

地球科学对人类文明的贡献

徐义刚

中国科学院广州地球化学研究所, 深地过程与战略矿产资源全国重点实验室, 广州 510640

E-mail: yigangxu@gig.ac.cn

地球是人类的摇篮与唯一的家园。地球系统即使是微小变化也会对人类社会和文明进程产生深远的影响。从这个意义上讲, 地球对人类而言是不可或缺的。作为生活在地球上的人类, 了解和理解自身的栖息星球也同样必不可少。地球是如何起源的? 还有多少可利用的资源 and 能源? 它是否健康? 如何预测和防范各种自然灾害? 加深对地球的认识, 关系到人类的生存和人类社会的可持续发展。

地球科学是研究地球的结构、形成和演化的基础学科, 其最终功能是认识地球、造福人类。它具有基础性和应用性双重属性, 既是自然科学体系(数学、物理、化学、天文、地学、生物学)中的一员, 研究包括大气圈、水圈、岩石圈、生物圈和日地空间过程在内的地球系统的运行规律, 诞生了诸如板块构造学说、米兰科维奇理论等划时代的地学理论; 还通过了解在地球系统中起作用的各种过程, 促进对地球资源和环境的有效管理, 并助力解决与社会经济有关和具有全球重要性的问题。正因为始终围绕人类的根本问题和基本需求展开研究, 地球科学在人类文明的发展中无处不在, 自18世纪80年代成为一门独立的学科以来^[1], 地球科学一直展示了强大的生命力。

地球科学的生命力还体现在对人类文明发展的支撑上。特别是在从原始文明、农耕文明、工业文明到生态文明的演替过程中, 地球科学发挥了极为重要的作用。通过资源开发与利用、自然灾害预测与减灾、环境保护与可持续发展、基础设施建设、科学研究与教育以及文化与历史研究等领域, 深刻影响了人类社会的进步。随着文明不同演化阶段人类需求的变化, 地球科学研究的内涵和方法体系也发生了巨大变化, 人与自然的关系变得更为复杂而敏感。遗憾的是, 迄今为止, 国内外尚无有关地球科学与人类文明关系的系统梳理。在新一轮科技革命来临的前夜和科研范式正在变革的当下, 梳理地球科学对人类文明的贡献, 剖析其背后的逻辑规律, 对提升地球科学的社会功能、使其在未来文明发展中发挥更大作用具有重要意义。

本文拟先阐述地球科学的双重属性, 并根据地球科学的



徐义刚 中国科学院广州地球化学研究所研究员, 中国科学院院士、美国地质学会会士、美国地球物理联合会会士、国际地球化学学会会士。主要从事地幔岩石学、深地科学和宜居地球研究。在华北克拉通破坏、峨眉山大火成岩省以及东亚大地幔楔等方面取得创新认识。

特点提出其对人类文明贡献的判别指标。在此基础上, 举例阐述地球科学对人类文明发展的历史贡献, 并展望未来社会发展中的地学担当。

1 地球科学的双重属性

1.1 基础性

现代地球科学包括地理学、地质学、地球化学、地球物理和空间物理学、大气科学、海洋科学、环境科学和月球与行星科学等分支学科(<https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab1103/>), 通常以物理、地理、地质、气象、数学、化学、生物学的角度研究地球。概括而言, 地球科学研究涉及地球的组成、结构、环境在时间/空间中的变化规律, 在时间、空间、层圈相互作用以及研究方法等方面有其独特的知识体系和公理/原理。

判断一个学科是否具有基础性主要依据该学科的研究目的、内容以及其对人类知识和社会发展的贡献。基础学科致力于探索自然和社会的最基本规律, 为人类生存与发展提供基本知识, 而不是直接应用于实际应用。像数学、物理、化学、天文、地学、生物、哲学、历史等都属于基础学科, 因为这些学科研究的是自然界和人类社会的基本运行规律, 是科技、文化和社会进步的基石。然而, 一段时间以来, 国内

引用格式: 徐义刚. 地球科学对人类文明的贡献. 科学通报

Xu Y-G. The contribution of Earth sciences to human civilization (in Chinese). Chin Sci Bull, doi: [10.1360/CSB-2025-0635](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0635)

关于地学是否属于基础学科存在一些争论,有时被有意或无意地排除在基础学科之外,这是不恰当的,因为地球科学是人类认识、利用和改造人类目前唯一生存环境—地球的科学.它与人类的生存和生存的环境最为密切,是研究大自然基本运行规律的最直接、最综合的学科.没有地学的自然科学体系就成为无本之体.

基础学科的研究成果往往对科学技术的发展、社会进步和文化繁荣产生深远影响.例如,诺贝尔奖主要颁发给在基础学科研究领域取得重大成就的科学家.但诺贝尔奖项里没有天文学、数学、地学,这与诺贝尔奖设置的时代局限性有关,瑞典皇家科学院为了弥补诺贝尔奖的缺陷,于1983年设立了克拉福德奖(The Crafoord Prize),旨在对诺贝尔奖遗漏的基础学科研究(包括天文学、数学、地球科学和生物科学)予以倡议和奖励.美国时代周刊于2018年评选出“改变世界的101位科学家”,其中9位是地球科学家;1983年以来,共有17位地球科学家获得了克拉福德奖(<https://www.crafoord-prize.se>).这些案例和数据充分说明地球科学对人类知识和社会发展的杰出贡献.地球科学承担着揭示自然界奥秘与规律的使命,地球科学缺席的人类认知体系是不完整的.而对自然科学的一些重大基本理论问题,如天体起源、生命起源和人类的起源等,都离不开地球科学的研究.

1.2 应用性

地球科学研究在获取对自然的认知同时,还为生活在地球上的人类如何适应、利用、保护自然提供了科学的方法论和行动指南.地球科学的应用性体现在资源和能源开发、生态环境保护、自然灾害的预警和预测上.这些应用不仅对人类社会的发展至关重要,也是地球科学研究的重要价值所在.

资源利用和能源开发:人类的生存离不开对地球上资源的利用,如水、土壤、矿产、煤炭、油气等.为满足生产力发展的需要,人类对资源需求日益剧增.地球科学通过研究资源的形成和富集规律,建立找矿找油的指标体系,使大规模资源和能源的发现和高效利用成为可能.

生态环境保护:人类在利用地球资源的同时,也对地球系统产生了不可逆转的影响,从而产生了人类如何与自然环境和谐共处的科学问题.地球科学通过对大气、水和土壤等环境因子以及生态系统的了解,帮助制定更好的生态环境政策和控制措施,为决策者提供更全面的管理咨询.

灾害预警和预测:动力地球决定了地球上存在各种自然灾害,如地震、火山、滑坡、海啸以及极端天气等.地球科学可以帮助预测和防御自然灾害,通过模型和模拟工具来模拟现实世界中的物理过程,更好地理解这些自然现象的发生机制,并预测未来可能发生的情况,为灾害预警和应急响应提供科学依据.

2 人类文明的三要素

人类文明是指人类在社会历史发展过程中创造、积累的物质财富和精神财富的总和.它经历了从原始文明、农耕文明、工业文明到生态文明的演替.人类文明发展的根本动力是生产力,是人类生存和发展的需要.人类文明的内涵丰富而复杂.不同专业背景的研究人员往往有不同的理解.例如,根据对古埃及文明和两河文明的研究,考古学家和社会学家多认为文字、冶金术、城市的出现是判断一个社会是否进入文明阶段的标准,然而世界上许多文明并不完全符合这“三要素”.例如,中美洲的玛雅文明虽然令人叹为观止但没有冶金术;辉煌的印加文明没有文字.显然,对文明的评价和判断不能简单地用几个要素来划一衡量.

文字、冶金术、城市的出现只是标志着文明的诞生,但不同文明的形成和发展是多样且复杂的,有其自身演变的历程.从原始文明到农耕文明到工业革命再到生态文明,文明的内涵也发生着深刻的变化,特定发展阶段的文明要素也可能不尽相同.作为一名自然科学研究者,笔者更着眼于文明演替过程中的一些共性特征.本文提出新的人类文明三要素,即认知、财富和规则(或治理)(图1).

认知:人生活在地球上,至今摆脱不了对地球的依赖.对生存环境、自然规律、人与自然以及人与人之间关系的认识就显得不可或缺.对自然的认知水平的高低有时决定了人



图1 人类文明的三要素及评判地球科学对人类文明贡献的依据

Figure 1 Three fundamental elements of human civilization and the main criteria for evaluating contributions of Earth sciences to civilization

类文明程度的高低,因为它会直接影响到其他两个文明要素的实现。

财富:追求美好的生活是人的天性和内在需求。通过劳动和技术革命创造和积累财富,可改善和提高人的生存质量。财富的创造和积累与人类对自然的认知水平有关,也与治理水平有关。在从原始文明向高等文明演化的过程中,创造和积累财富的效率是不断提升的。

规则:文明的本质是使人类脱离野蛮状态、进入到有序的社会。通过制定规则,约束和规范人的社会行为成为文明社会的重要标志。不过,规则的好坏是相对的。在全球化的今天,以地球-生命共同体为理念的全球治理体系成为新的文明标杆。

3 如何评判地球科学对人类文明发展的贡献?

