

【特约评论】

doi: 10.12029/gc20240129002

施俊法, 吴林强, 王泉, 方圆, 杨宗喜, 姚晓峰, 贾德龙. 2024. 地质科学新思维观与新时代地质工作战略思考[J]. 中国地质, 51(2): 547-560.

Shi Junfa, Wu Linqiang, Wang Quan, Fang Yuan, Yang Zongxi, Yao Xiaofeng, Jia Delong. 2024. New perspectives on geological science and strategic thinking on geological work in the New Era[J]. Geology in China, 51(2): 547-560(in Chinese with English abstract).

地质科学新思维观与新时代地质工作战略思考

施俊法, 吴林强, 王泉, 方圆, 杨宗喜, 姚晓峰, 贾德龙

(中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037)

摘要: 【研究目的】通过分析新时代地质工作面临的挑战和机遇, 构建地质科学新思维观, 力求使地质工作健康、持续、稳定发展。【研究方法】从理论与实践、历史与未来、守正与创新、发展与保护的逻辑出发, 研究提出地质科学新思维观, 并分析其意义。【研究结果】地质科学新思维观主要是: (1)地质大基础观, 加强区域基础地质调查, 加强全国资源、环境、生态、灾害、空间国情调查, 深化对地球认知的水平。(2)地质大资源观, 将全部地质要素进行整体调查、开发与保护, 实现各类地质要素资源综合效益的最大化。能源和战略性矿产是最核心的地质资源, 地质工作要把保障国家能源和战略性矿产资源安全摆在首位。(3)地质大生态观, 发挥地质工作在促进生态系统稳定与可持续中的作用, 解决生态系统问题或维护生态系统功能。(4)地质大数据观, 充分运用现代信息技术, 全面实现地质工作的数字化、智能化转型。(5)地质大系统观, 将地球与自然、社会、经济系统作为整体综合考虑, 维持地球系统稳定和人类经济社会可持续发展, 推进传统地质科学向地球系统科学转变。【结论】基于新思维观, 新时代地质工作要: 树立地质大基础观, 提高基础地质调查水平, 深化对地球发展演化的认知; 树立地质大资源观, 巩固传统地质找矿工作, 实现新一轮找矿取得重大突破, 拓展自然资源调查评价新领域; 树立地质大生态观, 开辟生态地质, 为生态修复与保护提供地质解决方案; 树立地质大数据观, 构建地质科学研究新范式, 为社会需求提供智慧化地质解决方案; 树立地质大系统观, 发展和完善地球系统科学, 建立新一代地质科学知识体系。

关键词: 矿产勘查; 生态文明; 地质大基础观; 地质大资源观; 地质大生态观; 地质大数据观; 地质大系统观

创新点: 通过地质工作需求分析, 研判地质工作发展趋势, 提出地质工作未来发展需要树立新思维观。

中图分类号: F426; P621 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)02-0547-14

New perspectives on geological science and strategic thinking on geological work in the New Era

SHI Junfa, WU Linqiang, WANG Quan, FANG Yuan, YANG Zongxi, YAO Xiaofeng, JIA Delong

(Development and Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037, China)

Abstract: This paper is the result of geological survey engineering.

[Objective] This research aims to analyze the challenges and opportunities facing geological work in the new era, construct a new conceptual framework for geological work, and strive for its healthy, sustainable, and stable development. **[Methods]** The research methodology is grounded in the logic of theory and practice, history and future, inheritance and innovation, and development and

收稿日期: 2024-01-29; 改回日期: 2024-02-21

基金项目: 中国地质调查局项目“自然资源管理与现代地质调查战略研究”(DD20230558)和自然资源智库 2023 年度课题“新时代地质调查发展战略研究”联合资助。

作者简介: 施俊法, 男, 1964 年生, 博士, 研究员, 主要从事地质工作战略研究; E-mail: shijunfa@163.com。

protection. It puts forth a new conceptual framework for geological science and analyzes its significance. **[Results]** The new conceptual framework for geological science mainly includes: (1) Geological Great Foundation Perspective: Strengthening regional foundational geological surveys, enhancing national surveys on resources, environment, ecology, disasters, and spatial national conditions, and deepening the understanding of the Earth. (2) Geological Great Resource Perspective: Conducting comprehensive surveys, development, and protection of all geological elements to maximize the integrated benefits of various geological element resources. Energy and strategic minerals are the core geological resources, and geological work should give top priority to ensuring national energy and strategic mineral resource security. (3) Geological Great Ecology Perspective: Leveraging the role of geological work in promoting ecosystem stability and sustainability, addressing ecosystem issues, or maintaining ecosystem functionality. (4) Geological Great Data Perspective: Making full use of modern information technology to comprehensively realize the digital and intelligent transformation of geological work. (5) Geological Great System Perspective: Considering the Earth and the natural, social and economic systems as a whole in an integrated manner, maintaining the stability of the Earth system and sustainable development of human economy and society, and promoting the transformation of traditional geological science into Earth system science. **[Conclusions]** In conclusion, based on the new conceptual framework, geological work in the new era should: Establish the Geological Great Foundation Perspective by enhancing foundational geological survey levels and deepening understanding of the Earth's development and evolution. Embrace the Geological Great Resource Perspective by consolidating traditional geological prospecting work, achieving significant breakthroughs in the new round of prospecting, and expanding into new domains of natural resource investigation and evaluation. Adopt the Geological Great Ecological Perspective by developing ecological geology and providing geological solutions for ecological restoration and protection. Implement the Geological Great Data Perspective by constructing a new paradigm for geological science research and providing intelligent geological solutions to societal needs. Promote the Geological Great System Perspective by developing and improving Earth system science, establishing a new generation of geological science knowledge systems.

