

· 非主题来稿 ·

# 21 世纪前 20 年世界地质工作重大事件、重大成果与未来 30 年中国地质工作发展的思考

施俊法

SHI Junfa

中国地质调查局发展研究中心,北京 100037

*Development and Research Center of China Geological Survey, Beijing 100037, China*

**摘要:**在 21 世纪前 20 年里,以页岩气、页岩油、天然气水合物和干热岩为代表的非常规能源勘查开发取得重大突破,美国因页岩气勘查开发取得突破实现了能源独立。随着全球经济发展、气候变化加剧和能源转型,对关键金属矿产的需求不断增加,世界各国强势推出关键矿产清单,力求保障本国资源安全。深海探测、地球深部探测取得新进展。地球系统科学成为当代地质科学主题,形成了一批新概念,例如地质多样性、关键带、人类世、临界要素等,引领地质工作的转型。展望未来 30 年,世界百年未有之大变局加速演进,人类将面临资源、环境、生态的重大挑战,地质工作正处于重大转折时期。中国地质工作要突出清洁能源和深海资源勘探开发,要建立基于生态系统的地质调查、监测、模拟与预测技术体系,开展自然资源综合调查,支撑服务国土空间规划、生态保护和修复及城市建设,促进地质工作转型和发展。

**关键词:**清洁能源;自然资源综合调查;地球系统科学;地质工作转型

**中图分类号:**P5      **文献标志码:**A      **文章编号:**1671-2552(2020)12-2044-14

**Shi J F. The major accomplishments and geological events during the past two decades in the world and their implications for geological work in China in the next thirty years. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 2044-2057**

**Abstract:** In the first 20 years of this century, major breakthroughs have been made in the exploration and development of unconventional energy represented by shale gas, tight oil, natural gas hydrate and hot dry rock. The United States has achieved energy independence by virtue of the breakthroughs it has made in shale gas development. With growing global economy and intensifying global changes and energy transformation, the demand for critical minerals is increasing in the world, and the list of critical minerals has been strongly introduced to ensure the security of domestic mineral resources. Great progress has been made in the deep-sea and deep-earth probing. With earth system science becoming the theme of modern geological science, a number of new concepts have been developed, such as the geodiversity, the critical zones, the Anthropocene and the tipping elements, leading to the geological work transformation. In the next 30 years, the world is witnessing a period of major change that's rarely seen in a century, and facing major challenges to resources, environment and ecology. At this major turning point for geological work, special focus needs to be added on clean energy as well as deep-sea resource exploration and development. The introduction of ecosystem-based technology system for monitoring, simulation and prediction is also essential for carrying out comprehensive survey of natural resources and supporting national spatial planning, ecological conservation and urban construction.

**Key words:** clean energy; comprehensive survey of natural resources; earth system science; transformation of geological survey

收稿日期:2020-09-11;修订日期:2020-11-14

资助项目:中国地质调查局项目《地质调查中长期发展动力与方向研究》(编号:DD20190462)

作者简介:施俊法(1964-),男,博士,研究员,从事地质工作与矿业发展战略研究。E-mail:sjunfa@mail.cgs.gov.cn

在人类进入 21 世纪第 3 个 10 年之际,世界各国地质调查机构都在总结过去 20 年来地质工作取得的成就,发布未来 10 年地质工作规划。2019 年美国<sup>[1]</sup>、加拿大<sup>[2]</sup>、英国<sup>[3]</sup>、法国<sup>[4]</sup> 国家地质调查局局长(或前局长)围绕地质工作未来发展方向开展了广泛的讨论,形成一系列共识,认为当代地质工作必须坚持需求导向和问题导向,以地球系统科学为指导,推动地质工作结构调整,提出解决资源、环境、生态和空间重大问题的地质方案。笔者通过总结 21 世纪前 20 年世界地质工作重大事件和重大成果,分析未来 30 年地质工作面临的挑战与机遇,思考中国地质工作未来的发展方向。

## 1 2000—2020 年:世界地质工作的重大事件和重大成果

### 1.1 以页岩气和页岩油为代表的非常规能源勘查开发促使美国能源独立

页岩气和页岩油是重要的非常规能源种类。页岩气是以游离或吸附型甲烷为主的非常规天然气。页岩油是以吸附或游离状态赋存于生油岩中,或赋存于与生油岩互层和紧邻的致密砂岩、致密碳酸盐岩等储集岩中,未经过大规模长距离运移的非常规石油。经过几十年的努力,美国取得了水平井和水力压裂技术的突破,实现了页岩气和页岩油的产业化开采,促进了非常规能源的开发利用。据美国能源信息署(EIA)的资料统计,美国页岩气产量从 2009 年的  $825 \times 10^8 \text{ m}^3$  增加到 2019 年的  $6321 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,并超越俄罗斯成为世界第一天然气生产国,对美国的能源独立和再工业化战略、世界能源市场、气候谈判乃至地缘政治都产生了重要影响,改变了全球的能源版图,被誉为“一百年来石油工业最重大的事件”。同时,美国从 2009 年页岩油产量不足  $1300 \times 10^4 \text{ t}$ ,到 2019 年产量接近  $4 \times 10^8 \text{ t}$ ,增长了 31 倍,页岩油占美国原油总产量比例也从 2009 年的 5.1% 提高到 2019 年的 65.1%<sup>[5]</sup>。美国页岩气和页岩油储量可观,成为世界上许多国家追逐的目标。

### 1.2 中国海域天然气水合物勘查试采取得重大突破

天然气水合物,俗称“可燃冰”,其全球资源储量非常丰富,被誉为“21 世纪的绿色能源”。据初步估算,全球水合物蕴藏的天然气资源总量约为  $2.1 \times 10^{16} \text{ m}^3$ ,相当于全球已探明传统化石燃料总碳量的

2 倍,是 21 世纪最具潜力的接替煤炭、石油和天然气的新型洁净能源之一,也是目前尚未开发的储量巨大的一种新能源。2009 年美国在墨西哥湾识别出海湾砂岩储层中的天然气水合物,并于 2017 年成功进行了钻井和取心,获得了高质量含天然气水合物岩心样品。2011 年和 2012 年,美国与日本合作在阿拉斯加北坡开展天然气水合物试采。日本先后在 2013 年、2017 年进行了 2 次海域天然气水合物试采,但都因砂子堵塞而未达到预期目标。2017 年 5 月和 2020 年 3 月,中国地质调查局组织实施了中国海域天然气水合物两轮试采。第二轮试采历时 1 个月,产气总量为  $86.14 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,日均产气量为  $2.87 \times 10^4 \text{ m}^3$ ,是首次试采日产气量的 5.57 倍<sup>[6]</sup>。试采过程中攻克了深海浅软地层水平井钻采的核心关键技术,实现了产气规模大幅提升,为商业性开采奠定了坚实的技术基础。

### 1.3 深海油气勘查取得一批新发现

过去 20 年,深海油气勘探不断有新发现。2000 年以来,全球年度新增储量中,海域占比平均为 61%,且有逐年增大的趋势。截至 2018 年,全球油气勘探探明储量大于  $0.14 \times 10^8 \text{ t}$ (1 亿桶)的大油气田共 17 处,其中海域占 16 处<sup>[7]</sup>。据统计,2010—2014 年,全球深水油气新增地质储量约  $130 \times 10^8 \text{ t}$ (950 亿桶),占油气资源量的 60%。其中,石油主要来自巴西、墨西哥和西非地区,天然气主要来源于东非地区<sup>[6]</sup>。巴西桑托斯盆地盐下相继发现了一批大型油气田,已成为当今世界深海勘探的热点地区。例如,2013 年在水深 1000 m 以下发现 Libra 巨型油田,预计可采储量  $16.4 \times 10^8 \text{ t}$ 。2010—2015 年,莫桑比克发现水深 1500 m 巨型天然气田群,气田数达 28 个,天然气储量超过  $4.25 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。深海油气成为未来一段时间油气勘探的热点,也是改变世界油气供应格局的一个重要方向。

