的建设和丰富,“智能+”的应用领域将更加普遍和广泛。

### 2.4 采集技术集群化

通过在同一(组)运输载体装配不同类型数据的采集设备,可同时获取多门类数据,成倍提升数据采集效率。我国“海洋地质九号”科考船通过装配多道地震、多波束、侧扫声呐、浅地层剖面、重力、磁力、海底取样、钻探等设备系统,可以实现地震、声学、重力、磁力等数据的同步采集,在重点区域还可以通过海底采样和钻探获取洋底沉积物和洋壳的地质数据<sup>[21]</sup>,实现了多手段的集成化应用。随着飞机、车辆、船舶、潜水器等装载设备的载荷更大、续航更长、运行更稳定,将为研发大型集成装备创造有利条件<sup>[19]</sup>。

### 2.5 采集网络立体化

以海洋观测监测体系为例,美国、欧盟等国家和地区已逐步构建了由海洋卫星、海洋浮标测阵、沿海台站、移动潜水器、海底取样与观测装置、大洋深钻等组成的立体监测网络,可以获得海水表层、深层、洋底、洋下岩石圈的科学数据<sup>[22]</sup>。美国利用陆地卫星观测实现了地球表面全覆盖,构建了网度 70 km×70 km 的宽频地震和大地电磁测量的深部探测网络<sup>[23]</sup>,运行着监测地表水、地下水和大气降水、由 13 000 个以上即时监测站组成的水观测系统,构建了陆域“立体式”的地球系统科学数据采集网络。

## 3 对地质数据采集的启示

### 3.1 以系统观为指导构建多元数据体系

对于区域尺度的跨学科、跨专业的综合性问题,地质工作要着眼于地球多圈层系统、人类生活生产系统及二者相互关系,构建和完善多圈层多要素数据采集体系。一是对于解决流域、平原区、城市群等区域内影响人类生产生活的环境问题,要聚焦人地相互作用进行数据采集和数据体系建设。在地质灾害调查评价工作中,基于地质灾害风险调查,应加强气候、水、地表植被等其他科学数据的搜集工作,构建影响地质灾害发生的全要素数据体系。二是对于破解制约找矿、找油等资源问题,从圈层相互作用角度进行数据采集和数据体系建设。在能源和矿产资源相关工作中,持续加强重要成矿区带、含油气盆地深部地质构造的数据采集,形成从岩石圈浅部到深部的成藏成矿地质背景数据体系。三是对于解决区域尺度资源环境动态和演化趋势认知不足的问题,建设一批野外观测站实现多元数据采集。聚焦流域、盆地、海岸带、生态功能区等代表性区域,以提升地

上、地下物质和能量作用过程的认知程度为目的,借鉴美国地球关键带观测站网建设经验,在已有地球科学野外观测站的基础上,建设一批“互补型”观测站。

### 3.2 持续健全“立体式”数据采集网络

坚持生态文明建设和促进人地和谐共生,需要掌握域内自然资源、生态本底及承载二者的地质背景数据,数据采集网络需要不断完善。一是填补中比例尺区域性地质调查数据空白。中比例尺(1:20万~1:25万)是有助于提升认知程度且较为经济的调查精度,我国剩余空白区主要为覆盖区,可以充分利用卫星重力、卫星磁测、航空物探和适量地面物探,结合已有钻孔数据,对覆盖区进行“揭盖”,形成陆域中比例尺的基础地质数据。二是加强卫星对地观测和复杂数据提取。继续攻关卫星数据多要素数据提取技术,推动应用领域进一步拓展与深化。三是增加深部探测和常态化监测数据采集密度。我国现有大地电磁测量密度仅为150 km点距,应加大建设力度。

### 3.3 积极研发更多智能采集技术

人工智能技术正在对传统行业进行前所未有的改造甚至替代,地质工作“智能化”是必然趋势。在想象所及的范围内,智能遥感能够实现数据自动采集和自主分析,围绕地质灾害预警、国土空间管制、自然资源监测等不同需求开发服务产品;地下水智能监测能够实现水量、水质、水生态等数据的自动采集和自主分析,为水资源管护自行提供决策依据;岩矿智能识别能够实现岩石、构造和矿物的自主辨认,机器人(车)可以在野外调查中定位、采样和辅助填图。地质工作“智能化”要在以下三个关键方面提前布局。一是加大高精度传感器攻关力度。传感器是智能系统的“感官”,要实现数据的自动化、实时化、精准化采集,必须依靠高精度传感器。二是深化各专业领域的知识库建设。知识库是智能系统的“大脑”,要依靠知识库对采集数据进行识别。三是不断推进软件系统开发。软件是智能系统“中枢神经”,数据的采集、传输、处理等系列工作都要基于软件平台实现,要围绕水质、岩石、构造等数据的智能采集开发一批软件系统。