Key words: mineral exploration; ecological civilization; geological great foundation perspective; geological great resource perspective; geological great ecology perspective; geological great data perspective; geological great system perspective

Highlights: Through the analysis of the needs of geological work, assessing the trends in geological work development, and proposing new perspectives to be established for the future development of geological work.

About the first author: SHI Junfa, male, born in 1964, doctor, researcher, mainly engaged in strategic research in geological work; E-mail: shijunfa@163.com.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey "Strategic Research on Natural Resource Management and Modern Geological Survey" (No.DD20230558) and the Natural Resources Think Tank 2023 Annual Project "Strategic Research on the Development of Geological Survey in the New Era."

1 引言: 新时代地质工作新要求

任何科学的发展必须服务经济社会,地质科学也不例外。长期以来,地质科学的主要作用是通过研究地球,寻找能源、矿产资源和水资源等自然资源,以保证人类社会发展的需求。自工业革命以来,人类对地球环境的影响日益增强,并大大超过河流、冰、风等自然因素,成为改造地球的重要营力。有科学家预言,人类活动对地球的影响足以开创一个新的地质时代,即人类世(Zalasiewicz et al., 2011)。在人类活动对地球产生巨大影响下,地球系统各个组成部分正处于不断失衡的状态。多项

最新研究表明,地球行星边界框架中的9条边界已有6条被超越,多个地球系统的“致命临界点”已经或即将越界,地球正面临脱离类似全新世的状态之中,人类和生物多样性将迎来前所未有的巨大威胁(Richardson et al., 2023; Lenton et al., 2023)。与此同时,世界之变、时代之变、历史之变的特征更加明显,世界百年未有之大变局的效应不断深化。新征程上,面对世情、国情的深刻变化,如何缓解全球气候变化,维护地球系统持续稳定,顺应新一轮科技革命和产业变革,破解全球战略性矿产博弈难题,保障中国式现代化建设……这些都给地质工作提出了新的时代难题。应对这些新任务新挑战,既离

不开地质科学知识,又在深度、广度和内容上远远超出了传统地质科学的认识能力和知识水平。2022年,围绕新时代地质工作应该做什么、为谁做、怎么做这一时代命题,笔者在《新时代地质工作方略》一书中首次提出了“地质大基础观”、“地质大资源观”(施俊法, 2022),本文在此基础上,进一步提出了地质大生态观、地质大数据观、地质大系统观,明确其内涵,期望以新的思维方式和理念,引领拓宽地质工作的调查研究领域,进而推动构建比以往更广泛、更深入、更有效地服务于人类社会生存和可持续发展的新一代地质科学知识体系。

1.1 中国式现代化对保障能源和战略性矿产资源安全提出了新的更高要求

党的二十大擘画了全面建设社会主义现代化国家、以中国式现代化全面推进中华民族伟大复兴的宏伟蓝图。习近平总书记在中国共产党第二十次全国代表大会上指出,中国式现代化是人口规模巨大的现代化,是人与自然和谐共生的现代化,是走和平发展道路的现代化。能源和战略性矿产资源作为重要的初级产品,是经济社会发展的基础性产品,也是中国式现代化建设的重要物质基础。2022年,我国原油进口 5.08 亿 t,占全球进口量的 23.9%,对外依存度为 71.2%;天然气进口量 1516 亿 m³,占全球进口量的 15.6%,对外依存度降为 40.2%。2021年,新能源矿产锂、钴和镍的进口量(金属量)分别为 6.29 万 t、10.1 万 t 和 134 万 t,分别占全球总进口量的 66%、81% 和 90%,对外依存度分别达到 65%、85% 和 92%(王安建和王春辉, 2023)。我国作为全球矿产资源第一消费国、第一生产国和重要贸易国,在 2035 年之前,对战略性矿产的需求总体呈上升趋势,仍将面临规模巨大的消费数量和日益增长的消费种类的严峻态势(王安建和高蕊蕊, 2020)。当前,百年变局加速演进,逆全球化思潮抬头,单边主义、保护主义明显上升,全球产业链供应链呈现内向化收缩、本土化转移和区域化集聚等新的发展动向,各国对产业链供应链主导权的争夺日益激烈(金观平, 2023)。战略性矿产资源因其战略性、稀缺性和空间分布不均衡性,已成为大国博弈的重要焦点,并将可能成为重塑国际力量对比的重要因素(Smelror, 2023)。随着我国石油、铁等战略性矿产资源对外依存度居高不下,国

际供应风险急速攀升,要求我们必须强化底线思维、极限思维,加快实施新一轮找矿突破战略行动,努力强化我国能源和战略性矿产资源安全和重要产业链供应链韧性,有效应对来自国内国际偶然因素、突发事件和不利影响等带来的冲击,确保极限条件下战略性矿产资源供应自给,把发展主动权牢牢掌握在自己手中。