### 1.4 世界各国强势推出关键矿产清单

2008 年全球性金融危机之后,世界各国经济发展的重心转向战略性新兴产业,例如,节能环保、新一代信息技术、高端装备制造、新能源、新材料、新能源汽车等。围绕战略性新兴产业发展的资源保障问题引起了广泛关注,促使相关国家列出关键矿产清单(表 1),制定相关政策,确保本国资源供应安全<sup>[8-9]</sup>。例如,美国国家研究理事会(2008)发布《矿产、关键矿产和美国经济》报告,欧盟委员会(2010)



多样性也是保护自然的演员。

2006 年,《英国地质多样性的社会和经济价值》报告颁布,该报告评估了地质多样性能够给经济、社会和文化带来的福祉。2007 年,英国地质调查局实施了《诺森伯兰国家公园:地质多样性调查和行动计划》。欧洲各国地质调查机构在地质多样性特性研究、地质遗迹保护和评价方面走在了世界前列,值得中国借鉴。地质多样性概念的提出,揭示了生命与非生命系统之间的关系,其与生物多样性共同作用,支撑服务地球系统,为自然资源和生态系统综合调查提供了理论基石。

需要特别指出的是,20 世纪末,俄罗斯地质学家提出了生态地质系统的概念,将岩石圈和土壤圈加入生态系统,并作为一个整体进行研究,缝合了地质系统与生态系统之间的裂痕。近年来,俄罗斯生态地质学家 Trofimov<sup>[13-15]</sup> 认为,地下地质条件从资源、地球动力学、地球物理场和地球化学场 4 个方面影响和维系着生态系统,为构建一个新的学科——生态地质学奠定了基础。因此,地质多样性是生态地质研究的理论基础,是扩展地质调查工作内涵和服务领域的基石。

(2) 人类世:地球系统科学研究的关键时间尺度。鉴于人类活动已经成为十分活跃的地质营力,荷兰大气化学家保罗·克鲁岑和生态学家尤金·斯托莫于 2000 年共同提出“人类世”概念<sup>[16]</sup>,把它看作与更新世、全新世相随接替的地质学新世期。人类世的概念一经提出就获得地球科学界的广泛认可。地球科学家们围绕人类世起点展开了讨论,主要存在 4 种认识<sup>[17]</sup>:①原全新世下限;②全新世早期,即把下限推到数千年前;③工业革命的开始时间,即 18 世纪下半叶;④20 世纪中叶,即 1945 年人类第一颗原子弹爆炸的时间。其中,后 2 种观点最流行。2016 年 1 月,包括中国科学家安芷生在内的英国、美国、法国等 13 国科学家联合发表文章称,人类世与全新世“在功能上和地层学上不同于全新世”,还明确核武器、化石燃料、新材料、地层改变、肥料、全球变暖、生物灭绝等为人类世开始的 7 个主要标志。2018 年 5 月 21 日,经过投票,确定人类世起点定在 20 世纪中期<sup>[18]</sup>。具体哪一年,专家们还存在分歧,更多人倾向于将 1945 年核武器的使用作为人类世的起点。人类世概念的提出,进一步明确了人类活动正以前所未有的规模和强度干扰关键

资源环境要素的地球循环。

(3) 地球关键带:地球系统科学研究的切入点。地球关键带概念最早见于美国国家研究理事会(NRC)2001 年《地球科学基础研究的机遇》战略报告中<sup>[19]</sup>,指岩石圈浅部的近地表环境与水圈、大气圈、生物圈交会并相互作用的带,它以植被冠层和地下深部含水层为上、下界面(受海拔高度和地形地貌的影响),也是地球物质的化学过程与生物活动交互的复合空间。地球关键带要求地质、地球化学、水文学、土壤学、生物学、地貌学等多学科的综合观(监)测研究,以了解全球、千年跨度人类对环境变化的适应性。美国国家科学基金会已布设 10 个观(监)测站(CZO)<sup>[20]</sup>,其观(监)测内容包括不同演化阶段的外力地质作用、风化壳与土壤形成、生物与微生物活动、含水层与地表水、能量和物质流程、景观演变与水和碳循环等,因地各有侧重。从美国地球关键带观测站空间分布看,地球关键带观测站的选址与区域的生态(碳汇)功能和经济功能密切相关,主要研究人类生活、生产和生态三者的关系问题。

人类与自然环境相互作用、相互影响。地球系统科学是从全球尺度和区域大尺度研究类似全球变化这样的重大问题。地球关键带概念的提出,为地球系统科学解决局部地区(重要水资源区、地质脆弱区、重要城市区)地质重大事件创造了条件。通过对地球关键带的地质填图、监测、建模、预测,揭示地球关键带形成与演化规律,进而提出生态环境的保护与修复方案。

(4) 临界要素:地球系统的非线性特征。临界要素(或译“翻转成员”)是指地球系统中可以发生根本变化的子系统或系统要素<sup>[21]</sup>,例如人类活动造成全球气候变暖和环境变化,北极海冰、格陵兰冰盖等即为临界要素。临界要素是描述地球系统特征的一个重要概念,表明地球系统具有强烈的非线性、复杂性和开放性的特征(图 2)。

2009 年,瑞典的 Rockström 等提出了行星边界框架概念<sup>[22]</sup>,聚焦九项关键要素,即气候变化、生物多样性损失、生物地球化学流动(氮磷循环)、平流层臭氧消耗、海洋酸化、淡水利用、土地利用变化、大气气溶胶载荷和化学污染。这些要素一旦突破界限,有可能引发地球系统状态发生不可逆的非线性变化,进而对人类社会产生不利影响。

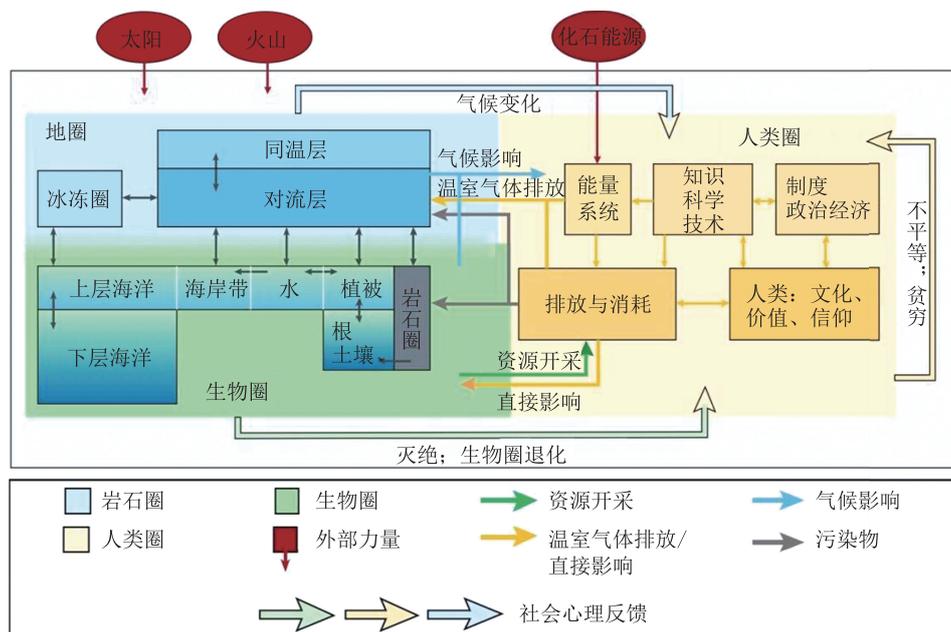
图2 地球系统概念模型<sup>[22]</sup>

Fig. 2 Earth system concept model

上述新概念主要针对地球表层系统,人类已成为全球尺度上改变地形地貌、地球化学和生命演化的地质营力之一,把人类作为一个独立的圈层(图2),加强地圈、生物圈和人类圈相互作用研究,揭示地球系统包括地球各圈层之间的相互作用。这标志着地球科学的研究对象、指导理论、研究方法都发生了重大变化,更加注重人-地关系研究,突出地球系统的特征和演变,调整人-地关系,促进人-地和谐。