对应于上述人类文明的新三要素,并根据地球科学的特点,本文提出认识自然、利用自然、和谐自然的能力,作为判断地球科学对人类文明发展贡献的标志(图1)。这三个方面可以具体概括为,地球科学研究:(1)是否颠覆了人类的认知?(2)是否提高了生产力而创造了财富,改善了人的生存质量、改变了人的生活方式?(3)是否形成了共识,改善了人地关系,促进了全球治理?

下面将从上述三个维度来阐述地球科学对人类文明的历史贡献。

4 地球科学对人类文明的历史贡献

国家自然科学基金委员会地球科学部七个学科体系化梳理组梳理出了许多地球科学对人类文明的历史贡献中的里程碑式的事件和人物(见本专题)。限于笔者的知识水平和篇幅,本文无法面面俱到,只能从中选一些具有代表性的案例加以阐述。为求学科间的平衡,适当考虑了地球系统中各组成圈层。需要指出的是,每个案例并非只针对一个学科,多数情况下是多个学科贡献的综合。

4.1 地球科学大幅提升了人类对自然的认知

地球科学的研究对象包括人类的生活空间乃至人类自身,因而地球科学是人类所能讲的最宏大的故事,从行星地球的起源到地球的演化变成宜居星球。地球科学的“长时间观”,改变了人类对自身在地球历史中的地位的看法,也改变了人类的“时间观”,催生了与人文科学的紧密联系和交叉融合,对当代的人文思考产生了潜移默化的影响,地球科学揭示了地球历史时期环境和生物演化,为人类文明起源和发展提供了重要线索。

4.1.1 没有地质学就没有进化论

“我们是谁?从哪里来?要到哪里去”是人类的根本问题。查尔斯·达尔文的《物种起源》对这个问题有深刻的剖析^[2],但是在这里我想强调的是查尔斯·莱伊尔的《地质学原理》

一书^[3],特别是莱伊尔的地质变迁及其渐变理论为达尔文构建生物进化的思想奠定了坚实的基础,从而彻底改变了人类对自身的认识。

莱伊尔生活的时代是宗教控制一切的时代,人类所有有关地球的知识都来自《圣经》的《旧约·创世纪》:认为创造这个世界的是神,地球年龄只有6000年,诺亚洪水造就了地层中所有的一切。莱伊尔通过他长期的观察则认为地质作用的过程是缓慢渐进的,所以地球的过去只能用通过现今的地质作用来认识,即“将今论古”,而无需求助于《圣经》或者“灾变论”。他认为地球年龄至少有3亿年。千万不要小看他当时提出的“3亿年”,因为达尔文提出的进化论需要大量的时间。单单就这个长时间尺度的认识,就可以说,《物种起源》牢牢地根植于《地质学原理》的知识体系当中。

1831年达尔文是带着莱伊尔的《地质学原理》的第一册开启为期5年的全球航海考察的。他在自传中写道,在这5年的考察当中,正是这本书给他以最大的启迪^[4]。1836年达尔文考察结束回到伦敦,与莱伊尔见了第一面就成为挚友,此后他们之间书信往来频繁,都是探讨地质学和生物进化原理的,对达尔文的学术思想影响深远。以致1875年莱伊尔去世的时候,达尔文说:“我在科学上所做的一切,几乎归功于对他伟大著作的研究”。因此,没有地质学就没有进化论。如果没有地质学,人类对文明的认知可能仍滞留在神创阶段。

地球科学家在追溯地球和生命起源的历程当中,始终没有停下脚步。地球化学家克莱·帕特森在20世纪50年代就用铅同位素的方法精确把地球的年龄确定为45.5亿年^[5]。对地球年的精确确定彻底将神创论扫进了历史的垃圾堆,为建立科学、客观的世界观奠定了科学基础。古生物学家在地层中发现最早的生命出现于38亿年前^[6],38亿年以后的各种化石的发现则为地球生命史书增添了新的篇章,为达尔文的进化论从更广的空间、更长的时间尺度提供了实证。

同样是地球科学家领导的团队,在东非阿法尔洼地发现了318万年前的直立人化石^[7],奠定了人类走出非洲的学说。现在地球科学家正与生命科学家合作,利用古DNA技术逐步揭示人类起源和演化的神秘面纱^[8]。值得一提的是,斯万特·帕博因其在古DNA和古人类方面的开创性工作获得了2022年诺贝尔生理学奖。

1979年,“阿尔文号”深潜至海底6000英尺,发现了海底黑烟囱。在这个暗无天日的海底世界里,竟然有大量生物存在,这个发现告诉我们“万物生长靠太阳”的说法可能不一定完全正确,地球的内能也可以支撑生命的存在^[9]。这为揭示深部地球生命的极限,掀开了新的篇章。

4.1.2 改变世界的地图和板块构造学说

地图是人类文明史上的伟大创想,它以科学的符号系统、精确的地图投影和系统的综合方法表达对复杂地理世

界的空间结构和关系。《改变世界的100幅地图》一书^[10]生动地阐述了地图在社会和经济发展中所起的作用。例如,1495年哥伦布就带着托勒密编制的世界地图(图2(a)),从西班牙出发,一路西行发现了美洲大陆,之后欧洲人持续向美洲迁移,掀起了人类历史上迁移史上的第三次高潮。

当地理学意义上的地图和生物地层学相结合就诞生了第一张地质图。威廉·史密斯在长期的野外测量和地质调查中发现地层结构的规律性,并且每一层都含有独特的化石,提出了根据沉积岩层中的生物化石来确定地层顺序的思想,即地层层序律。并在此基础上于1815年编绘了最早的英格兰和威尔士现代地质图^[11](图2(b)),不仅创立了生物地层学这门独立的学科,还清楚地指明了英格兰产煤地层的地点,为后来的第一次工业革命奠定了能源物质基础。

地图也引出了地球科学上的伟大发现。德国气象学家阿里弗雷德·魏格纳1910年发现大西洋两岸的大陆形态非常吻合,完全可以拼在一起,从而提出全球各大陆可以拼成一个

完整的大陆,证明古大陆沿大西洋发生过开裂和漂移,创立了大陆漂移学说^[12]。但由于魏格纳没有解释大陆漂移的驱动力,以致这个理论在1930年魏格纳在格陵兰考察遇难的时候,仍没有被大众所接受。27年之后的另一张地图,使这个伟大的理论复活。

大洋占地球表面的70%,对人和自然均十分重要,但20世纪50年代之初人们对洋底的认识一片空白,多数人认为海底毫无特色。拉蒙特地质观测站的制图员玛丽·萨普和布鲁斯·希曾合作,用海底声呐测深系统数据,历时8年,绘制了全球第一张海底综合地图——大西洋海底综合地图(图2(c))。他们发现大西洋中心存在一个裂缝,长数千公里,宽数公里,深数百米。这些裂谷同时还是地震中心,表明裂谷正在发生运动,而大陆实际上可能正在漂移^[13]。更有意义的是,在大西洋发现的裂谷在其他大洋同样存在,且相互链接,人们惊讶地发现,在平静的海平面下面,竟然躺着全球最长的山脉——长达8万公里的洋中脊。萨普和希曾绘制的大西洋海底综合