1.2 “双碳”目标成为促进地质工作高质量发展的主要驱动力

应对气候变化是一个高度复杂的国际议题,也是全球性公共议题。实现碳达峰碳中和,是着力解决资源环境约束突出问题、实现中华民族永续发展的必然选择。党的二十大报告强调,“立足我国能源资源禀赋,坚持先立后破,有计划分步骤实施碳达峰行动。”积极稳妥推进碳达峰碳中和目标,要求我国加快构建绿色低碳循环发展的经济体系,大力推行绿色生产方式,推动能源革命和资源节约集约利用,统筹减污降碳协同增效,实现经济社会发展和生态环境保护协调统一。这既要坚持从国情出发,切实发挥煤炭的兜底保障作用,大力发展碳捕集与封存技术(CCS)等,实现石油、煤炭清洁高效生产利用;又要积极推进地热能、页岩气、干热岩、可燃冰等新能源开发利用,提高矿产资源节约与综合利用水平,科学有序推动能源绿色低碳转型。同时,在“双碳”目标语境之下,新能源、新材料、高端装备、新能源汽车等战略性新兴产业快速发展,不仅加大了对铜等传统资源的需求,更对锂、钴、镍、稀土等关键金属原材料的安全稳定供应提出了新要求(周守为和朱军龙, 2021)。实现这些目标,都离不开地质工作和地质科学知识在保障国家能源和战略性矿产资源安全、推动能源绿色转型、助力碳储碳汇的基础性作用。

1.3 地球系统处于崩溃边缘迫切需加强地质科学研究促进人地和谐

自进入人类世以来,人类活动已成为驱动地球系统演变的重要营力,并在不断改变地球系统的状态(Zalasiewicz et al., 2011)。如今,人类对地球环境的影响仍在持续,地球系统的各个组成部分在不断变化的环境下越来越处于失衡状态。《Science》最新发表的论文(Richardson et al., 2023),构建了对维持整个地球系统稳定性和复原力至关重要的 9 个

过程(行星边界框架的 9 条边界), 并采用工业化前全新世的条件为参考, 以评估人为影响的程度。结果显示, 气候变化、生物圈完整性、土地系统变化、淡水利用、生物地球化学流、新实体(由人类创造并引入地球系统的新物体, 如合成化学品、转基因生物等)等 6 条边界已被超越, 表明地球现在已经远远超出了人类安全生存的空间; 尚未被突破的 3 条边界中, 海洋酸化已经接近突破边界, 气溶胶负荷部分超出了边界, 仅有平流层臭氧水平尚在安全范围内。英国埃克塞特大学全球系统研究所(Global Systems Institute)的一项研究也显示(Lenton et al., 2023), 基于对地球系统的观测、计算模拟, 在地球系统 26 个“临界点”中, 8 个正面临或即将面临跨界点的风险, 并将在未来几十年内产生灾难性的后果。应对全球性重大难题, 实现地球可持续发展, 需要地质科学不断突破传统的思维框架, 以更宏观、更综合、更高维度的理念来审视、谋划、推动地质工作, 将地球系统作为一个整体来考虑, 深入研究地球系统内部各圈层、各子系统的相互作用, 提高对地球系统的认识, 了解地球系统的演变规律, 增强预测未来环境变化和自然灾害的能力, 为地球系统的科学管理提供依据。

1.4 美丽中国建设催生建立新的地球科学知识体系

美丽中国建设是全面建设社会主义现代化国家的重要目标。2023 年 11 月 7 日, 习近平总书记主持召开中央全面深化改革委员会第三次会议时指出, 要锚定 2035 年美丽中国目标基本实现, 加快发展方式绿色转型, 持续深入推进污染防治攻坚, 提升生态系统多样性、稳定性、持续性, 守牢安全底线, 健全保障体系, 推动实现生态环境根本好转。建设美丽中国, 要求自然资源领域进一步优化国土空间开发格局, 全面提高资源利用效率, 提升生态系统多样性、稳定性、持续性, 守住自然生态安全底线……在新任务和新目标面前, 传统地质科学单纯从固体地球本身的研究难以满足实际需求, 必须通过对其他圈层的研究, 并在有关学科的配合下寻求突破和发展。因此, 地质科学只有适应社会需要, 拓展“侧重于矿产勘查与研究”的知识体系, 加强地球深部过程与表层特征和演化研究, 建立起以地球系统科学和深部地质作用过程为核心的新一代科学知识体系, 才能更好理解生态系统与人类系统的

相互作用关系, 为优化国土空间开发、利用与保护格局, 维持生态系统的稳定和可持续提供地质科学依据, 发挥好新时代地质工作对生态文明建设的基础支撑作用。

1.5 新一轮科技革命和产业变革推动地质科学研究范式转变

科学技术是第一生产力。地质工作是运用地质科学与技术方法对地球系统进行调查、监测、模拟与预测的过程, 是典型的知识密集型和数据密集型行业(施俊法等, 2014)。地质工作水平和效率的高低取决于地质科学技术水平的高低。当今全球科技创新进入空前密集活跃的时期, 新一轮科技革命和产业变革正在重构全球创新版图、重塑全球经济结构。卫星定位、卫星遥感、航空遥感、雷达、传感器等现代监测技术的推广使用, 大数据、云计算、超级计算机、人工智能、物联网、区块链等新一代信息技术和计算机硬件的迅猛发展, 为地质科学研究提供了革命性的技术工具, 将对地质工作方式、内容、效果产生深远影响(施俊法, 2020)。然而, 长期以来, 我国地质工作科研与调查脱节尚未完全解决, 对新的科学技术的应用水平总体上落后于其他高科技行业, 总体上处于“守正”有余、“创新”不足的状态。新征程上, 面对新需求、新问题, 只有正确认识到科技是第一生产力, 推进地质工作现代化, 充分应用现代科技创新成果, 加快形成新质生产力, 为地质工作高质量发展注入强劲动力。