#### 1.6 二氧化碳捕获和存储取得新成效

煤炭目前是中国主导性能源,贡献大,但较低效、污染、欠安全。加快勘查开发天然气水合物、干热岩和页岩气等清洁能源,逐步使之成为中国能源的绿色支柱是当务之急;中国煤制油获得重大突破,使这一黑色能源逐步“绿色化”。

碳捕获、封存与利用技术(CCUS)是把生产过程中的二氧化碳提纯之后进行有效利用,而不是简单地封存,与传统的碳捕获、封存(CCS)技术相比,可以将二氧化碳资源化,产生更高的经济效益,实现能源的可持续利用<sup>[23]</sup>。

关于碳捕获和封存,地质学具有巨大优势,既可以为储库选址提供地质依据,又可利用二氧化碳提高石油、页岩气、煤层气的采收率,地质界已进行

了广泛探索,取得一些重要进展,例如鄂尔多斯全流程深部咸水层CO<sub>2</sub>地质储存示范工程<sup>[24]</sup>。

#### 1.7 地球深部探测取得重大进展

(1)地幔柱研究有新发现。地幔柱自提出以来一直是地质学研究的热门话题。美国加州大学伯克利分校地球物理学家通过超级计算机对过去20年全球发生的273次强震的地震波全波数据分析和对地幔柱进行成像,绘制出高精度的地球内部模拟图,研究了深部地幔柱的特征。这些地幔柱宽度最大可达800 km,比之前研究认为的大很多,对已有的地核冷却模型提出了挑战。《Nature》杂志对这一研究成果进行了评论,认为其是2015年全球十大科学突破之一<sup>[25]</sup>。据称,地幔柱诱发的板块运动很可能在前寒武纪(约30亿年前)大范围盛行,进而推断地幔柱诱发了地球最早期的板块运动。

(2)地球深部钻探达新深度。2001—2005年,中国大陆科学钻探(CCSDB)首钻选在世界上最大的大别-苏鲁高压-超高压变质带东部的连云港市东海县,获取5158 m珍贵岩心和气、流体样品,同时首次在国内完成长井段岩心深度和方位测井归位,完成结晶岩区的三维地震探测,揭示了精细的地壳结构<sup>[26]</sup>。2019年黑龙江安达市松科二井的井深达7018 m<sup>[27]</sup>,成为亚洲国家实施的最深大陆科学钻井

和国际大陆科学钻探计划(ICDP)成立 22 年来实施的最深钻井。美国地球透镜计划(EarthScope)取得新进展。该计划由美国国家科学基金会、美国地质调查局和美国国家航空与航天局实施,投资约为 200 亿美元,为期 15 年(2003—2018),包括圣安德烈斯断层深部观测站、板块边界观测台、美国地震观测台阵和合成孔径干涉雷达四大部分,主要目的是探索北美大陆的构造与演化,并揭示地震及火山喷发的机理。美国地质调查局研究人员表示,在圣安德烈斯断层深部观测站,钻井穿透了圣安德烈斯断层蠕变部分,并在断层两侧发生强烈变形的地带获取岩心,这也是人类首次钻至活动板块边界断层内孕震区深度<sup>[28]</sup>。

(3) 深海探测获新成果。新世纪以来,综合大洋钻探计划(IODP)取得一系列成就,在钻探发震带开展钻孔的原位观测等,揭示了古新世/始新世大暖期,恢复了新生代赤道地区全球气候的演变,重建了高分辨率的海平面变化纪录,发现了深部生物圈和洋底的新生物和天然气水合物<sup>[29]</sup>。

#### 1.8 信息技术推动建立地质工作新范式

随着区块链、大数据、人工智能、云计算、5G、工业互联网、物联网技术(被概括为“5iABCD”)的应用<sup>[30]</sup>,地质工作正在经历着一轮全方位的革新,包括工作模式的革新,工作内容的全面拓展,产品成果、技术方法的创新等,从业务驱动转向数据驱动。

一个重要实例是“3S”技术(全球定位系统、地理信息系统、遥感)的应用。世纪之交,随着 GIS 技术和野外地质调查数字采集系统的广泛应用,改变了地质工作的工作模式,实现地质填图、制图一体化,地质图可以按需取层、实时更新,大大提高了地质填图的效率和效能。

另一个实例是地质云研发与应用。地质云是中国地质调查局研发的一套国家地质大数据共享服务平台,集成地质调查、业务管理、数据共享和信息服务功能,集计算资源、数据资源、应用服务为一体的综合性信息平台。地质云建设遵从统一规划、统一标准、统一平台、统一窗口,在不改变数据、用户、基础设施资源所有权或管理权的前提下,通过分布式数据库技术集成了全局直属单位地质数据、地质信息产品、应用系统和专业软件,构建了地质大数据的大平台。

此外,由中国科学家领衔发起、正在实施的深

时数字地球大科学计划(Deep-time Digital Earth,简称 DDE)<sup>[31]</sup>将在大数据驱动下重建地球生命、地理、物质和气候的演化,进而达到精确重建地球和生命演化历史、识别全球矿产资源与能源的宏观分布规律。DDE 将开展大科学研究,构建最大地质基础数据库,建成“地学界 Google”,从而实现整合地球演化全球数据、共享全球地学知识。DDE 在建设理念、组织方式等方面较先进,可以凭借知识体系的构建、大平台的建立和大数据的累积,吸纳大量科技资源,以科学家的自组织形式生产数据,必将对地质科学研究产生重大影响。

#### 1.9 世界重要国家地质工作面临新一轮结构调整

近年来,世界范围内地质工作需求结构发生重大变化,世界主要国家地质调查机构纷纷发布新的地质调查计划,地质工作正面临新一轮战略性结构调整。

(1) 美国地质调查局从“七大科学体系”到“整合科学”。经历 1994 年裁撤危机事件后,经过 18 年的努力,美国地质调查局以问题和需求为导向,以地球系统科学理念为指导,立足其宽泛而扎实的地质学、地理学、生物学、水文学等学科基础,不断优化夯实科学使命,深入推进地质工作战略性结构调整<sup>[32]</sup>,于 2012 年形成了气候变化、生态系统、能源和矿产、环境健康、自然灾害、水及核心科学体系的七大战略方向,基本完成了业务结构战略转型。美国地质调查局提出的“核心科学体系”科学战略(2013—2023),以地球关键带为对象,以传统地质学、地理学和生物学为基础,重构了地学数据的管理和存档的思路,进而实现数据高效便捷的融合合成,促进交叉学科或综合学科的发展,解决复杂的科学问题和社会问题<sup>[33]</sup>。在此基础上,2017 年提出以“地球监测、分析和预测”(EarthMAP)为核心的“整合科学”计划<sup>[34]</sup>,旨在通过提高科研质量,增强技术研发应用,加强综合研究,以应对当今和未来具有复杂性、综合性的重大资源环境问题。为实现整合科学的目标,美国地质调查局创建了 3 类支撑跨学科综合研究机构——数据集成共同体、创新中心和鲍威尔中心。其中,鲍威尔中心作为综合项目管理和整合科学的中心,通过跨部门、跨学科、跨区域进行数据整合研究,探索从国家和区域尺度上研究美国的生态系统服务,综合利用国家空间数据集和不同模拟系统,对生态环境及其经济价值随时间