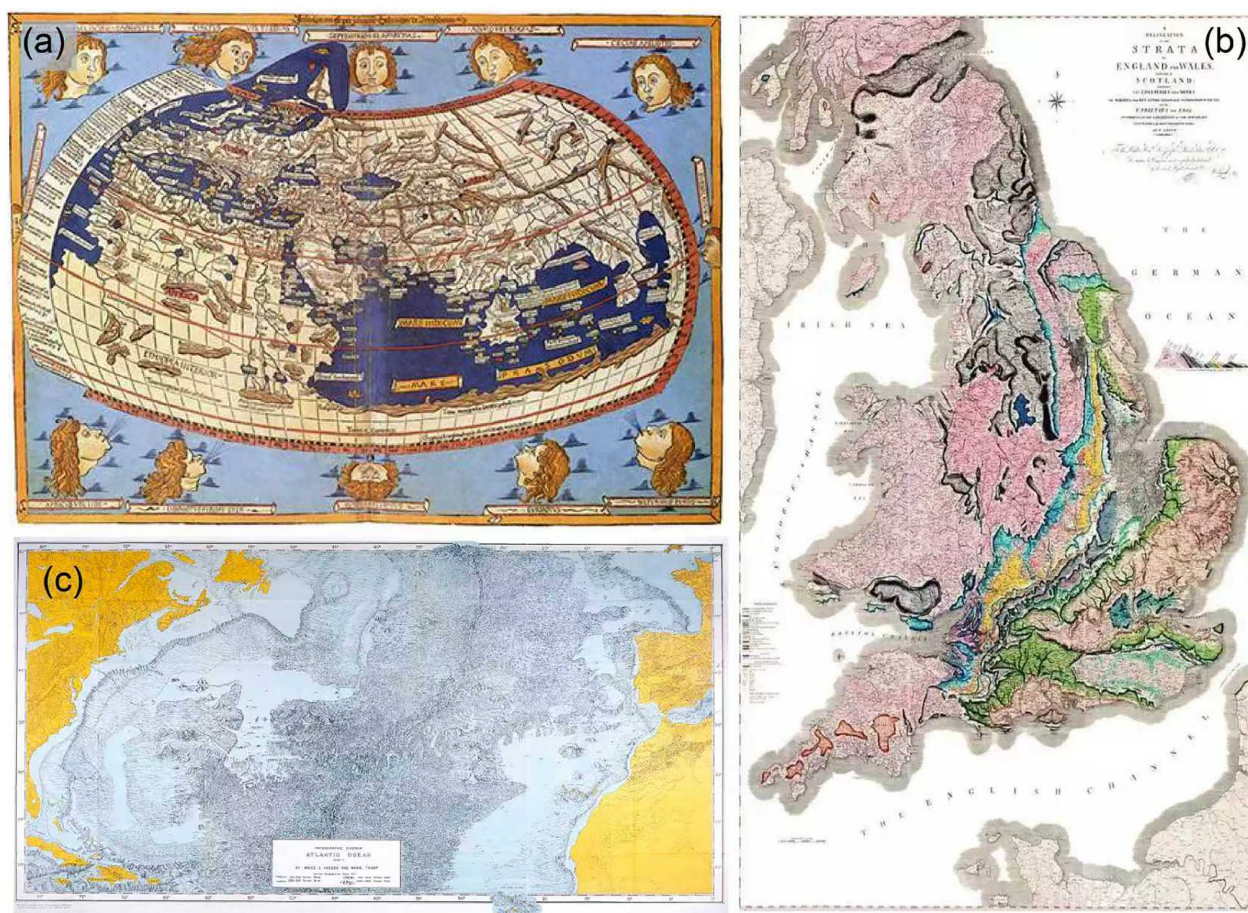


图2 改变世界的地图。(a) 托勒密编制的世界地图(1495年); (b) 威廉·史密斯编绘的英格兰和威尔士地质图(1815年); (c) 玛丽·塔普绘制的大海底综合地图(1957年)。图源自网络

Figure 2 The maps that have changed the world. (a) The world map made by Ptolemy (1495). (b) The geology map of England and Wales made by William Smith (1815). (c) The first sea-floor morphology map made by Marie Tharp (1957). Source: from internet

地质图,为当时备受争议的大陆漂移学说提供了几乎无可争议的证据,引发了地球科学的一场革命。

一幅图胜过千言万语,确实能改变对世界的理解。当普林斯顿的哈里·赫斯看到这张图时就说,“洋中脊的发现动摇了地质学的基础”。受此启发,他于1962年提出了海底扩张学说^[14],他假设地幔从洋中脊上涌,热岩浆在裂缝处从地球内部喷出,两边对称生长形成洋壳,并将两个相邻的板块推开,遇到海沟的时候产生俯冲作用。这个学说后来被海底磁条带和大洋钻探所证实^[15],由此诞生了板块构造理论^[16-19]。从此,地球不再因为海陆固定而暮气沉沉,而是因为“生”有“死”、周而复始而变得生机勃勃。

板块构造理论改变了世界,因为它颠覆了固定论的地质思维模式,革命性地改变了我们对基本地球过程的理解,特别是将地球作为一个整体,提供了一个统一的地球动力学框架、揭示了全球尺度的物质和能量循环方式、勾画了地球的运行机制。它预测了地球上大部分火山、地震发生的位置,预测了地球上各种矿产资源的分布和富集状态,也揭示了板块构造对地球宜居性和生命起源的重要性。正因为如此,板块构造理论与量子力学、分子生物学和相对论一同成为20世纪自然科学的四大成就。

如今,地图与卫星导航、信息技术和人工智能结合变成了智能地图。智能地图改变了人的生活,在某个地图开放平台,每天日均位置的服务要求达到了惊人的1300亿。中国在智能地图研发上走在了世界的前列。智能地图系统依然用到许多地球科学知识,比如说地球的参考系提供了空间基准的参考、地球的板块运动监控提供了监控运控点的坐标、地球重力模型参与了轨道确定的计算。

4.2 地球科学为提高生产力、改善人类生存质量提供了重要保障

4.2.1 没有地质学就没有工业革命

人类社会的生存与发展离不开对能源、资源的开发与利用,人类文明进步更与能源结构的重大更替紧密关联。如果说煤炭点燃了第一次工业革命的烈火,那么石油就是第二次工业革命的血脉,铀、锕、硅、锂、稀土等是第三次工业革命的“维生素”,新型能源和能源金属则是第四次工业革命的基础物质。

图3是一张世界能源体系图,图中的曲线分别代表了木材、煤炭、石油、天然气以及未来的核能以及清洁能源在一次能源结构中占比随时间的演变图。图4中的小红点,标志着一种能源超越另外一种能源成为第一大能源消耗所发生的时间。由图3可知,这种能源更替与人类文明发展的演替时间是吻合的。例如,19世纪煤炭取代柴火等传统生物能源,推动了世界经济和社会的巨大变化;20世纪60年代石油取代煤炭的主导地位,带来了二战后的经济繁荣和社会发展;21世纪的页岩气革命,大规模天然气开发利用及可再生能源的不断推广,使人类社会进入一个多能并存、清洁利用、低碳经济的新阶段。由此可见,人类文明史就是一部能源利用史。

图3中的小红旗代表了经典的生物地层学^[11]和石油地质学原理(如说背斜说、圈闭说、页岩气成藏理论)提出的时间。这些小红旗总出现在小圆点之前的20~50年,这足以证明地质学研究为能源结构的更替提供了支撑,促进了人类文明的演替,还说明基础研究有时是无法预先规划的。例如,威廉·史密斯于1815年绘制的世界上第一张地质图(图2(b)),特别是他提出的生物地层学的概念为大规模煤炭资源的发现

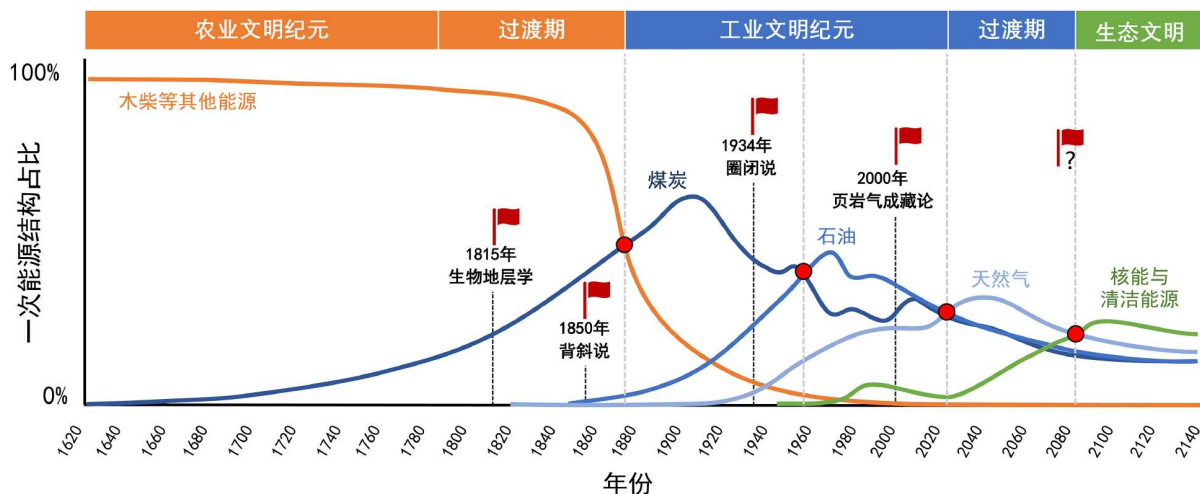


图3 经典石油地质学原理的提出、世界能源体系演化与人类文明演替之间的关系图(底图据文献[20])。图中的小红点标志着一种能源超越另外一种能源所发生的时间,小红旗代表了经典的地质学原理提出的时间

Fig. 3 Diagram showing the relationship between the proposal of classic theories of petroleum science, the evolution of world's energy's system, and change-over of the human civilizations (framework of world's energy's system is after Ref. [20]). The red dots mark the timing at which the consumption of one energy surpasses that of another energy. The small flags mark the timing of proposal of classic theories of petroleum science