1.6 行星地球理论进一步推动地质科学的创新发展

地质科学的基本科学任务是探索地球的起源和演化, 但地球只是太阳系众多行星之一, 我们对地球的认识放在整个太阳系可能只是一些局部的片段。板块构造理论的诞生和发展, 推动了地球科学的变革, 并成为当代固体地球科学的主导理论(肖庆辉等, 1994)。然而, 板块构造仅仅代表了行星演化的一个阶段, 虽能解释固体地球的很多重大特征, 也仅局限于岩石圈且很不完善, 地球深部至今仍是板块构造学说尚未涉及的领域(刘丽军和陈凌, 2024; 徐义刚等, 2024)。因此, 必须从行星演化的更高角度进行探索和研究, 跳出地球研究地球, 从地球以外的其他天体上获得新数据新信息(张国伟等, 2021)。近年来, 行星地球理论的快速发展, 为理解地球的演化、地质过程和现象提供了基础, 让

充分了解地球和其他行星从太阳系中诞生到它们目前状态的演化成为可能,使得对地球演化的理解能够建立在对地球的物理、化学和生物学的详细、定量、预测模型的基础之上,为人类理解地球深部结构、探寻深部资源、了解生命起源、预测自然灾害提供了重要的理论支持,并进一步比较、拓展、深化和推动地球科学的创新发展(欧阳自远等, 2002; 杨志华等, 2005; 张国伟等, 2021)。

2 新时代地质科学新思维观的概念及内涵

方克定(2011)关于国土资源管理工作提出了“大国土、大资源、大地质”的思路,本文在借鉴此思路的基础上,面对新形势新需求,结合我国地质科学实践,提出地质科学新思维观,其核心可概括为地质大基础观、地质大资源观、地质大生态观、地质大数据观和地质大系统观,这“五观”或可为新时代地质工作的基本方略,为地质工作发展指明了方向。

2.1 地质大基础观

基础地质调查工作是地质工作基础的基础、先行的先行。自 1815 年世界第一幅地质图诞生以来(Thomas, 2004),伴随着经济社会的发展,基础地质的调查精度、广度和深度都在不断提升,基础地质的服务领域在不断拓展(李廷栋等, 2014)。地质大基础观,立意于掌握全国地质、资源、环境国情,增进地质、资源、环境融合统一,丰富基础性地质调查内涵和外延,拓展地质调查成果服务领域。地质大基础观蕴含着全面调查、多维认知、系统部署、急用先行、循序渐进等重要理念,既要着眼全局又要聚焦重点,既分析时空结构又研究影响效应,既强调长远性又重视阶段性。在地质大基础观的指引下,地质工作既要在时空维度上对行星地球的基础属性进行调查,又要在环境资源要素维度进一步掌握摸清地质、资源、环境、生态、灾害和空间的本质。

多维度认识地质大基础观。从三维空间、时间演化的维度提升对地球系统的基础认识,空间上包括陆表、深海、深地、深空等范围内地质体,时间上涵盖过去、现在和未来,在认识上要回答地球起源、演化及其资源环境效应(2021—2030 地球科学发展

战略研究组, 2021),以大系统理念支撑地质大基础观。

全要素理解地质大基础观。认知人类生存密切相关的各类地质背景,为支撑和服务经济社会发展提供资源基础、环境基础、工程基础、灾害基础、生态基础、空间基础等。在地质大基础观的指导下,地质工作呈现为“1+N”的调查格局,“1”是地质端,即区域地质调查,是认知岩石圈基本特征的起点;“N”是随着经济社会发展演变需要深入认识地球系统某一方面特征的专项调查,未来一段时间至少存在有 4 个领域:

能源、矿产及其他资源端。调查和评价地质作用所形成可被利用的能源、矿产和其他地质资源,瞄准重点成矿区带、重要油气盆地等,开展矿产地质调查、矿产资源潜力评价、地质遗迹调查等工作,是摸清资源家底、了解资源空间分布状况,是增强科学开发利用能源和矿产资源的基础。

地质环境和灾害端。调查、监测、评价影响人类生存的地质环境和地质风险,聚焦重要流域、重要平原区、重大工程建设区等人居地区,开展水文地质调查、水资源监测评价、土地质量地球化学调查、地质灾害调查和监测预警、地质安全风险评估等工作,避免和减少地质因素对人类生命财产损害,维护人类生存可持续发展。

地质生态端。调查影响生态系统的地质背景和监测重大生态问题发展变化情况,围绕主要生态功能区,开展地表基质调查、生态地质调查、健康地质调查、自然资源要素监测等工作,从地质角度发现、诊断和修复生态问题。

地质空间端。调查评价地下空间资源潜力、可利用性及其风险,围绕重要城市群、重要经济区、地质安全岛等,开展城市地质调查、地下空间探测、二氧化碳地质封存调查等工作,合理开发利用地下空间。

把握地质大基础观,关键是要抓住基础地质调查在所有调查领域“根”和“本”的地位和作用,它是贯穿我国地质工作的主题主线。从新中国成立七十多年的历程看,每一次找矿高潮的到来,都是从加强基础地质工作开始。新中国成立之初,百废待兴、百业待举,地质工作者以“找矿兴国”为己任,率先开展 1:20 万区域地质调查工作。改革开放后,

围绕社会主义现代化的需求,提出了“以地质-找矿为中心”的方针,强调加强基础地质调查,拓展工作服务领域,深化地质找矿工作。世纪之交,聚焦资源环境突出问题,组织实施了“新一轮国土资源大调查”,部署“一项计划、四项工程”,其中“一项计划”就是基础地质调查计划。