变化的趋势进行研究和量化。

(2)英国地质调查局突出数字转型和整合科学研究。从2018—2019财年开始,英国地质调查局由英国自然环境研究委员会(NERC)和英国研究与创新组织(UKRI)共同管理。在新的起点,英国地质调查局积极主动对接联合国可持续发展17项目标,重新制定并发布“通往地球之门(2019—2023)”的新战略<sup>[35]</sup>,明确未来的科学行动将聚焦于应对去碳化与资源管理、适应环境变化、多重灾害与风险三大全球性挑战,构建数字化智能化基础设施,继续发展地热能观测站,并进一步开发海底工业设施、流域观测站和地质灾害全球信息基础设施。实施数字化转型战略,将其贯穿于三大挑战之中。

英国地质调查局同样把整合科学放在突出位置。聚焦于地球的“人类交互作用带”(等同于美国的地球关键带概念),采用从“调查、监测”到“三维定量模拟”,再到“预测、预报”的工作思路:一是全方位、多圈层、天地海陆一体化的观测和监测;二是开发环境影响模拟平台,整合观测资料的认知;三是管理数据、信息和知识,增强互动性和易用性;四是交流和开发知识,增强社会和经济影响力。英国地质调查局于2014年与政府和大学共建联合创新

基地——“莱伊尔中心”,拟将其打造成地球科学和海洋科学的领先研究中心。

(3)加拿大地质调查局从传统地质转向地球系统科学和预测地球科学。加拿大地质调查局认为,其主要职责包括生产数据和信息,研究以形成知识、预测和预警风险。2019年,加拿大地质调查局局长 Lebel 全面回顾了加拿大地质调查发展历史,指出加拿大地质工作经历是从“地球科学调查和综合三维模型”到“支撑模型和整合的地球科学”,再到“预测地球科学和系统”3个阶段(图3)<sup>[2]</sup>。需要指出的是,这3个阶段起步于不同时代,但现在是3个齐头并进的方向,共同构成加拿大地质工作的3个方向。

综上所述,通过对过去20年地质工作重大事件和重大成果分析,可以得出六点启示。一是战略性矿产资源是世界各国竞争的焦点,尤其是清洁能源和关键金属矿产,仍然是地质工作的重点。二是海洋地质工作是新方向,既是解决战略性矿产资源的有效途径,又是破解地球系统科学的重要路径。三是地球系统科学成为当代地质科学主题,地质多样性、地球关键带、人类世、临界要素成为地质工作前沿领域。四是地球关键带是人类社会经济活动的

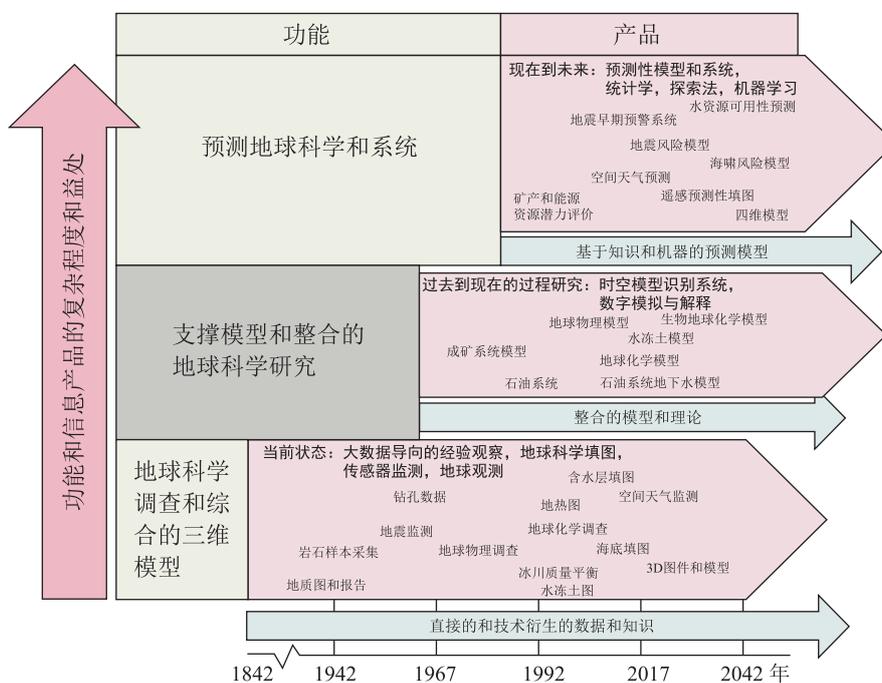


图3 加拿大地质调查局数据、知识和工具随时间的变化<sup>[2]</sup>

Fig. 3 The variation of Canadian Geological Survey's data, knowledge and tools with time

基础,是经济社会发展的根本依托。五是地球深部探测既是解决地球深部过程的钥匙,也是研究深海资源、深部地球过程与演化的重要手段。六是地质科技创新是地质工作转型的主要动力,信息技术尤其是 GIS、物联网、人工智能技术将对地质工作转型产生重大影响。需求结构决定地质工作业务结构和预算结构,进而决定人才队伍结构,世界范围内地质工作需求结构发生重大变化,地质工作也随之面临战略性结构调整。

## 2 2020—2050 年:资源、环境、生态对地质工作的挑战与机遇

### 2.1 战略性矿产资源供应

中国当前还处于工业化发展阶段,再加上庞大的人口基数,战略性矿产资源消费量在全球占有较大的比例。2018 年,全球统计的 40 种矿产资源中,中国有 30 种矿产消费量居世界第一位,占全球比例超过 50% 的矿种有 12 种,超过 40% 的有 23 种<sup>[36]</sup>。这些矿产资源中不乏煤炭、铁、锰、铜、铝、铅、锌、磷等大宗矿产。2018 年,中国石油对外依存度达到 71%,同比增长 10%;天然气对外依存度达到 43%,同比增长 32%。中国成为世界最大矿产资源生产国、消费国和进口国,战略性矿产资源供需矛盾突出。近年来,国内众多专家对中国能源消费峰值出现时间进行了预测,一部分研究者认为峰值年份将出现在 2030—2035 年<sup>[36]</sup>,一部分专家则认为将出现在 2035—2045 年<sup>[37]</sup>。无论如何,未来 10~15 年仍然是中国战略性矿产资源供需矛盾凸显期,即使需求达到峰值,需求仍处在高位,战略性矿产资源供应安全问题突出。

随着全球能源体系去碳化,据预测,到 2050 年一次能源结构将在化石能源和非化石能源之间平均分配<sup>[37]</sup>。太阳能和风能的发展对各类金属需求不断增加,如太阳能电池需要砷、铝土矿、硼、镉、铜、镓、铟、铁矿石、钼、铅、硒、二氧化硅、碲、二氧化钛,而风力涡轮机需要铝土矿、钴、铜、铁矿石和钼。部分稀土可以降低涡轮机中磁体的重量和尺寸<sup>[38]</sup>。