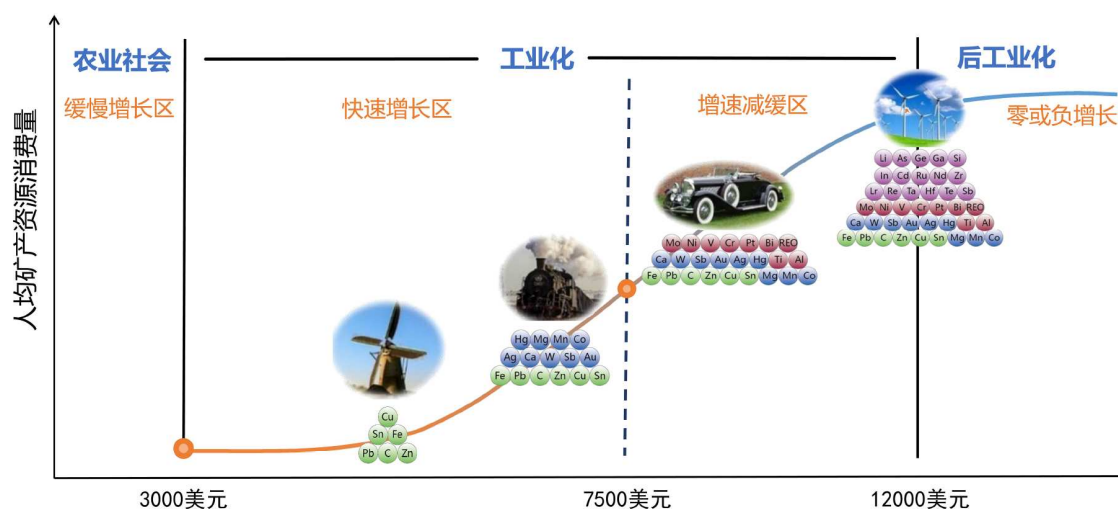


图4 人均矿产资源消费量与人均GDP之间的关系(据文献[21]修改)

Figure 4 Diagram showing the relationship between per capita consumption of mineral resources and per capita GDP (modified after Ref. [21])

奠定了理论支撑。而背斜说^[22]和圈闭说^[23]的提出,为全球超大油田的发现和石油工业的发展奠定了基础,迅速提升了石油和天然气在全球能源消费中的比重,推动能源格局的变革。随着传统油气资源的枯竭,非常规油气资源(如页岩气、页岩油等)的开发成为新动力^[24],进一步推动了全球能源格局的变化。

全球90%的油气储量发现于海相地层中,因而学界很多人曾认为只有海相地层才能生油,陆相地层是贫油区。正因为我国中生代以来主要发育陆相地层,所以美国人早在20世纪20年代就给中国扣上了“贫油”的帽子^[25]。但是以潘钟祥、李四光、黄汲清为首的我国科学家提出了中国陆相沉积当中可以生油的认识,系统地论证了新华夏系沉降带具有良好的生油和储油条件^[26]。正是在陆相生油理论的指导下,我国的早期石油普查蓬勃发展,并于中华人民共和国成立十周年之际取得重大突破,先后发现了大庆油田和胜利油田,从此中国的石油工业才真正得以兴起。

没有陆相生油理论,就没有中国的现代化工业体系。没有陆相生油理论,现在外边的大街上可能跑的还是头顶煤气包的公共汽车(在20世纪50、60年代的贫油期,公共汽车只能利用煤气作为燃料,因为当年没有气体压缩技术和设备,只能在常压下将煤气储于车顶上的大气袋中,老百姓称为“大气包”)。陆相生油理论具有巨大的辐射作用,这可以从近几年全球重大的油气发现地都是原先海相生油理论认为不可能的大西洋被动大陆边缘得到验证。因此,陆相生油理论不仅给我们国家,而且给世界能源产业的发展提供了重要的理论支撑。

4.2.2 人类文明发展史也是一部资源利用史

同能源一样,地球矿产资源塑造了文明,地球资源哺

育了我们并提供我们的生活方式所需要的物质。人类原始文明(石器时代、青铜器时代、铁器时代)就是根据使用的生产工具种类命名的。伴随着工业化进程和人均国内生产总值(GDP)的增长,矿产资源消费呈指数级增长,使用的金属数量由早期不到6种增加到现在几十种(图4),因此矿产资源的发现和利用促进了人类文明的演替,而地球科学,特别是板块构造理论和地幔柱理论支撑了矿产资源的大规模发现。

4.3 地球科学研究提升了与自然和谐相处的能力

在人类文明的发展进程中,人与自然的關系也发生了悄无声息的变化。在原始文明时代,限于知识水平、劳动技能和种群规模,人类只能敬畏自然,顺应自然。进入农耕文明时代,人类开启了改造自然的征程。但由于生产力低下,改造自然的力量源主要靠“人多势众”,人与自然的關系则是进退博弈。到了工业文明时代,煤炭和石油需求大爆炸,带来了全球经济的蓬勃发展,但同时也为后来的环境危机埋下伏笔,例如,化石能源的过度利用加速了CO₂排放,导致了全球变暖和生态系统的崩溃、人类活动加剧了地质灾害风险,从而呼唤新的能源革命和新的人与自然的關系。地球科学在解决这些矛盾时发挥了不可替代的作用。

4.3.1 全球环境治理的成功案例

1952年12月初,伦敦遭遇了一场史无前例的空气污染灾难——伦敦烟雾事件。这场烟雾事件是一系列不利的气象条件和工业污染的叠加结果:寒冷的冬季伦敦市民大量燃烧低质量的煤炭取暖,产生了大量的烟尘和二氧化硫,而无风的天气条件使得这些污染物无法散去,在城市上空形成了厚厚的烟雾。烟雾中有害物质对人体健康造成了极大的危害,导

致4000多人因肺部及支气管疾病死亡。伦敦烟雾事件引发了全球对空气污染问题的广泛关注，并直接促使英国政府在1956年通过了《清洁空气法案》，以减少空气污染，改善公共健康。这场灾难不仅是环境史上的一大警示，也推动了现代环境保护运动的发展。

随着工业化进程的增加，化学品进入人类的日常生活，如滴滴涕等有机氯农药、多氯联苯、二噁英类等。研究发现，前者导致了环保名著《寂静的春天》^[27]中描述的“万鸟齐喑”，多氯联苯则是20世纪60~70年代“米糠油事件”和“油症事件”的元凶，二噁英则在欧洲引起了导致某政府下台的鸡肉污染事件。这些化学品具有长期残留性、生物累积性、半挥发性和高毒性，被称为持久性有机污染物(POPs)。因其能够通过各种环境介质(大气、水、生物等)长距离迁移，对环境和人类健康的潜在危害而受到全球关注。为了加强化学品的管理，减少其引起的危害，在联合国环境规划署(UNEP)主持下，国际社会达成了一系列的多边环境协议，包括《巴塞尔公约》《鹿特丹公约》《斯德哥尔摩公约》，以淘汰和削减POPs，保护人类健康和环境免受有毒化学品的危害。

1985年，三位英国科学家在南极洲上空的臭氧层中发现一个空洞，人类遭受紫外线伤害的风险激增。大气化学家保罗·克鲁岑等研究发现，用于冰箱的氯氟烃的化合物是形成臭氧空洞的原因。研究成果不仅获颁了1995年诺贝尔化学奖，还促成《蒙特利尔议定书》，呼吁减少然后全面禁止氟氯化碳的使用，成功解决了臭氧空洞问题，这是20世纪最成功的全球环境治理案例之一。

4.3.2 气候变化研究改变了世界经济范式的范式

当前，人类面临全球变暖、气候突变，我们都在倡导低碳出行、绿色生活的理念，但是你知道吗？这同样是地球科学家提出、论证并使公众和政策制定者认识到全球变暖和气候变化的存在及其对社会的巨大影响的。1975年，地球化学家华莱士·布洛克在*Science*发表全球变暖的论文，准确地预测了大气层当中二氧化碳含量升高是导致全球变暖的主因^[28]。他用到的一个重要的证据是图5中展示的基林曲线。从1958年开始，地球化学家查尔斯·基林就在夏威夷岛上观测大气二氧化碳浓度的变化，并由其儿子接替并坚持到今天，这条曲线成为20世纪气候变化的标志图。1988年气象学家詹姆斯·汉森在美国国会听证会上发出警告之后，人类活动排放的气体导致全球变暖的问题引起了全世界的关注。

人类活动影响气候变暖的证明还来自地球气候模拟。气候学家真锅淑郎和克劳斯·哈塞尔曼建立了人类历史上最复杂的动力学系统——地球系统，奠定了地球气候变异和人类对其影响的认知基础，从而引领了解决复杂系统科学问题的先河，因此获得了2021年诺贝尔物理学奖。