2.2 地质大资源观

资源是人类赖以生存和发展的重要基础,整部人类文明史就是一部利用、认识和高效利用资源的历史(翟明国和胡波, 2021)。近年来,干旱洪水等气候变化、新冠疫情、俄乌冲突、粮食危机等极端事件频繁发生,逆全球化和保守主义逐渐抬头(王帆, 2023),在未来很长一段时间内,能源、战略性矿产等都将是人类社会争夺的关键资源(OECD-FAO, 2021; WMO, 2023)。可以确定的是,未来的发展对能源和战略性矿产资源的需求并没有降低,而是越来越高,需求结构不断变化、需求种类日趋繁多、需求规模与日俱增。地质大资源观,就是将全部地质要素作为资源或环境进行整体调查、开发与保护,实现各类地质资源综合效益的最大化,从而满足人类社会对各类资源的需求。所谓地质要素,就是与地球本身相关的资源环境要素,位于大气圈、水圈、生物圈与岩石圈相互叠置的地球浅表,主要包括岩石(矿产)、土壤、地下水、地下空间等在内的多种实体与非实体,代表了地球与人类相互作用的基本要素。各地质要素之间相互关联,存在着物理、化学和生物的耦合联系,并且可以在一定条件下互相转化,因此,必须将其视为一个整体来统筹。理解地质大资源观的内涵,关键是要把握地质资源的需求规模大、涵盖范畴广、开发用途多、服务链条全四个特性。

地质资源的范畴涵盖广。地质大资源涵盖了能源、矿产、水、土壤、地质环境、地下空间等全部地质要素。正如自然资源可概括为“山-水-林-田-湖-草-沙”,地质大资源可概括为“能-矿-水-土-环-空”等一切与地质相关的资源。其中,岩石圈作为水圈、生物圈的载体,其作用与演化是地质大资源的基础,岩石圈物质的循环过程控制和影响着各类资源的生成与富集。如沉积作用富集了煤炭、石油、天然气、铝土矿、磷矿等沉积型矿产,岩浆、变质等不同成矿成岩作用形成了各类金属矿产,岩石

的不同构造、结构和地层剖面等形成了地质遗迹,不同类型的盐穴、流体开采后的空储层等形成了可供人类储存天然气、二氧化碳的良好储层,构造稳定的地下空间又构成了人类生产生活的第二空间。不同地质要素是不同的资源,即便相同的元素富集在不同地质体中,也形成了不同的资源。如铁、铜等元素富集在岩石中,就形成了铁矿、铜矿等矿产资源,但富集在土壤中就形成了重金属超标的污染土壤;硒、锌等有益元素富集在土壤中,就形成了富硒土地、富锌土地等特色农业资源,如果适度富集在水中就形成了对人体有益的矿泉水。

地质资源的需求规模大。能源和矿产资源是最重要的地质资源,也是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础。工业革命以来,快速增长的工业活动加速了矿产资源的消耗。据统计,地球上每人每年要耗费约 18 t 矿产资源,其中,能源占消费总量的近 37%(Minerals Education Coalition, 2023)。尽管相比其他地质资源,能源和矿产资源在岩石圈的储量十分丰富,但由于具有空间分布不均衡、时间尺度不可再生、丰度维度稀缺和物性维度难以替代等“四重属性”,全球围绕矿产资源的竞争十分激烈(王安建和袁小品, 2022)。2017—2022 年,全球对锂的总需求增长了 200%,对钴的总需求增长了 70%,对镍的总需求增长了 40%(IEA, 2023)。在全球气候危机的大背景下,清洁能源的勘探开发成为世界各国争夺的新战场,天然气水合物、干热岩、锂钴镍等新能源矿产正在成为争夺的新焦点。

地质资源的开发用途多。地质资源具有多种属性和相互转化性。以土壤资源为例,土壤是农业用地中的耕作层,从常规资源角度看,农作物耕作利用了土壤的自然属性,是自然资源的基本利用方式;而从另外的角度看,土壤还具有储水功能和“碳源”“碳汇”功能等其他功能与属性。同时,不同地质资源之间往往可以互相转化。以金属元素为例,在不同的地质要素中富集往往呈现不同的资源属性。湖南是著名的“有色金属之乡”,其区域地质特征决定了其能够富集形成有色金属矿床,但又造成了一定程度的土壤重金属超标。又如岩溶地区经常发生岩溶塌陷等地质灾害,但又形成了富有艺术特征的丹霞、雅丹、喀斯特等地貌,形成了宝贵的地质旅游资源。在具体实践中,随着人们对地质资源

多种属性和相互转化性认识的不断加深,又催生出了对资源利用新的价值取向,即追求资源开发利用的系统价值。这种价值取向要求必须统筹地质要素的多种资源属性进行综合开发,推动地质要素之间的转化,转向对人类更有益处的方向,从而发挥地质资源的最大效益。

地质资源的服务链条全。按照地质工作全产业链的思路,找矿突破是能源和战略性矿产资源开发的起点。地质工作是“下蛋的鸡”,不是“鸡蛋”,不能简单依靠“卖鸡蛋”或“卖资源”赚钱,而是要通过找到的优质矿产资源吸引下游市场主体,发展实体经济。地质找矿虽然相比下游产业产值较小,但却是全产业链中最前面的“1”,后端产业都是在“1”后面加的“0”。没有地质工作发现矿产资源这个“1”,就没有后端产业,再多的“0”也是空谈;有了“1”,才能以最少的资源带动最大的产业,进而统筹“大资源、大市场、大产业”,实现最大的经济效益、社会效益、生态效益。按照地质大资源观,全社会要改变以往“多关注中下游产业链供应链,忽略上游矿业链”的思维模式,打通矿产资源从找矿、勘查、采矿、选矿、冶炼、加工、材料研发、产品制造、资源回收全链条。

需要特别指出的是,地质大资源要以能源和战略性矿产资源为根本,因为它们是最主要、最核心的地质资源。在地质大资源观指导下,地质工作要把保障国家能源和战略性矿产资源安全放在最重要、最核心的位置。