目前,中国正在实施新基建,未来将在 5G、城际高速铁路、城际轨道交通、新能源汽车、大数据中心、人工智能、工业互联网等领域增加投资,必将促进包括稀土、锂在内的关键矿产的消费。2018 年,中国稀土、锂消费量分别为  $10.4 \times 10^4$  t 和  $3.5 \times 10^4$  t。

据预测,到 2035 稀土和锂的需求将达到  $38 \times 10^4$  t 和  $21.6 \times 10^4$  t<sup>[36]</sup>。战略性新兴产业所需的金属矿产供应问题也将日益突出。

### 2.2 水资源安全

由于全球水资源的区域、时空分布不均衡,人口、经济与水资源不匹配,以及人类社会长期过度和不合理的水资源开发利用行为,导致了全球淡水资源日益短缺、水环境污染严重、旱涝灾害增多、水生态恶化等一系列突出问题。联合国发布的《2019 年世界水资源开发报告》指出,自 20 世纪 80 年代开始,由于人口增长、社会经济发展、消费模式变化等因素,全球用水量每年增长 1%。随着工业和社会用水的增加,到 2050 年全球需水量预计还将保持同样的增速,相比目前用水量将增加 20%~30%。将有超过 20 亿人生活在水资源严重短缺的国家,约 40 亿人每年至少有一个月的时间将遭受严重缺水的困扰。随着需水量不断增长及气候变化影响愈加显著,国际上因水资源争夺引发战争的潜在风险正在不断增加。

据报道,中国水资源总量为  $2.8 \times 10^{12}$  m<sup>3</sup>,可利用量为  $8140 \times 10^8$  m<sup>3</sup>,仅占水资源总量的 29%。人均水资源量约 2100 m<sup>3</sup>,仅为世界人均水平的 1/4,且时空分布不均,南方水多,北方水少<sup>[39]</sup>。按国际标准,目前中国有 16 个省(区、市)重度缺水,有 6 个省(区)极度缺水。预计到 2030 年,中国人均水资源量将降至 1700 m<sup>3</sup> 的国际公认的警戒线,水资源短缺危机有逐步加大趋势。

### 2.3 环境和生态问题

世界上多数科学家认为,全球气候变暖 1/2 以上是由人类活动造成的。全球气候变化引起的气温升高、海平面上升、极端气候事件的概率上升均见端倪。减缓全球气候变暖,重点在能源生产部门的减排,以保护地球大气圈层,也保护人类生存环境。自 1992 年《联合国气候变化框架公约》和 1997 年《京都议定书》之后,即使历经了《马拉喀什协定》(2001)、《巴厘岛路线图》(2007)、《哥本哈根协议》(2009)、《巴黎协定》(2015),仍有部分发达国家未兑现在《京都议定书》中的承诺。2020 年 11 月 4 日,美国正式退出《巴黎协定》,全球性减排协议谈判面临重重困难。2019 年 12 月 11 日,欧盟委员会发布新的发展战略文件《欧洲绿色新政》,旨在将气候风险转化为可持续发展的竞争力,欧盟将在 2050

年成为首个“碳中和”的区域。

随着全球气候变暖,生态压力继续增加,世界自然基金会(WWF)发布的《地球生命力报告2018》显示,1970—2014年野生动物种群数量消亡了60%。最近数十年,地球物种消失的速度是数百年前的100~1000倍,人类活动直接构成了对生物多样性的最大威胁。《地球生命力报告·中国2015》指出,虽然中国的人均生态足迹低于全球平均率,但中国已经消耗着自身生物承载力2.2倍的资源,生态赤字正在给中国带来一系列环境问题,包括森林过度采伐、干旱、淡水不足、土壤侵蚀、生物多样性丧失、大气中二氧化碳增多等。中国快速的城镇化过程驱动人均生态足迹上升,地质灾害频发,生态系统修复压力越来越大。

海洋作为地球系统的一部分,对未来社会至关重要。海洋覆盖了地球表面的70%以上,随着陆地资源的缺乏,必须在海洋空间内找到解决方案,以满足不断增加的世界人口对食品、能源、基础设施和运输日益增长的需求。近80%的海洋空间深度超过3000m,而人类的石油生产等活动大多局限于浅层大陆架,随着人类活动的加剧,海洋生态系统面临滨海湿地减少、珊瑚礁等生态系统大面积退化、海洋生态灾害频发的问题。

#### 2.4 资源、环境和生态问题相互交织、相互转化的挑战

在人类生存和可持续发展中,水、能源和粮食成为3种最突出的资源,三者之间相互联系、相互影响,构成了水-能源-粮食纽带关系<sup>[40]</sup>(图4)。从世

界范围看,几乎所有的能源开发利用方式都离不开水,据国际能源署统计,全球15%的取水量被用于能源生产。在很大程度上,这取决于能源与水资源空间分布是否一致。例如,页岩油气开发中的水力压裂、增强型地热系统的水-热交换过程都离不开水,如果产有页岩气的地方缺水,那么页岩气就无法开采;水资源的运输、提取和利用都必须以能源作为动力;粮食种植必须建立在水资源和能源消耗的基础上。从实践来看,农业是主要的水用户,亚洲很多国家的农业用水量几乎占有所有用水量的90%,同时,部分粮食资源也可以转化为能源,例如以玉米等为原料的生物能源。这种纽带关系不仅强调水、能源和粮食之间相互依存的关系,而且说明各类自然资源处于一个统一的系统,它们之间相互影响、相互制约。

事实上,在中国,通过煤变油技术,实现低碳能源过程中,需要消耗大量水资源。水资源首先是资源问题,缺水影响人类生存。其次,一旦水资源受到污染,既影响水资源供应,又变成环境和生态问题。最后,如果水资源过多,成为水灾害,会引发滑坡、泥石流等地质灾害;水资源过少,又会引发干旱和荒漠化,进而影响整个生态系统功能。

因此,资源、环境、生态之间也存在复杂的纽带关系,这实质上是地球系统的体现。

#### 2.5 特大型城市发展

当前,中国城镇化水平已经突破60%,而发达国家普遍在80%~90%之间,在迈进发达国家门槛之前,中国有近20个百分点的城镇化率的提升空

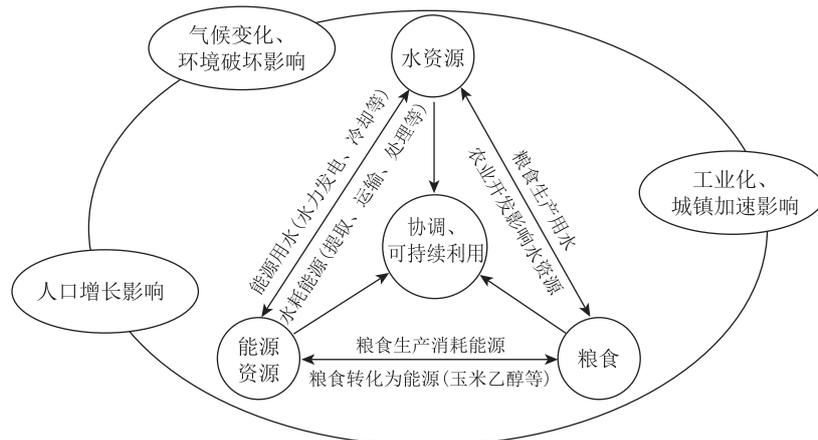


图4 水-能源-粮食纽带关系及其外部影响因素<sup>[40]</sup>

Fig. 4 The tie relationship of water-energy-food and its external influencing factors