### 3.4 打造高集成度的数据采集工作体系

迈入新发展阶段,地质工作高质量发展至少要做到数据采集更精准、更高效、更经济、更绿色。形成一批高集成度的地质数据采集装备体系和工作体系,大幅提高调查效率、降低成本和减少环境干扰。一是推进多门类采集技术装备集成。在车载、机载、

车载平台上不断尝试增加探测、观测、分析测试等技术装备,在不同装备相互影响可控的前提下持续提高集成度。二是提升无人装备的探测技术集成水平。不断提高无人机航磁测量性能和稳定性,加快发展无人机电磁法、放射性测量技术,逐步构建无人船、无人潜水器重磁测量技术体系。三是探索构建集群探测工作体系。尝试航空物探从单机探测到多机同时探测,海洋调查勘查工作从单船作业到多船联合作业,大幅提高数据采集质量和工作效率。

## 4 结 语

在分析国内外地球系统科学数据采集案例、总结数据采集工作发展趋势的基础上,指出数据采集呈现自动化、实时化、智能化、集群化、立体化的趋势。面对解决具体资源环境问题的需求,要以系统观为指导构建多元数据体系;面对掌握全域地质、自然资源、生态等基础数据的需求,持续健全“立体式”数据采集网络;面对人工智能的迅猛发展势头,积极研发更多智能采集技术;面对地质工作高质量发展的内在需求,打造高集成度的数据采集工作体系。

**致谢:**感谢匿名审稿专家对本文提出的宝贵修改意见,对提升本论文的写作起到了重要的指导作用。

## 参考文献(References):

- [ 1 ] USGS, U. S. Geological Survey 21st-Century Science Strategy 2020–2030[EB/OL]. <https://doi.org/10.3133/cir1476>.
- [ 2 ] 蔡博峰, LEAMON G, 刘兰翠. 二氧化碳地质封存和环境监测[M]. 北京: 化学工业出版社, 2013.
- [ 3 ] 安培浚, 张志强, 王立伟. 地球关键带的研究进展[J]. 地球科学进展, 2016, 31(12): 1228-1234.  
AN Peijun, ZHANG Zhiqiang, WANG Liwei. Review of earth critical zone research[J]. *Advances in Earth Science*, 2016, 31(12): 1228-1234.
- [ 4 ] 李小雁, 马育军. 地球关键带科学与水文土壤学研究进展[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(6): 731-737.  
LI Xiaoyan, MA Yujun. *Advances in earth's critical zone science and hydrogeology*[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(6): 731-737.
- [ 5 ] 魏玉涛. 美国地球关键带观测站建设及对我国的启示[J]. 中国资源综合利用, 2021, 39(6): 59-61.  
WEI Yutao. Construction of the earth critical zones observation sites in the United States and the learned lessons[J]. *China Resources Comprehensive Utilization*, 2021, 39(6): 59-61.
- [ 6 ] 杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 等. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J/OL]. 土壤学报: 1-14[2023-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html>.  
YANG Shunhua, SONG Xiaodong, WU Huayong, et al. A review and discussion on the earth's critical zone research: status quo and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*: 1-14[2023-09-18]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html>.