气候变化研究的影响力超乎想象。1988年成立了政府间气候变化专门委员会(即IPCC)，架起了科学与政治之间的桥梁。1992年各国签署签订了《联合国气候变化框架公约》

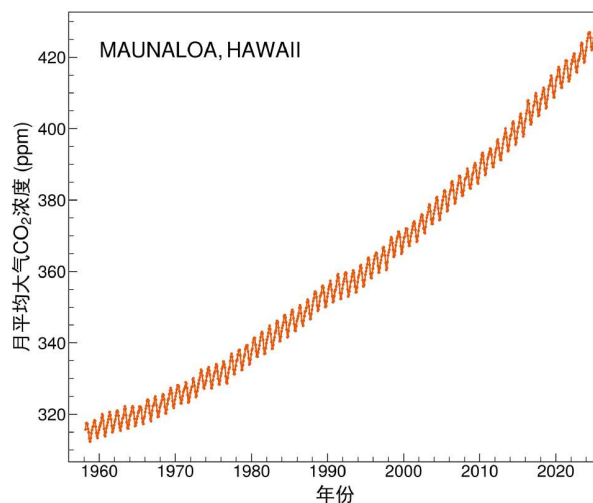


图5 基林曲线——1958年以来大气CO₂浓度的变化图

Figure 5 The Keeling Curve—changes in atmospheric CO₂ concentration since 1958

(UNFCCC)，规定了发达国家和发展中国家对温室气体减排的义务以及履行义务的程序。从1997年的京都议定书到2015年的巴黎协定，将全球升温的幅度限制在工业化前水平2°C，共同应对全球变化及其带来的影响。国际社会正以前所未有的方式，建立高级别的政治承诺和崭新的全球伙伴关系，引领全球建立了迈向“无碳经济”的目标，推进了最雄心勃勃的经济转型进程，正在重构工业革命以来全球经济发展的范式。

5 我国地球科学对世界/中国的贡献

5.1 在认识自然、提升认知方面的贡献

20世纪以来，中国的地球科学从无到有，迅速发展。中国学者提出了陆相生油和中国特色成煤理论、大陆深俯冲、克拉通破坏、中亚型地壳生长、碰撞成矿等重要学术思想，发展了板块构造理论；建立了11个全球年代地层单位界线层型剖面(即“金钉子”)、开发出继深海沉积和冰芯之后第三个古气候古环境记录——黄土，在沉积与古环境地质学方面积累了新的关键证据；发现了澄江、热河等著名古生物群，为早期生命演化、鸟类起源提供了关键证据；重建了晚古生代生物多样性曲线，揭开了生物大灭绝和之后的生物复苏的奥秘。一大批研究成果改写了对自然的认知，书写了中国人对地球科学和世界的贡献。

经典的板块构造理论认为大陆密度轻，在板块汇聚和造山过程中难以俯冲。而在阿尔卑斯山和大别山表壳岩石中发现的柯石英^[29,30]和金刚石^[31]挑战了这一观点，一批中国地质学家的共同努力建立了大陆深俯冲理论^[32,33]，为完善和丰富板块构造理论作出了中国人的贡献。

一般而言,大陆上古老的克拉通是稳定的.但范蔚茗等人提出华北克拉通下岩石圈发生了巨量减薄^[34],并伴随着强烈的地表变形、岩浆喷发和地质活动,改变了克拉通一成不变的传统认识^[35,36].在大量研究的基础上,中国科学家原创性地提出华北克拉通破坏的概念^[37,38],并指出其实质是由于岩石圈地幔物质组成与属性发生了根本转变,论证出洋-陆相互作用导致克拉通破坏与大陆增生是全球大陆演化的普遍规律^[38].

迄今为止,四位地球科学家(刘东生、叶笃正、曾庆存、李德仁)获得了中国科技最高奖.19~20世纪上半叶,欧洲科学家通过对阿尔卑斯山冰川的研究,建立了四次冰期-间冰期理论.20世纪60~70年代,以刘东生为代表的中国科学家通过对黄土的研究建立了多旋回冰期-间冰期理论^[39],利用连续黄土沉积记录建立全球变化国际对比标准,使中国的黄土与深海沉积、冰芯成为全球变化研究的三大支柱,在黄土沉积中揭示出与地球轨道参数变化一致的周期,为发展米兰科维奇理论作出了杰出贡献.结合青藏-黄土高原演化,中国黄土研究开辟了地球系统科学新领域,改变了国际全球变化的研究格局.

叶笃正创立大气长波能量频散理论,开创青藏高原气象学,创立东亚大气环流和季节突变理论.曾庆存是数值天气预报的数学物理基础理论和气候预测的重要开拓者之一,首创半隐式差分法,成功实现斜压原始方程数值天气预报,提出大气遥感理论和方法,并得到了世界范围内气象卫星的实践证实和业务应用.李德仁创立了误差可区分性理论,攻克了卫星遥感全球高精度定位及测图核心技术,攻克了卫星遥感全球高精度定位及测图核心技术,引领了航空与地面测绘遥感的重大变革.

5.2 在利用自然、大国崛起方面的贡献

中国地质学和矿产资源的寻找对中华人民共和国的建立和社会经济发展的贡献尤为显著.“一五”时期,国家重点建设项目中有一半投资在资源型城市,53个因矿而生的城市见证了地球科学在国家经济建设和社会发展中的贡献,见证了为建立我国独立完整的工业体系立下的汗马功劳.

稀土是我国最重要的战略金属储备之一,是当下中美博弈的重要砝码,其相互制衡的作用不可小觑.中国之所以成为稀土大国,是几代地质人艰苦卓绝奋斗的结果.1927年丁道衡先生在内蒙古白云鄂博发现铁矿,1935年何作霖先生在白云鄂博铁矿样品中发现两种稀土矿物,为后续超大型稀土矿的发现提供了重要线索.1950年组建“中央人民政府白云鄂博地质调查队”,通过几代地质人的艰苦努力,探明稀土储量3600万吨,成为世界上稀土第一大矿.白云鄂博以轻稀土为主,而1969年江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队在足洞发现的花岗岩风化壳离子吸附型重稀土矿,使我国成为兼有轻、重稀土的稀土大国,为大国博弈奠定了坚实基础.

而对这两类稀土矿床的成因和成矿规律研究,极大地丰富了稀土成矿理论,提升了对自然的认知.

5.3 在和谐自然、制定规则方面的贡献

在人类出现之前,自然地质作用一直是塑造地球表层地形地貌的主要力量.然而,随着人类的诞生和文明的演进,人类的各类工程活动开始逐渐对地质环境产生影响,并日益成为影响地质环境最直接、最显著的方式之一.在这些利用自然、保护自然的过程中如何做到和谐自然是摆在人类面前的新课题.如前所述,地球科学在这一过程中发挥了不可或缺的作用,而中国科学家的贡献不可磨灭.

人类文明的发展与自然灾害、工程活动紧密相连.我国是地质灾害风险最高的国家之一,已排查出的地质灾害隐患点超过30万处.20世纪以来,我国发生了大量破坏性地震,七度及以上地震高烈度区占国土面积的58%,地震死亡人数占全球地震总死亡人数的近一半^[40,41].为破解地质灾害防控和有效应对的难题,我国科学家对强震地质灾害开展了深入研究,发现了地震诱发地质灾害的普适性规律及大型滑坡机理,建立了全球最完整的地震诱发地质灾害数据库^[39].地质灾害识别与监测预警技术的进步也极大地推动了全球防灾减灾工作的发展.我国工程地质学家提出的“天-空-地”一体化地质灾害隐患早期识别“三查”体系已得到广泛应用,显著提高了地质灾害隐患的识别效率^[42].

在自然科学体系中,地质学是最晚形成的学科,但地质研究机构却开启了全球有组织科研之路^[43].成立于1835年的英国地质调查所(BGS),是世界上第一个官方资助的科学机构^[43].BGS规范了地质工作,包括绘制大比例尺地质图、地质剖面图、矿产等资源的调查等,这些工作突破了传统研究方式(以个人兴趣为主导),向社会显示了地质学的价值,以及集体合作研究方式的重大意义.成立于1913年的中央地质调查所,是中国第一个官方资助的科学机构,在中国地质学界的具有崇高的地位,在中国科技界也产生了重要影响^[44].1929年12月,中央地质调查所的裴文中等人发现完整的北京人头盖骨、20年代出版中国最早的地质图等,都是蜚声中外的地学大成果.中央地质调查所不仅有章鸿钊、丁文江、翁文灏等地质大师,还从这里先后走出了48位中国科学院和工程院院士,有“中国地学摇篮”之称.正如C.H. Peake所言:“地质调查所在国际学术界有其应有的地位.它的学者是知名的,它的杂志被人们广泛阅读,它的研究对发展地球的博物史知识作出了真正的贡献”^[45].蔡元培称地质调查所为“中国第一个名副其实的科学研究机构”^[46],树立了中国近代科研机构的典范.