间。未来 30 年, 城镇地区的人地矛盾将愈加凸显。随着人口增长和经济社会不断发展, 城市化程度不断提高, 越来越多的人将生活在城市里。城市的建设和发展, 需要消耗大量的能源、水资源和粮食。城市的资源安全供应也将更加突出。例如, 京津冀地区因水资源匮乏, 过度开采地下水, 容易引发地面沉降, 影响城市轨道交通和城市可持续发展。

一些特大型城市处于地震高风险带, 存在地震、滑坡、泥石流等危险。对于沿海城市, 需要应对海平面上升、降雨量增加、风暴和飓风更加频繁及洪水风险的挑战。

活动断裂对城市的重大工程建设和运行产生影响。城市基础设施建设和地下空间开发利用, 要求地质工作提供地下三维数字地质模型, 使地下空间实现“透明”。

## 2.6 科技进步对地质工作的影响

现代科技进步不断推动地质工作革新与变更。现代地球物理、地球化学、遥感地质、分析测试技术、信息技术的发展, 不仅扩展了地质工作的内容, 而且改变了地质工作方式, 推进了地质工作现代化。在第四次工业革命推动下, 互联网、大数据、云计算将深刻影响未来地质工作模式, 地质工作正在进入以大数据驱动的科学时代。数字革命正在将科学研究从问题驱动模式转变为数据驱动模式, 形成的一整套人工智能系统, 将推动研究者从“在已知问题中寻求答案(Know Know)”的科研范式拓展到“在迄今未知的问题中寻求未知的答案(Unknow Unknowns)”的全新范式<sup>[31]</sup>。可以预计, 未来 30 年全球地质工作将进入一个由新技术驱动的全新时代。未来地球系统科学的发展, 必须提升高性能计算, 改进建模能力, 增强数据管理和标准化功能, 最终建立一个集多门类自然资源数据集、地球系统内不同系统之间相互关系和作用的模型集、支撑资源-环境综合管理的决策系统集于一体的虚拟现实数字地球。

综上所述, 当今世界面临新挑战, 新冠肺炎疫情影响深远, 全球化与逆全球化相互交织, 低碳经济势不可挡, 科技创新竞争日趋激烈, 加速了全球政治、经济格局的调整与重构, 进而影响资源格局的调整与重塑。实现绿色、低碳发展, 要求能源转型、国土空间优化、产业结构升级, 这些都需要地质工作提供强有力的支撑。

## 3 2020—2050 年: 中国地质工作的展望

### 3.1 2020—2050 年: 未来 30 年中国地质工作的展望

过去 20 年, 中国国家综合实力不断增强, 已成为世界第二大经济体。2020—2050 年, 中国将喜迎建党、建国两个“百年”, 正面临世界百年未有之大变局, 到 2050 年, 中国将全面建成富强、民主、文明、和谐、绿色的社会主义现代化国家, 中华民族必将迎来伟大复兴。2020 年 9 月 22 日, 中国国家主席习近平在联合国大会上庄严承诺, “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 争取在 2060 年前实现碳中和。”实现低碳、绿色的高质量发展, 将是未来 30 年的主基调。

可以预计, 未来 30 年中国地质工作将经历前所未有的挑战和机遇。低碳、绿色理念深入人心, 人与自然和谐共处。能源供应以无碳或低碳能源为主, 碳排放持续下降; 可以利用的矿产将得到开发利用, 支持新材料的发展; 人类将从海洋获得更多矿产资源, 实现“蓝色增长”; 多金属矿产的回收量将超过开采量; 中国城市化率将接近或超过 80%, 城市将变得更智能、更环保、更安全, 城市地下空间实现透明; 地质-生态系统持续优化。地质工作将进入地球的每个角落, 涉及经济社会发展方方面面, 地质信息将成为每位公民外出必备的产品。地质工作将为更智能、更可持续发展的社会提供关键工具, 进而实现自身的转型。地质人将达到富裕体面、精神高尚、总揽星月、关爱地球的形象。

### 3.2 2020—2035 年: 中国地质工作设想

当前地质工作正处于调整的重大转折时期。在研究对象上, 从传统资源和环境, 扩展到资源、环境、生态、灾害、空间, 它们既可作为单独要素研究, 又可作为相互作用、相互影响的整体来研究; 在研究空间上, 陆域海域并举, 浅部深部并重, 国内与国际并行; 在服务对象上, 从服务传统矿产资源管理转向服务生态文明建设和自然资源管理。因此, 未来 30 年, 中国地质工作将以地球系统科学为指导, 树立大地学、大资源、大生态理念<sup>[32]</sup>, 加强地、矿、海、土、水、林、草综合调查, 实现地质工作结构重大战略调整, 突出自然资源科学与社会科学的融合, 支撑服务自然资源数量、质量、生态三位一体的管

理,不断提升地质工作创新力、引领力和影响力。

(1)加强能源地质勘查,保障国家能源资源安全,促进能源资源转型

在全球气候变暖和低碳经济的双重要求下,必须立足国内,加强对新型清洁能源的勘查开发。

加强页岩气和页岩油的勘查开发。重点加强长江下游页岩气资源调查,力争实现重大突破,形成长江经济带页岩气开发的新格局。以松辽盆地及周缘、鄂尔多斯盆地及外围为重点,加强陆相页岩油勘查开发,实现页岩油勘查开发产业化。

加强地热勘查开发力度。干热岩勘查开发实现产业化,必将带来世界能源革命。查清干热岩资源的空间分布和资源量,研究干热岩压裂形成的地质过程、压裂技术及起裂机制和诱发地震机制,形成有效裂缝网,防止产生破坏性地震,降低勘查开发成本。加强浅层地温能的资源勘查开发。

加强新区、新层系、新领域油气勘查开发。重点加强塔里木盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地、银额盆地、鄂尔多斯盆地、羌塘盆地及周缘等地区新区新层系的油气资源地质勘查。

加强铀矿资源勘查开发。加强西北、华北和东北地区新生代含煤层系的铀矿成矿作用与资源潜力评价。

加强二氧化碳捕获和存储的地质研究。

(2)强化深海地质探测,探索地球科学,维护国家海洋权益

21世纪是海洋的世纪。未来30年,海洋油气将成为全球油气新的增长点,海洋地质工作呈现出调查装备及技术更加立体综合、深海资源竞争日趋激烈、深海地球系统科学研究空前高涨的新局面。中国未来的海洋地质工作应聚焦于以下几个方面。

加强海域天然气水合物勘查开发。摸清中国管辖海域天然气水合物资源家底,增加地质储量,加强对天然气水合物水平井并联技术研究,提高单井产量和寿命,实现海域天然气水合物勘查开发产业化。

开展重点海域油气资源调查。开展南黄海、东海陆架西部和东南部、南海南部等重点区域油气资源调查,摸清资源家底,实现油气勘查开发的突破。

加强大洋多金属结核、深海稀土资源勘查开发。大洋矿产资源开发已成为各国战略博弈的新方向,多金属结核、多金属硫化物和富钴铁锰结壳、

深海稀土将成为未来重要关键矿产的重要来源。加强大洋矿产的精确评价和环保型采矿技术的发展,以及环境保护和矿区修复是破解深海资源利用的重要手段。

实施深海地质探测。以天然气水合物钻采船(大洋钻探船)为依托,牵头实施国际大科学计划,打穿“莫霍面”、探索生命起源、深入研究海洋与气候变化、掌握地球物质循环、探讨生命过程与地球的相互作用。

加强南极和北极地质科学考察。遵循“陆海统筹、资源调查与科考并重”的原则,建立极寒环境调查装备和技术体系,评价极地油气及天然气水合物资源潜力,研究极地环境变化地质响应。