- [net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html](http://net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html).
- [ 7 ] 马腾, 沈帅, 邓娅敏, 等. 流域地球关键带调查理论方法: 以长江中游江汉平原为例[J]. 地球科学, 2020, 45(12): 4498-4511.  
MA Teng, SHEN Shuai, DENG Yamin, et al. Theoretical approaches of survey on earth's critical zone in basin: an example from Jiangnan Plain, Central Yangtze River[J]. Earth Science, 2020, 45(12): 4498-4511.
- [ 8 ] 张兵. 当代遥感科技发展的现状与未来展望[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(7): 774-784.  
ZHANG Bing. Current status and future prospects of remote sensing[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(7): 774-784.
- [ 9 ] 秦奇, 刘晓煌, 孙兴丽, 等. 中美两国对地系统观测比较分析及对中国的启示[J]. 中国地质调查, 2021, 8(2): 8-13.  
QIN Qi, LIU Xiaohuang, SUN Xingli, et al. Comparative analysis of the earth observation system between China and the United States and its implications to China[J]. Geological Survey of China, 2021, 8(2): 8-13.
- [ 10 ] 刘圆, 韩进喜. 海洋卫星应用系统现状及发展[J]. 国际太空, 2019(3): 36-40.  
LIU Yuan, HAN Jinxi. Current status and development of ocean satellite application systems[J]. Space International, 2019(3): 36-40.
- [ 11 ] 朱静, 唐川. 遥感技术在我国滑坡研究中的应用综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(3): 458-464.  
ZHU Jing, TANG Chuan. An overview of remote sensing applications for landslide research in China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(3): 458-464.
- [ 12 ] 沈新蕊, 王延辉, 杨绍琼, 等. 水下滑翔机技术发展现状与展望[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(2): 89-106.  
SHEN Xinrui, WANG Yanhui, YANG Shaoqiong, et al. Development of underwater gliders: an overview and prospect[J]. Journal of Unmanned Undersea Systems, 2018, 26(2): 89-106.
- [ 13 ] 张鑫业. 无人船搭载的水质监测系统的设计[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- [ 14 ] 叶梦旎, 张绪教, 叶培盛, 等. Spot-6与无人机航测技术在第四纪地质及活动构造填图中的应用: 以内蒙古1:50 000呼勒斯太苏木等四幅填图试点为例[J]. 地质力学学报, 2016, 22(2): 366-378.  
YE Mengni, ZHANG Xujiao, YE Peisheng, et al. Application of Spot-6 and the UAV aerial technology in quaternary geology and tectonic mapping: taking the 1:50 000 mapping pilot of the Hulesitai Area, Inner Mongolia as an example[J]. Journal of Geomechanics, 2016, 22(2): 366-378.
- [ 15 ] 彭艺伟, 董琦, 田冲, 等. 基于机载激光雷达的地质灾害识别关键技术及应用研究[J]. 安全与环境工程, 2021, 28(6): 100-108.  
PENG Yiwei, DONG Qi, TIAN Chong, et al. Research on key technologies and application of geological hazard identification based on airborne LiDAR[J]. Safety and Environmental Engineering, 2021, 28(6): 100-108.
- [ 16 ] 应急管理部中国地震局. 关于印发“十四五”国家防震减灾规划的通知[EB/OL]. [https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgnr/202205/t20220525\\_414288.shtml](https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgnr/202205/t20220525_414288.shtml).
- [ 17 ] 刘海南, 李永红, 杨渊, 等. 2001—2017年陕西省地质灾害成功预报时空分布规律[J]. 灾害学, 2019, 34(1): 117-121.  
LIU Hainan, LI Yonghong, YANG Yuan, et al. The spatial and temporal distribution of geological disaster successful forecast in Shaanxi Province from 2001 to 2017[J]. Journal of Catastrophology, 2019, 34(1): 117-121.
- [ 18 ] 许强, 董秀军, 李为乐. 基于天-空-地一体化的重大地质灾害隐患早期识别与监测预警[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44(7): 957-966.  
XU Qiang, DONG Xiujun, LI Weile. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2019, 44(7): 957-966.
- [ 19 ] 张同伟, 秦升杰, 王向鑫, 等. 深海浅地层剖面探测系统现状及展望[J]. 工程地球物理学报, 2018, 15(5): 547-554.  
ZHANG Tongwei, QIN Xiangxin, et al. Technical status and development trend of sub-bottom profiler[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2018, 15(5): 547-554.
- [ 20 ] 张金昌, 刘凡柏, 黄洪波, 等. 5 000米智能地质钻探技术与装备研发[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(4): 1-8.  
ZHANG Jinchang, LIU Fanbai, HUANG Hongbo, et al. Research and development of 5000 m intelligent geological drilling technology and equipment[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(4): 1-8.
- [ 21 ] 杨慧良, 陆凯, 褚宏宪. 海洋地质地球物理调查技术方法发展趋势探讨[J]. 海洋地质前沿, 2019, 35(9): 1-5.  
YANG Huiliang, LU Kai, CHU Hongxian. Future development trend of marine geological and geophysical survey techniques and methods[J]. Marine Geology Frontiers, 2019, 35(9): 1-5.
- [ 22 ] 吴立新, 陈朝晖, 林霄沛, 等. “透明海洋”立体观测网构建[J]. 科学通报, 2020, 65(25): 2654-2661.  
WU Lixin, CHEN Zhaohui, LIN Xiaopei, et al. Building the integrated observational network of “Transparent Ocean”[J]. Chinese Science Bulletin, 2020, 65(25): 2654-2661.
- [ 23 ] SAGE. Magnetotelluric Arrays[EB/OL]. [https://www.iris.edu/hq/programs/magnetotelluric\\_arrays](https://www.iris.edu/hq/programs/magnetotelluric_arrays).