6 一些启示

(1) 没有地学的自然科学体系是不完整的.人类生活在地球,至今为止人类还无法摆脱对地球的依赖.对自身栖息地

的认识和了解是追求美好生活之所需。人类文明的持续发展和进步离不开地球科学(见7.2节)。

(2) 保持好奇心、想象力、全球观和整合力是每一个从事地球科学研究的人员需要具备的优秀品质。鉴于地球科学具有基础性和应用性的双重属性,相关的科研布局应遵循两条腿走路的方案,即既要努力攀登世界科学研究的制高点,也要积极服务国家需求,为实现中华民族伟大复兴贡献力量。

(3) 我们面对着一个庞大的地球,面对的是一个复杂巨系统,因此需要重视观察和观测。只有像达尔文、基林、萨普那样,几十年如一日,获得可靠的第一手资料,才能真正揭秘地球运行的奥秘,更好地为造福人类服务。要拥抱新技术/新事物,如加强地学大数据的应用,重视人工智能技术在地学观察、探测和建模中的应用,突破传统思维在揭示地球运行机制时的局限性。

(4) 以相互欣赏的态度进行跨学科的交叉。学科交叉是地球科学发展的大势,也是地学界的广泛共识,但成功的学科交叉却依然凤毛麟角。莱伊尔和达尔文之所以分别成为现代地质学和生物学之父,与他们之间的相互欣赏、相互学习、相互影响、不断探索是分不开的。图佐·威尔逊在学术访问剑桥期间与博士生弗雷德·瓦因的交流促成了威尔逊旋回理论的提出^[47]。那时候威尔逊早已功成名就,瓦因才初出茅庐,只有对科学共同的兴趣和相互的欣赏才能使他们成为合作者、成就伟大的科学创造。

(5) 地学革命和创新不分男女老幼。板块构造学说的建立过程中,“主力队员”都是一批30岁左右的年轻人,如Keith Runcorn (34岁), Bruce Heezen (34岁), Fred Vine (小于30岁), Dan McKenzie (29岁), Jason Morgan (31岁), Xavier Le Pichon (32岁), 都是刚刚博士毕业或者还是博士后人员^[48]。这充分说明青年人巨大的科技创新能力。年轻的科技工作者要充分了解这一点,树立信心,及早地融入科技创新和变革的前沿阵地;而学术界要为他们创造宽松、自由的环境和条件。这个环境不见得是给他们多少科研项目,更重要的是给他们心无旁骛开展研究的环境和评价体系。另一方面,哈里·赫斯和图佐·威尔逊是创建板块构造学说一锤定音式的人物,他们那时候已经60多岁,他们有的是一般人不具备的对地学的执着、热爱和开放包容精神。

7 未来人类文明发展中的地学担当

7.1 面临的挑战

如果我们把46亿年的地球历史浓缩成一天,人类出现的时间其实只有1 min多,出现人类文明的时间就是这一天当中最后的几秒钟^[43]。就在这短短的几秒钟当中,人类的活动创造了无数的辉煌,也对地球系统造成了不可逆转的变化,人口增长、环境退化、城市扩张、资源枯竭,全球变暖、灾害频发,生物多样性减小……。甚至有科学家断言,人类可能正在

经历第六次生命大灭绝^[49]。人类对生态系统的威胁是史无前例的。全球变化背景下复杂地球系统的认识变得困难,不同文明之间的冲突和已成为常态的科技打压更给世界带来了不确定性。

7.2 迎接这些挑战离不开地球科学

人类还需要地球科学吗?答案是肯定的,不仅因为前述的地球科学对人类文明所作出的历史贡献,还因为地球科学在未来人类文明的发展中可以作出更大的贡献,更因为地球科学与大国崛起息息相关。这里择两个方面的思考以阐述之。

7.2.1 来自经济发展的启示

世界主要经济体均是用电大国,电力是驱动经济发展的源动力,而发展电力就要消耗铜。据统计,自1900年来,全球铜年消耗量增长了50倍,达到2000万吨/年。按照现在的发展趋势,至2060年,全球年铜消耗量将翻倍。如果考虑碳中和和人工智能等因素,至2060年全球年铜消耗量将达到惊人的9000万吨/年^[50]。而现在的铜供应量为2000万吨/年,全球前十大铜矿的年总产量仅为470万吨,即使考虑铜的循环利用,全球现有铜产量也无法满足经济发展所需。因此需要地质学家发现更多的铜矿才能满足全球经济的可持续发展。同铜一样,其他金属如锂、铍、铌、钽、钴、镍和稀土对社会经济、航空航天和国防军事的作用同样重要,同样需要地质学家向自然资源。

另一方面,如何减少温室气体排放并保护全球人口免受气候变化的影响是联合国气候峰会(COP系列会议)的主旨。正如*Nature Geoscience* 2024编者按^[51]所言,在这场全球性的努力中,地质学家正扮演着不可替代的角色,他们不仅在寻找新的关键矿物资源和能源金属,还在为实现净零排放目标提供科学支持。

7.2.2 来自海洋强国的启示

美国的崛起之路受很多因素的影响,但与海权论思想的熏陶是分不开的。在19世纪下半叶,阿尔弗雷德·马汉写出了“海权论三部曲”,提出“谁能有效地控制海洋,谁就会成为世界强国,而要称霸海洋,关键又在于对世界重要战略海道与海峡的控制”。海权对于国家的繁荣和安全至关重要。海权的构成要素包括地理位置、自然结构、领土范围、人口数量、民族性格等多个方面。在这些要素中,他强调了海军力量、海外基地和海上贸易航线的重要性。“锦囊妙计可以安天下”,海权论就是一个妙计,对美国的强国之路产生了重要影响。而要控制海洋就需要海洋科技的保驾护航。

1979年, Woods Hole海洋研究所研发的深潜器Alvin号首次完成水下6000英尺的下潜;同时期由“挑战者号”和“决心”构成的主力深海钻探船和大洋钻探计划(DSDP、ODP、IODP)更使美国拥有了强大的深海探测能力。深海探测能力的提升也使从海洋视角研究气候演化、地球动力、深部生命和地质灾害等成为可能,极大地促进了全球海洋科学的发展。

展,如开创了磁性地层学,验证了海底扩张和板块构造理论;开创古海洋学,验证了米兰科维奇理论;发现海底深部生物圈,探索深部地球生命极限;发现天然气水合物,为替代传统能源提供了新方向。

海洋强国崛起的历史表明,科技的研发与运用能够改变人类征服与利用海洋的方式,也直接影响着海洋强国的延续与更迭。海洋科学是解码地球、生命、人类文明何去何从等一系列关乎发展的问题的重要手段,也是帮助人类抵御自然灾害,巩固和拓展文明的生存空间,因为全球75%大城市和人口位于距岸线100 km内海岸带地区,直面海洋带来的风险与灾害。海洋科学可以帮助人类摆脱陆地资源能源枯竭的窘境,支撑未来可持续发展,因为全球海洋原油年产量约16亿吨;海洋天然气产量约1.2万亿立方米,深海锰结核总储量超过3万吨,锰总储量是陆地779倍;全球海上风电技术可开发潜力为710亿千瓦,仅开发1%即可满足全球10%的电力需求;海洋提供了全球20%的高质量蛋白质,鱼类每年可捕量达3亿吨。

7.3 地球科学研究的转型迫在眉睫

尽管需要地球科学的理由有很多,但我们必须意识到地球科学的转型已迫在眉睫。发展地球系统科学是当前公认的地球科学的发展趋势,要求整合地学的分支学科,打通不同时间尺度、耦合存在数量级差异的地球固体层圈和流体层圈的动力过程,学科交叉成为自然科学研究的主旋律。然而,地球科学的学科却越来越细化、分工越来越明确,交叉合作却越来越少,与社会的沟通能力弱,地学自引率高达72%,渐成“学科孤岛”。笔者意识到,当下可能就是地球科学发展的斯普特尼克时刻(Sputnik Moment),需要地球科学家和政策制定者们的共同关注。

7.4 未来人类文明发展中的地学担当

地球科学在迎接这些挑战时有义不容辞的责任,更有为未来人类文明的发展作出更大的贡献的潜力。未来的地球科学担当可以从两方面着手。一方面,我们要始终以科技强国为己任,维系中华文明的永续发展。另一方面,我们要践行“地球-生命命运共同体”的理念,为人类文明的发展贡献自己的智慧。重点关注以下四个方面的内容。