2.3 地质大生态观

美丽中国建设是全面建设社会主义现代化国家的重要目标,而生态系统的稳定与可持续是生态文明建设和美丽中国建设的重要领域。地质大生态观,就是以地质工作为基本内核,发挥地质工作在促进生态系统稳定与可持续中的作用,充分运用地质学原理、方法、技术,解决生态系统问题或维护生态系统功能的一套科学思维观和方法论。

岩石圈的生态功能是理解“地质大生态观”的基础。地球的各圈层、各子系统之间发生着相互作用。岩石圈对生物的生存和进化具有重要影响和作用,其上层地质体深度参与了碳循环、氮循环、磷循环等地球表层的物质循环过程,而岩石圈的板块构造运动,地球物理场、地球化学场等多种功能都

对地球生态产生影响(Trofimov, 2001)。可以说,地质本底是维持生态系统稳定之源,岩石圈上层是生态系统赖以生存和持续的基础。地质多样性为生物多样性提供“舞台”,生物多样性是地质多样性“舞台”上的“演员”。由此不难理解,地质多样性是生态多样性的重要基础和保障,在带状地理因素相同的情况下,地质多样性为生物多样性和物种分布格局提供了关键驱动力。地球关键带作为“地球表层岩石-土壤-生物-水-大气”的相互作用带,对于维持地球陆地生态系统的运转和人类生存发展至关重要,是践行地质大生态观的重要抓手(余韵等, 2021)。

水循环过程是理解“地质大生态观”的桥梁。水是地质系统和生态系统中最为活跃的地质因素,各种无机物、有机物、气体及微生物随着水文循环和水的地质循环,在地球圈层间发生分散、迁移和富集。水循环是地质生态系统的重要驱动器和调节器。随着水在大气圈、岩石圈和生物圈中流动,推动了许多物理、化学和生物过程,并携带着潜热、沉积物、营养物质和碳,这些物质从昼夜时间尺度乃至地质时间尺度调节着地球气候系统,进而影响地质生态系统。随着人类对水和全球系统其他部分施加的压力不断增加,了解水循环如何响应并在过去和不久的将来反作用于全球变化,仍然是全球变化研究面临的主要挑战。

生态保护修复和国土空间优化是践行“地质大生态观”的重要路径。地质工作对生态保护修复和国土空间优化具有重要意义。岩石圈特别是地球表层的地球关键带作为水圈、生物圈和生态环境的载体,也为生态系统的形成、演化提供了必需的物质和空间基础。

马克思主义哲学认为,认识的任务不仅在于解释世界,更重要的在于为改造世界提供理论基础。地质大生态观的提出,不但加深了对地质与生态系统之间关系的理解,而且还可以指导地质工作更好服务生态保护修复和国土空间优化。通过持续开展对生态系统的调查、监测、评价工作,构建从山顶到海洋的保护治理大格局,为生态系统的稳定和可持续提供地质依据,发挥新时代生态文明建设的重要支点作用。

2.4 地质大数据观

当今世界早已进入大数据时代(邬贺铨,

2013)。新一轮信息技术的高速发展,深刻改变了地质工作的调查、监测模式,极大提高了地质调查工作的效率和精度,也获得了远超出人类想象的地球科学数据量(施俊法等,2014)。然而,在一定程度上,当前地球科学的分析研究能力已经远远落后于其获取数据的能力,地质学家已经不能驾驭信息爆炸带来的海量数据,造成了“数据淹没”,必须通过大数据手段整合和挖掘这些数据中包含的“地质信息”(赵鹏大,2019),推动地球科学实现新发现、形成新知识,以解决日益复杂的资源环境和经济社会问题(周成虎等,2021)。地质大数据观,就是充分运用现代信息科学技术,全面实现地质工作的数字化、智能化转型。树立地质大数据观要求改变传统的地质工作模式,让一切地质特征皆可数据化,一切地质现象均需定量化,一切地质过程都要模型化,最终实现在数字世界构建一个与真实世界近乎一致的平行世界。

地质大数据前提在地质数据海量化。数据是现代地质工作的血液,“大数据”为地球科学研究提供营养,也给解决资源环境问题提供支撑。对传统的地质工作而言,要想获得海量的地质数据,首先,要实现存量地质信息的数字化。推动全国基础地质、物探、化探等多学科海量地质资料矢量化、数字化,实现多源、多元地球科学数据的动态汇聚与更新,集成整合地质调查数据资源,构建形成二、三维数据一体化组织管理的地球科学“一张图”大数据体系,建成地球科学大数据中心(谭永杰等,2023)。其次,要构建实时监测网络体系获取增量数据。利用遥感、传感器、物联网等技术手段,发展智能地质调查,提高监测能力,建设“空-天-地-海”一体化的立体综合监测站网,实现地质调查数据采集的自动化、数字化、智能化。最后,要通过构架时空数据模型对海量数据进行有效地分析处理。地质数据区别于其他数据的最大不同之处,在于所有地质信息都具有时空属性。因此,构建适合于地质数据分析处理的时空数据模型和软件系统,是当前落实“地质大数据观”的当务之急。

地质大数据重点在地质过程定量化。地质系统天然呈现出系统性、复杂性、非线性的特点,传统的问题导向和需求导向的地质工作只能从点上反映出复杂地质系统的一个侧面,很难从系统的角度