(3)加强战略性矿产资源勘查开发国际合作,有力支撑服务“一带一路”建设

在百年未有之大变局下,中国要逐步形成以国内大循环为主体、国内国际双循环相互促进的新发展格局,要求我们重新审视全球矿产资源配置问题。在坚持立足国内的前提下,充分利用“两种资源、两个市场”,加强国际地质合作研究,促进国际矿业合作。

加强世界重要成矿区(带)地质对比研究。以特提斯-喜马拉雅成矿带、中亚-蒙古成矿带、环太平洋成矿带重要成矿区为重点,以区域成矿编图为抓手,通过国际地质对比计划,总结成矿规律,深化区域成矿作用认识,破解“大矿不过国界”的难题。

加强重要国家矿产资源潜力评价合作研究。以现代地质、地球物理、地球化学为依托,以中国-非洲地学合作中心、中国-东盟地学合作中心、中国-上海合作组织地学合作中心为平台,开展成矿预测与潜力评价研究。

加快构建全球矿业信息服务系统建设。以“一带一路”、“中非合作”和“中拉合作”为平台,以战略性矿产资源为重点,收集全球矿业信息,建立全球矿业信息服务系统,引导与推动中国企业到国外开展矿产资源风险勘查开发,加强国际产能合作,支撑服务“一带一路”倡议,实现互利共赢,构建“矿业命运共同体”。

(4)建立基于生态文明建设的地质调查新体系,推进地质工作融入自然资源管理

为深入贯彻落实党中央、国务院关于推进生态文明体制改革的重大决策部署,全力支撑自然资源

部履行“两统一”新职责,地质调查必须精准对接需求,实现转型升级,支撑服务生态文明建设和自然资源管理中心工作。

加强自然资源综合调查。按照补足短板、专项调查、综合评价的思路,以地球关键带为对象,开展全国地表基质调查、水资源调查、生态地质调查等专项调查,结合已有的存量数据,建立统一的本底数据库。水是生态文明建设的灵魂,是地球关键带中最为活跃的要素,加强水文地质与水资源调查,实现地表水和地下水统测,相互协同。加强水资源、水循环和水生态研究,特别是加强西部干旱区水资源研究。分析自然资源禀赋条件、结构特征、功能和空间分布规律以及开发利用状况,开展多门类自然资源综合评价,揭示各类自然资源之间的相互关系,研究自然资源开发利用状况和未来可能的变化趋势,为全国自然资源区划和产业结构的区域调整提供依据。

支撑服务国土空间规划。保护耕地的  $1.2 \times 10^8 \text{ hm}^2$  红线是土地利用规划的底线,也是保障中国粮食安全的重要基础。现代城市建设不能无限制扩张,不能超过其资源环境承载能力,不能加剧恶化人与自然之间的和谐共生关系。划定永久基本农田、生态保护红线、城镇开发边界,共同形成中国生活、生产、生态的总体空间格局,是自然资源管理的命根子,服务国土空间规划及支撑上述 3 条边界的划定是地质工作应有之义。未来 30 年,地质工作应当不断探索不同空间条件下资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法(简称“双评价”),支撑国家主体功能区和“三条控制线”调整,优化国土空间开发保护格局,为国土空间治理能力和治理体系现代化提出地质依据。

支撑服务国土空间生态保护修复。国家发展改革委、自然资源部于 2020 年联合印发了《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划(2021—2035 年)》,明确提出了青藏高原生态屏障区、黄河重点生态区(含黄土高原生态屏障)、长江重点生态区(含川滇生态屏障)、东北森林带、北方防沙带、南方丘陵山地带和海岸带等“三区四带”七大重要生态系统,支撑服务重要生态屏障和生态敏感脆弱区域的生态保护修复工作,成为未来中长期地质工作的重要方向。在实践中,应当准确把握“山水林田湖草生命共同体”的理念,开展全国多尺度的地上

地下一体化生态地质状况调查监测与评价。分析研究典型生态系统的自然演替规律,以及在人类活动扰动下地质系统与生态系统之间的相互作用与影响,研判生态系统未来的发展变化趋势,研究基于自然恢复的科学生态治理模式,开展长江、黄河等重要生态系统保护和修复示范研究,总结并推广生态修复典型案例。

加强城市地质调查,支撑城市规划和建设。城市是人口、资源、环境、空间、灾害高度互动的生态系统。要加强城市多要素地质调查,开展城市地质安全隐患清查,查明城市活动断裂、岩溶塌陷、土壤地下水污染等地质安全风险。开展特大型城市资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法研究,为城市规划和合理布局提供依据。健全完善特大型城市地质灾害的监测预警体系,为构建安全、舒适、韧性的未来城市提供地质解决方案。

#### (5) 推进地质科技创新,促进地质工作转型升级

科技创新是地质工作转型升级的引擎。科技创新要坚持需求导向和问题导向,即要解决实际的、具体的问题。在需求导向下,科技创新不是以理论水平论高低,而是以成败论英雄;科技创新不是从理论研究开始的,而是从系统信息采集开始;科技创新不是为了形成某种理论或概念,而是指导地质勘查工作进行的方向和步骤。当前,地质工作处于转型的关键时期,科技创新就是要推动地质工作适应新需求。

构建自然资源综合调查科技创新体系。围绕国土空间规划、国土空间用途管制、国土空间生态修复和保护,以生态系统为对象,建立地质调查与评价、探测和监测、模拟与预测的技术体系,对生态系统的现状作出评价,不断深化对生态系统演化、人-地耦合关系、深部过程及其影响的认识,对未来演化趋势作出预测,进而实现对生态系统调节与管控。从“山水林田湖草是生命共同体”理念出发,研究山-水链、林-草链、水-土链、能-矿链、陆-海-底-空链等主要特征及其相互关系,体现地球系统科学的观点。加快构建地质智能技术体系,实现大数据-智能地质-地质云“三位一体”,提升地质成果服务水平。

构建深地科学和探测技术体系。提高解决能源资源、深地环境和地球系统科学重大问题的能力,开展深地探测、深地科学、探测技术、深部资源、

深部环境等研究。研发深地探测的仪器与装备。深化对地球深部作用的认识,包括一系列科学问题,例如,①地球内部结构和磁场是如何产生的?②板块构造是在什么时候发生、为什么发生和怎么发生的?③地震究竟是怎么产生的?④什么机制驱动火山活动?⑤如何通过地球科学研究来降低地质灾害的风险和损失?

构建以“深钻、深潜、深网”为代表的深海探测技术体系。形成万米以上深海钻探能力和全海深综合探测能力,主导和引领国际深海大科学计划,推动地球系统重大发展与变革。

推进地球科学前沿领域研究。青藏高原及邻区(也称“高亚洲地区”)被誉为全球变化的天然实验室。要充分发挥中国地质区位优势,加强青藏高原大陆动力学演化研究。在加强青藏高原各圈层研究的基础上,组织多圈层以至跨圈层研究。构建青藏高原三维点面结合的综合观测系统,实现陆面、边界层、对流层的天基、空基、地基的一体化观测。以全球卫星导航定位系统为主,辅之以多种高新空间对地观测技术,推进青藏高原大陆动力学研究。加强中国东部岩石圈动力学演化研究,创建东亚式动力学模式。