(1) 敬畏自然,不断拓展人类认知边界。始终保持探索地球奥秘的好奇心,不断探索人类认知边界新前沿。尤其需要对地球系统有更深刻的理解,深化地球科学与其他学科的交叉融合,特别是要打通不同时间尺度、耦合存在数量级差异的地球固体圈层和流体圈层的动力过程,发展地球系统科学,加深对全球变化背景下的地球复杂系统的认识,推动未来地球科学向着更深、更远、更综合的方向迈进。此外要发起/引领国际大科学计划。深时数字地球、海洋负排放和化学地球

就是我国地球科学家在这方面的积极探索。

(2) 服务国家意志、保障国家安全。当前,中美贸易战日益激烈,并延展到科技、人文、文化等多个领域,关键金属矿产成为大国博弈的砝码。新能源汽车、锂电池、光伏产品是我国外贸的“新三样”,而与“新三样”相关的锂、钴、镍等9种金属的对外依存度超过50%,因此新能源金属的成矿理论和找矿突破成为重中之重。另一方面,低碳清洁能源是未来经济发展的大势,创建成氢理论、寻找天然氢源是未来需重点关注方向,因为这是实现“双碳”目标的一个重要的途径。

我国目前原油年产量2亿吨,而年消耗7.5亿吨^[52]。2023年,我国油、气进口依存度为73%和42%。欧佩克秘书长巴尔金多预测到2045年,石油和天然气在全球能源结构中的比重仍将超过50%。因此在世界格局动荡以及碳中和背景下,我们仍需要保持清醒的头脑。除了前瞻布局清洁能源研究,石油和天然气等传统能源的研究和开发依然不能忽视。随着东部老油区产量逐年下降,探索深层、超深层和非常规等新领域已成必然,这面临着油气源、储层和油气相态与运移动力、地质流体微观流动机理等新挑战。

如前所述,海洋科技的发展与大国的兴起息息相关。因此要着力突破海洋核心装备和关键技术瓶颈,逐步实现深海进入、深海探测、深海开发三步走的国家深海战略。2024年底入列的“梦想号”钻探船,是我国突破海洋核心装备和关键技术瓶颈的一个典型案例,为实现“认识海洋、经略海洋”提供了重要平台和契机。

(3) 提升和谐自然的能力,增进人民福祉,服务“地球-生命共同体”理念。积极统筹气候变化应对、生态保护与污染防治,促进人与自然一体化健康;开展全球环境治理,建设美丽中国与宜居地球。要增强人类文明对自然灾害的抵御能力。200年前,莱伊尔说“现在是理解过去的钥匙”,现在我们知道,只有了解过去才能预测未来。面对时有发生滑坡、地震、火山、磁暴等自然灾害,各种早期预测、预警意义重大。其中复合巨灾机理与风险防控、灾害性天气的精准预报显得尤为重要。

(4) 拓展人类生存空间,不断将人类文明推向深空。1957年苏联发射了第一颗人造卫星,人类进入太空,第一次居高临下地从外部来看看我们的地球;1969年阿波罗11号载人登月,人类首次到达了地球之外的天体,标志着人类从一个地球物种变成了一个跨星际的物种;国际和中国空间站的建成使人类能够常驻太空,让太空成为了地球海陆空之外人类生存的“第四环境”。人类还能走得更远,人类文明也必将跨越地球走向深空。从2004年开始的中国嫦娥工程、天问工程等空间探索项目成就举世瞩目。在这个过程中,地球科学角色不可或缺,因为地球科学和行星科学问题驱动的空间探测设计最具生命力。

致谢 感谢国家自然科学基金(42342060)和中国科学院第160次前沿科技论坛资助。本文扩充自2024年中国科学院学部第九届学术年会上所做的同名演讲报告(http://academics.casad.cas.cn/xshd/xsnh/2024xsnh/xsbg/202406/t20240614_5021407.html)。在报告和论文的准备过程中得到了许多单位和个人的帮助,在此一并致以诚挚谢意。中国科学院武汉文献情报中心、国家自然科学基金委员会地学部各学科梳理组、中国科学院地学部常委会为本项工作提供了有力支撑;地质学科梳理组、中国科学院第160次前沿科技论坛以及国家自然科学基金委员会“克拉通基础科学中心项目”2024年联合野外考察队对报告的设计提供了建设性意见;郭正堂和周成虎帮助确定了报告中四个案例的标题和阐述逻辑;柴育成、陈朝晖、杜德斌、方小敏、付巧妹、关大博、康世昌、刘俊国、刘洋、卢蓓、陶诚、拓守挺、王赤、王焰新、熊萍、杨元喜、张九辰、张人禾、周忠和、朱日祥、朱茂炎等人提供了相关资料或具体指点。张仲石、万博、杨传茂等人帮助绘制了图件。感谢三位审稿人提出的建设性修改意见。本文关于“地球科学与人类文明”之间关系的理解还很粗浅,案例的选择也有意无意地偏向我相对熟悉的领域,好在分学科的梳理可以弥补这样的不足。期望报告和本文能激发今后更多相关的思考和研究。

推荐阅读文献

- 1 Oldroyd D R. Thinking About the Earth: A History of Ideas in Geology. Cambridge: Harvard University Press, 1996
- 2 Darwin C. On the Origin of Species. London: John Murray Press, 1859
- 3 Lyell C. Principles of Geology. London: Cambridge University Press, 1831
- 4 Darwin C. The Autobiography of Charles Darwin (1809–1882). London: Tredition Classics, 1887
- 5 Patterson C, Tilton G, Inghram M. Age of the Earth. *Science*, 1955, 121: 69–75
- 6 Mojzsis S J, Arrhenius G, McKeegan K D, et al. Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago. *Nature*, 1996, 384: 55–59
- 7 Walter R C. Age of Lucy and the First Family: single-crystal $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating of the Denen Dora and lower Kada Hadar members of the Hadar Formation, Ethiopia. *Geology*, 1994, 22: 6–10
- 8 Krings M, Stone A, Schmitz R W, et al. Neandertal DNA sequences and the origin of modern humans. *Cell*, 1997, 90: 19–30
- 9 Corliss J B, Dymond J, Gordon L I, et al. Submarine thermal springs on the Galápagos rift. *Science*, 1979, 203: 1073–1083
- 10 Harwood J. Sun J, trans. 100 Maps that Changed the World (in Chinese). Beijing: SDX Joint Publishing Company, 2010 [杰里米·哈伍德. 孙吉虹, 译. 改变世界的100幅地图. 北京: 生活·读书·新知三联书店, 2010]
- 11 Smith W. A Memoir to the Map and Delineation of the Strata of England and Wales, with Part of Scotland. London: John Cary, 1815
- 12 Wegener A. Die entstehung der kontinente. *Geol Rundsch*, 1912, 3: 276–292
- 13 Heezen B C, Tharp M, Ewing M. The Floors of the Oceans: I. The North Atlantic. McLean VA: Geological Society of America, 1959
- 14 Hess H H. History of ocean basins. *Petrolog Stud*, 1962, 4: 599–620
- 15 Vine F J, Matthews D H. Magnetic anomalies over oceanic ridges. *Nature*, 1963, 199: 947–949
- 16 McKenzie D P, Parker R L. The north Pacific: an example of tectonics on a sphere. *Nature*, 1967, 216: 1276–1280
- 17 Morgan W J. Rises, trenches, great faults, and crustal blocks. *J Geophys Res*, 1968, 73: 1959–1982
- 18 Le Pichon X. Sea-floor spreading and continental drift. *J Geophys Res*, 1968, 73: 3661–3697
- 19 Isacks B, Oliver J, Sykes L R. Seismology and the new global tectonics. *J Geophys Res*, 1968, 73: 5855–5899
- 20 Zhang Y H, Lu B P. World energy trend forecast and analysis of characteristics of energy technology revolution (in Chinese). *Natl Gas Indust*, 2016, 35: 1–10 [张映红, 路保平. 世界能源趋势预测及能源技术革命特征分析. 天然气工业, 2016, 35: 1–10]
- 21 Reuter M A, Hudson C, van Schaik A, et al. Metal recycling: opportunities, limits, infrastructure, a report of the working group on the global metal flows to the inter national resource panel. Nairobi, Kenya: United Nation Environmental Panel, 2013
- 22 White I C. The geology of natural gas. *Science*, 1985, 125: 521–522
- 23 Levorsen A I. Geology of Petroleum. A Series of Geology Texts. San Francisco: W.H. Freeman, 1956
- 24 Ben E. Lawl. Basin-centered gas systems. *Bulletin*, 2002, 86
- 25 Wang Y D, Yan J W, Li Z, et al. Continental oil generation and the “China oil-poor theory” (in Chinese). *Petroleum Knowledge*, 2021, 3: 5–6 [王一端, 闫建文, 李中, 等. 陆相生油与“中国贫油论”. 石油知识, 2021, 3: 5–6]
- 26 Pan C H. Geological notes: non-marine origin of petroleum in North Shensi, and the Cretaceous of Szechuan, China. *AAPG Bull*, 1941, 25: 2058–2068
- 27 Carson R. Ma A, trans. Silent Spring (in Chinese). Tianjin: Tianjin People’s Publishing House, 2017 [蕾切尔·卡森. 马绍博, 译. 寂静的春天. 天津: 天津人民出版社, 2017]
- 28 Broecker W S. Clim change: are we on the brink of a pronounced global warming? *Science*, 1975, 189: 460–463