反映地质系统的全貌。在大数据时代,地质工作必然从问题驱动走向数据驱动,从以往的在已知问题中寻求答案(Know Know),转变为从未知的问题寻求未知的答案(Unknow Unknowns),由“因果关系研究”转向“相关关系研究”(Cheng et al., 2020)。因此,大数据时代下地质工作的定量化是必然发展趋势。换句话说,就是要系统地采用数学方法、数学模型、计算工具,对地质现象、地质过程和地质规律进行系统地挖掘、演绎、推理和表达。地质模型应用的开发则为地质过程定量化提供了实现可能。通过推进人工智能、机器学习等技术在地质建模中的应用,整合形成地质模型库,构建地质大数据科学研究范式,充分利用地质大数据,凝练地质科学认识,跨越从“数据”到“信息”,从“信息”到“知识”的鸿沟,将地质成果打造成地球科学知识库。

地质大数据成效在地质服务智慧化。地质大数据在各领域数据化水平的提高,将有效推动地质工作从信息孤岛走向数据融合,使定量化分析进一步推进,进而为智慧化服务奠定了基础。地质服务智慧化主要分三个步骤实现。首先是地质数据的融合。通过准确的地质“深时标尺”控制,海量的地质数据可以反映地球各圈层在时间尺度上的变化,进而分析多个圈层的关联和共同演变,提高对地球的科学认知水平,探索地球系统演化和各圈层相互作用奥秘,推动地球科学迈上新台阶(Cheng et al., 2020)。其次是“数字地球”的构建。在地球科学大数据驱动下,构建各类地质数据体系和数字模型,探索地质过程与环境变化模拟、分析与可视化,形成数字盆地、数字成矿带、数字流域、数字城市地下空间、数字海岸带、数字海洋,建成“数字地球”。最后是产品体系的智能化,实现“数智地球”。构建多源多层次的服务组织体系和权威地质信息产品体系,探索实现地质工作版的“大语言模型”,确保在正确的时间、向正确的人群、发送正确的产品,最终建成“数智地球”。

2.5 地质大系统观

自地质工作诞生以来,找矿成为地质工作与生俱来的“基因”。地质科学长期以来的研究重点主要聚焦在固态层圈系统(岩石圈)上,生物圈的演化仅仅被用作地质时代尺标,大气圈和水圈的演化是作为矿产形成和其他地质作用的条件加以研究的

(肖庆辉等, 1994)。随着气候变化、水资源不足、生物多样性减少、土地退化等全球性问题的日益突出,许多重大的资源环境问题,单从固体地球系统本身的研究并不能得到完全解决,必须通过对其他圈层系统的研究,并在有关学科的配合下寻求突破和发展(张国伟等, 2021; Bosson et al., 2023; Liu et al., 2023)。地质大系统观,是基于人类社会发展和生存与时俱进的需求,将地球与自然、社会、经济系统融合起来综合考虑,不断扩大地质科学的研究领域,创造新的研究方法,推进跨学科大联合、大交叉、大综合,构建起新的地质科学知识体系,维持地球系统稳定和人类经济社会可持续发展,维护地球的宜居性。地质大系统观是从宏观、动态、高维、开放的角度,对传统地质科学的再思考,其本质是追求地质工作功能的最大化,满足人类对宜居地球的需求。地质大系统观对地质工作的服务领域、调查空间、产业链价值链等方面都提出了新要求。

聚焦地球表层系统追求人地和谐。地球表层系统是地球宜居性的重要载体,为人类生存提供水、食物、能源等基础资源,对于生态系统服务的持续供给具有关键作用(Banwart et al., 2013; 朱日祥等, 2021; 杨顺华等, 2024)。自工业革命以来,以城市化、工业化和全球化为代表的人类活动对地球表层环境带来前所未有的巨大影响,引发的水土资源退化、生物多样性锐减等资源环境问题明显降低了地球宜居性,威胁着人类社会的可持续发展(傅伯杰, 2020)。对地质大系统观而言,通过加强对地球关键带的调查监测,研究岩石-土壤-水-大气-生物之间的相互耦合作用及其效应,推动地球表层自然、经济、社会、技术等多要素综合研究,提高对地球表层系统的理解和动态变化的预测,促进人-地关系和谐,是其重要的使命任务。

进军地球深部系统提升整体认知水平。地球是一个极其活跃、不断演化着的行星体系,各圈层之间存在着密切的相互作用和联系(黄鼎成等, 2005)。地球宜居性不仅受地球表生作用的控制,也同样受地球内部圈层(地核、地幔及岩石圈)的影响(徐义刚等, 2024)。地球表层系统和深部系统是地球整个地球系统的“一体两面”,对其中任何一部分认识的提高,都必须依赖于对另一部分的了解。地球表层系统不仅影响了深部圈层的结构、成分和地质

过程,还影响着深部圈层随时代的演变(谢树成, 2024);而地球深部圈层在整个地球系统的运作中则起着支配作用,驱动着表层系统地质时间尺度上变形变质、资源富集以及气候、环境的剧变(徐义刚等, 2024)。因此,地球内外层圈间的联动机制是认识整个地球系统的一个关键点。此外,地球深部还蕴藏着丰富的油气和矿产,是支撑人类发展的重要资源库。树立地质大系统观,必然要向地球深部进军,加快构建深部探测技术体系,深入理解地球深部动力过程,提高对地球深部资源环境空间的利用水平。

探索太阳系行星系统认识生命起源。太阳系行星系统的研究是回答生命的起源与演化,认识类似人类所居住星体的形成过程的关键(肖龙等, 2008)。全球变化和地球宜居性问题,其实质关键是追根溯源探索认知宇宙行星地球系统的整体形成、演化及其动力机理,及其与生命的本质关系规律(张国伟等, 2021)。太阳、地球及其他行星是一个整体巨型复杂系统,探索研究认知整体行星地球系统形成演化,必须将地球自身演化的问题置于整个太阳系的全局当中,既要从行星地球内核到外层空间的多圈层地球系统,又要从太阳系行星系统的时空四维视野,来观察理解探索天体地球的实质与规律。