**致谢:**在本文成文过程中,方克定、张彦英、吴传璧、郝梓国、张新安、吕庆田等专家提出宝贵的修改意见,与唐金荣、周平进行了深入讨论,杨宗喜、张涛、郑人瑞提供有关资料,在此一并表示感谢。

## 参考文献

- [1] Kimball S, Goldhaber M, Baron J, et al. The Modern Geological Survey; A Model for Research, Innovation, Synthesis A USGS Perspective [C]//Hill P R, Lebel D D, Hitzman M, et al. The Changing Role of Geological Surveys. Geological Society, London, Special Publications, 2019: 499. First published online. <https://doi.org/10.1144/SP499-2019-250>.
- [2] Lebel D. Geological Survey of Canada 8.0: mapping the journey towards predictive geoscience [C]//Hill P R, Lebel D D, Hitzman M, et al. The Changing Role of Geological Surveys. Geological Society, London, Special Publications, 2019: 499. First published online. <https://doi.org/10.1144/SP499-2019-79>.
- [3] Ludden J. Where is Geoscience Going? [C]//Hill P R, Lebel D D, Hitzman M, et al. The Changing Role of Geological Surveys. Geological Society, London, Special Publications, 2019: 499. First published online. <https://doi.org/10.1144/SP499-2019-212>.
- [4] French Geological Survey. Science strategy for BRGM: Key Research priorities for next 10 years [EB/OL] (2020-06-08) [2020-09-06] <https://en.calameo.com/read/005719121a52c95e6e34d>.2020.
- [5] 周庆凡.近十年美国致密油和页岩气产量变化[J].石油与天然气地质,2016,90(9): 2109-2122.
- [6] 叶建良,秦绪文,谢文卫,等.中国南海天然气水合物第二次试采主要进展[J].中国地质,2020,47(3): 557-568.
- [7] 张成功,屈红军,张凤廉,等.全球深水油气重大新发现及启示[J].石油学报,2019,40(1): 1-55.
- [8] 唐金荣,杨宗喜,周平,等.国外关键矿产战略研究进展及其启示[J].地质通报,2014,3(9): 1445-1453.
- [9] 毛景文,杨宗喜,谢桂青.关键矿产——国际动向与思考[J].矿床地质,2019,38(4): 689-698.
- [10] 陈泮泮,等译.地球系统科学[M].北京:地震出版社,1992.
- [11] Gray M. Geodiversity: Valuing and Conserving Abiotic Nature 2004[M]. John Wiley & Sons: London, UK, 2004.
- [12] Gray M. The confused position of the geosciences within the “natural capital” and “ecosystem services” approaches[J]. Ecosystem Services, 2018, 34A: 106-112.
- [13] Trofimov V T. Current State, Tasks and Problems of the Further Development of Ecological Geology[J]. Moscow University Geology Bulletin, 2013, 68(3): 155-164.
- [14] Trofimov V T. The Geological Space as a Category of Ecology: the Lithotope of an Ecosystem[J]. Moscow University Geology Bulletin, 2015, 70(5): 367-376.
- [15] Trofimov V T. Ecological - Geological Conditions and Factors of Their Formation[J]. Moscow University Geology Bulletin, 2010, 65(1): 54-57.
- [16] Crutzen P J, Stoermer E F. The “Anthropocene” [J]. IGBP News - Letter, 2000, 41: 17-18.
- [17] 刘学,张志强,郑军卫,等.关于人类世问题研究的讨论[J].地球科学进展,2014,29(5): 640-649.
- [18] 尼古拉·戴维森,姚人杰,编译.人类世:我们是否进入了地球历史的新纪元?[J].世界科学,2019,(9): 4-9.
- [19] National Research Council. Basic research opportunities in earth science [M]. Washington, D.C., National Academy Press, 2001: X.
- [20] NSF. NSF awards grants for four new critical zone observatories to study Earth surface processes [EB/OL] (2014-01-15) [2014-06-30] [http://www.nsf.gov/news/news\\_summ.jsp?cntn\\_id=130115&WT.mc\\_id=USNSF\\_51&WT.mc\\_ev=click](http://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntn_id=130115&WT.mc_id=USNSF_51&WT.mc_ev=click).2014.
- [21] Steffen W, Richardson K, Rockstrom J, et al. The emergence and evolution of Earth System Science [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2020, (1): 54-63.
- [22] Rockstrom J, Steffen W, Noone K, et al. A safe operating space for humanity [J]. Nature, 2009, 461(7263): 472-475.
- [23] 薛博,刘勇,王沉,等.碳捕获、封存与利用技术及煤层封存 CO<sub>2</sub> 研究进展[J].化学世界,2020,61(4): 294-297.
- [24] 文冬光,郭建强,张森琦,等.中国二氧化碳地质储存研究进展[J].中国地质,2014,41(5): 1716-1723.
- [25] Gerya T V, Stern R J, Baes M, et al. Whattam Plate tectonics on the Earth triggered by plume-induced subduction initiation [J]. Nature, 2015, 527: 221-225.

- [26] 许志琴, 杨文采, 杨经绥, 等. 中国大陆科学钻探的过去、现在和未来——纪念中国大陆科学钻探实施 15 周年、国际大陆科学钻探委员会成立 20 周年[J]. 地质学报, 2016, 90(9): 2109-2122.
- [27] 刘硕, 高有峰, 尹永康, 等. 松辽盆地大陆科学钻探“松科 2 井”登娄库组二段沉积序列精细刻画及时代归属[J]. 世界地质, 2019, 38(4): 1022-1043.
- [28] Feder T. Scoping out the North American continent, 10 years on[J]. *Physics Today*, 2014, 67(1): 1-19.
- [29] 汪品先. 大洋钻探与中国的海洋地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(1): 7-14.
- [30] 国家信息中心. 信息化领域前沿热点技术通俗读本[M]. 北京: 人民出版社, 2020.
- [31] Cheng Q M, Oberhnsli R, Zhao M L. A new international initiative for facilitating data-driven Earth science transformation[C]// Hill P R, Lebel D D, Hitzman M, et al. *The Changing Role of Geological Surveys*. Geological Society, London, Special Publications, 2019: 499. First published online. <https://doi.org/10.1144/SP499-2019-158>.
- [32] 施俊法, 唐金荣, 周平, 等. 世界地质调查工作发展趋势及其对中国的启示[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1465-1472.
- [33] 杨宗喜, 唐金荣, 周平, 等. 大数据时代下美国地质调查局的科学新观[J]. 地质通报, 2013, 32(9): 1337-1343.
- [34] U.S. Geological Survey. Grand challenges for integrated USGS science—A workshop report[EB/OL] (2017-06-30) [2019-09-10] <https://pubs.usgs.gov/of/2017/1076/ofr20171076.pdf>. 2017.
- [35] British Geological Survey. BGS Science Strategy: Gateway to the Earth 2019-2023[EB/OL] (2019-04) [2019-09-10] <http://www.bgs.ac.uk/about/strategy.html>. 2019.
- [36] 王安建, 高蕊蕊. 中国能源和重要矿产资源需求展望, 战略与决策[J]. 2020, 35(3): 338-344.
- [37] 沈镭, 刘立涛, 王礼茂. 2050 年中国能源消费的情景预测[J]. 自然资源学报, 2015, 30(3): 361-373.
- [38] Smeloro M. Geology for society in 2058: some down-to-earth perspectives[C]// Hill P R, Lebel D D, Hitzman M, et al. *The Changing Role of Geological Surveys*. Geological Society, London, Special Publications, 2019: 499. First published online. <https://doi.org/10.1144/SP499-2019-40>
- [39] 中国科学院地学部地球科学发展战略研究组. 21 世纪中国地球科学发展战略报告[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [40] 郑人瑞, 唐金荣, 金玺. 水-能源-粮食纽带关系: 地球科学的认知与解决方案[J]. 中国矿业, 2018, 27(10): 36-41.