- 29 Chopin C. Coesite and pure pyrope in high-grade blueschists of the Western Alps: a first record and some consequences. *Contr Mineral Petrol*, 1984, 86: 107–118
- 30 Xu Z. Etude tectonique et microtectonique de la chaine paleozoique et triasique des Quilings (Chine). Diplome de Doctorat. Montpellier, France: universite des Sciences et Techniques du Languedoc, 1987
- 31 Shutong X, Wen S, Yican L, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. *Science*, 1992, 256: 80–82
- 32 Li S, Xiao Y, Liou D, et al. Collision of the North China and Yangtse Blocks and formation of coesite-bearing eclogites: timing and processes. *Chem Geol*, 1993, 109: 89–111
- 33 Zheng Y F, Fu B, Gong B, et al. Stable isotope geochemistry of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Dabie–Sulu orogen in China: implications for geodynamics and fluid regime. *Earth-Sci Rev*, 2003, 62: 105–161
- 34 Fan W M, Menzies M A. Destruction of aged lower lithosphere accretion of asthenosphere mantle beneath eastern China. *Geotecton Metallogen*, 1992, 16: 171–180
- 35 Gao S, Rudnick R L, Carlson R W, et al. Re–Os evidence for replacement of ancient mantle lithosphere beneath the North China craton. *Earth Planet Sci Lett*, 2002, 198: 307–322
- 36 Xu Y G. Thermo-tectonic destruction of the archaean lithospheric keel beneath the Sino Korean craton in China: evidence, timing and mechanism. *Phys Chem Earth Part A-Solid Earth Geodesy*, 2001, 26: 747–757
- 37 Zhu R X, Xu Y G, Zhu G, et al. Destruction of the North China Craton. *Sci China Earth Sci*, 2012, 55: 1565–1587 [朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 华北克拉通破坏. 中国科学: 地球科学, 2012, 42: 1135–1159]
- 38 Wu F Y, Yang J H, Xu Y G, et al. Destruction of the North China Craton in the Mesozoic. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2019, 47: 173–195
- 39 Zhu R, Zhao G, Xiao W, et al. Origin, accretion, and reworking of continents. *Rev Geophys*, 2021, 59: e2019RG000689
- 40 Liu T. Loess and the Environment (in Chinese). Beijing: Science Press, 1985 [刘东生. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 1985]
- 41 Fan X, Scaringi G, Korup O, et al. Earthquake-induced chains of geologic hazards: patterns, mechanisms, and impacts. *Rev Geophys*, 2019, 57: 421–503
- 42 Xu Q, Dong X, Li W. Integrated space-air-ground early detection, monitoring and warning system for potential catastrophic geohazards (in Chinese). *Geomat Informat Sci Wuhan Univ*, 2019, 44: 957–966 [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. 武汉大学学报(信息科学版), 2019, 44: 957–966]
- 43 Zhang J. Humanistic Earth: The History of Human Understanding of the Earth (in Chinese). Beijing: Peking University Press, 2024 [张九辰. 人文地球——人类认识地球的历史. 北京: 北京大学出版社, 2024]
- 44 Zhang J. Geology and Republican China Society: A Study of the Central Geological Survey (in Chinese). Jinan: Shandong Education Press, 2005 [张九辰. 地质学与民国社会——中央地质调查所研究. 济南: 山东教育出版社, 2005]
- 45 Wang Y. History of the Geological Survey of China (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 1996 [王仰之. 中国地质调查所史. 北京: 石油工业出版社, 1996]
- 46 Gao P. Cai Yuanpei on Science and Technology (in Chinese). Shijiazhuang: Hebei Science and Technology Press, 1985 [高平叔. 蔡元培论科学与技术. 石家庄: 河北科技出版社, 1985]
- 47 Wilson J T. Did the Atlantic close and then re-open? *Nature*, 1966, 211: 676–681
- 48 Xu J. The Great Revolution in Earth Sciences: From Continental Drift to Plate Tectonics (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2008 [许靖华. 搏击沧海——地学革命风云录. 北京: 地质出版社, 2008]
- 49 Ceballos G, Ehrlich P R, Barnosky A D, et al. Accelerated modern human-induced species losses: entering the sixth mass extinction. *Sci Adv*, 2015, 1: e1400253
- 50 Simon A. The critical role for geoscientists to help achieve the UN sustainable development goals. *ICG*, 2024
- 51 Editorial. Minerals power the green transition. *Nat Geosci*, 2024, 17: 1067
- 52 Jia C, Zou C, Yang Z, et al. Significant progress of continental petroleum geology theory in basins of Central and Western China (in Chinese). *Petrol Explor Dev*, 2018, 45: 546–560 [贾承造, 邹才能, 杨智, 等. 陆相油气地质理论在中国中西部盆地的重大进展. 石油勘探与开发, 2018, 45: 546–560]

Summary for “地球科学对人类文明的贡献”

The contribution of Earth sciences to human civilization

Yi-Gang Xu

State Key Laboratory of Deep Earth Processes and Resources (DEEPER), Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

E-mail: yigangxu@gig.ac.cn

Earth science is a fundamental discipline that studies the structure, formation, and evolution of the Earth, with the ultimate goal of understanding the planet and benefiting humanity. It possesses both basic and applied attributes. On one hand, it serves as an integral part of the natural sciences system (including mathematics, physics, chemistry, astronomy, Earth science, and biology), investigates the operational laws of the Earth system, giving rise to groundbreaking theories such as plate tectonics and the Milankovitch theory. On the other hand, it promotes the effective management of Earth's resources and environment, while aiding in the resolution of socio-economically relevant and globally significant issues. Because it consistently revolves around humanity's fundamental questions and essential needs, Earth science is omnipresent in the development of human civilization and has continually demonstrated its remarkable vitality. It has profoundly influenced the advancement of human society through resource exploration and utilization, natural disaster prediction and mitigation, environmental protection and sustainable development, infrastructure construction, scientific research and education, as well as cultural and historical studies. As human needs have evolved across different stages of civilization, the focus and methodological framework of Earth science research have undergone significant transformations, making the relationship between humans and nature more complex and sensitive. Unfortunately, no comprehensive study has yet been conducted globally on the interplay between Earth science and human civilization. On the eve of a new round of scientific and technological revolution and amid the ongoing transformation of research paradigms, it is of great significance to synthesize the contributions of Earth science to human civilization and analyze the underlying logical principles. Such an effort would enhance the societal function of Earth science and empower it to better serve the progress of future civilizations.

Human civilization refers to the sum total of material and spiritual wealth created and accumulated by humanity throughout the course of social and historical development. It has undergone a succession of stages—from primitive civilization and agrarian civilization to industrial civilization, and to ecological civilization. Here, from the perspective of civilizational evolution, we propose three new essential elements of human civilization, including cognition, wealth and governance. We also put forward three criteria for evaluating contributions of Earth sciences to civilizational advancement: Does Earth science study (1) revolutionize human understanding, (2) enhance productivity, generate wealth, improve living standards, or transform lifestyles, and (3) foster consensus, optimize human-environment relations, and advance global governance?

Building upon this proposed elucidation framework, this paper systematically examines the historical contributions of Earth Science to human civilization in the following three aspects: understanding nature, utilizing nature, and harmonizing with nature. Several examples are illustrated in detail, notably including “Without geology, there can be no theory of evolution”, “Map and plate tectonics that changed the world”, “Without geology, there would be no industrial revolution”, and “Climate change research has changed the paradigm of world economic development”. We also highlight Chinese geoscientists' achievements in promoting socio-economic development both globally and domestically, analyze underlying logical patterns, and elucidate insights from revolutionary geoscientific research.

Earth science has made tremendous historical contributions to human civilization and can contribute even more to its future development. Special attention should be paid to the following four aspects: (1) reverence for nature and continuously expanding the boundaries of human knowledge; (2) serving national interests and safeguarding national security; (3) enhancing the ability to harmonize with nature, improving people's well-being, and advancing the vision of an “Earth-Life Community”; (4) expanding humanity's living space and propelling civilization further into deep space.

Earth sciences, human civilization, three fundamental elements of civilization, evaluating criteria, historic contribution, perspectives

doi: [10.1360/CSB-2025-0635](https://doi.org/10.1360/CSB-2025-0635)