紧跟科技前沿推动自身发展。地质科学前沿对地质科学的未来起到导向与带动作用,其研究和进展在很大程度上将决定地质科学与地质事业未来的整体走向和水平(肖庆辉等, 1994)。地质科学是动态发展的、与时俱进的科学,而非静止的、一成不变的;是不断在自我的变革中实现自身发展向前的。在地质大系统观指导下,一方面,要围绕社会发展和人类生存环境提出的种种社会的、科学的问题,主动部署地质科学前沿研究,从而建立以服务于人类社会生存和发展条件为基本任务的新一代地质科学知识体系。另一方面,由于包括地质科学在内的任何科学,都是随着技术的发展和需求的变化而不断向前发展的,要主动关注科学本身的发展前沿和研究重心的变化,聚焦重大跨学科前沿领域和重大科学问题,开展多学科、多技术的联合攻关,推动地质科学沿着全新的方向发展。

上述“五观”是一个统一的整体,彼此之间相互

渗透融合。其中,地质是各类地质资源、生态、灾害、空间的赋存载体,地质大基础观在“五观”中居于基础地位,是理解整个地质科学新思维观的“底座”;地质大资源观、地质大生态观则是“五观”的支柱和两翼,其他思维观都围绕并服务于地质大资源观、地质大生态观,也是整个地质科学新思维观的价值追求;地质大数据观和地质大系统观为地质工作提供科学支撑和信息服务,是贯穿整个地质科学新思维观的核心。

3 基于新思维观的新时代地质工作战略思考

新时代新征程,世界百年未有之大变局加速演进,中华民族伟大复兴进入关键时期,战略机遇和风险挑战并存,地质工作面临新形势新任务,必须树立地质科学新思维观。要统筹地质大基础观、大资源观、大生态观、大数据观和大系统观,不断提升我国地质科学创新策源能力、成果转化能力、产业服务能力。

3.1 树立地质大基础观,提高基础地质调查水平

要保证基础地质工作长期稳定连续,拓展基础地质调查内涵和外延,提升地质资源环境国情认知水平。一是不断开辟区域地质研究新疆域。以区域地质、区域地球物理、区域地球化学、区域遥感地质调查,深化地球形成与演化的基本认知,不断推动认知范围从陆域拓展到海域、从国内拓展到全球、从地球拓展到行星,持续深化人类宜居的行星地质条件认识。二是深化资源、环境、生态、灾害、空间等地质国情调查。面向经济社会发展的需要新问题新挑战,围绕不同目的、在不同区划单元开展不同类别的专项调查,深化水、土、矿、生态、灾害、空间等与地质资源环境国情认识,为解决不断出现的资源环境问题提供科学支撑。三是以地质工作现代化加快形成新赛道。紧跟科技发展潮流,以科技创新和信息化改造赋能基础地质调查,不断提升基础地质调查工作的广度、精度、深度,为形成地质工作新产业新业态提供基础。

3.2 树立地质大资源观,巩固传统地质找矿工作,拓展自然资源调查评价新领域

3.2.1 牢牢抓住地质找矿主业,实现找矿新突破

要牢牢抓住地质工作主责主业,全方位满足国

家对能源、矿产资源的需求。一是要把国家能源和战略性矿产安全保障放在地质工作最核心的位置。实施新一轮找矿突破战略行动,增强能源、战略性矿产、水等战略资源保障能力。扎实开展页岩气、常规油气攻深找盲、煤炭清洁高效利用,加快天然气水合物、干热岩和页岩气等清洁能源的勘查开发。二是要实现资源开发利用综合效益最大化。强化资源综合利用研究,提升矿产资源利用率,开展资源数量-质量-生态“三位一体”综合评价,将资源开发的价值追求取向由高度聚焦经济价值和数量安全,向注重包括资源效益、环境效益、社会效益在内的综合效益转变。三是要提升资源海外供应保障能力。立足国内、放眼全球,积极探索海外矿产资源投资开发和基础设施互联互通,构建多元化供应保障格局。四是要加快构建安全可靠的能源和战略性矿产资源储备体系。加强对战略性矿产资源调查评价、勘查和开发利用的统一规划,构建产品、产能和产地相结合,政府储备和企业社会责任储备互为补充的战略性矿产资源储备体系,提升能源和战略性矿产资源供给体系对国内需求的适配性。

3.2.2 主动实施自然资源综合调查评价,夯实地质工作新根基

要牢固树立地质要素本身就是资源的理念,从支撑服务自然资源管理出发,改造传统的水工环地质调查工作,推动地质工作从传统的调查向监测、模拟、预测延伸,从能源和战略性矿产资源向全要素自然资源拓展,重构地质工作新体系。一是实施多门类自然资源综合调查评价。开展不同空间尺度内多门类自然资源禀赋条件、结构特征、功能和空间分布规律以及开发利用状况综合评价,揭示自然资源的相互关系及制约机理;开展重点地区山水林田湖草沙等专项调查监测,摸清资源本底,预测演变趋势,支撑全国和重点地区自然资源区划。二是加强资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价。实施全国及重大战略区、省级、市县级等不同尺度资源环境承载能力监测预警,开展水资源、地质安全、重大工程建设安全等重大问题专题规划研究。三是深化城市地质调查。针对制约城市发展的重大地质资源、环境、空间、灾害问题开展综合调查,补齐城市规划、建设与管理过程中地质状

况不明、资源底数不清的短板,搭建地质工作支撑城市管理的信息和决策服务平台,构建统筹陆海空,地上地下一体化的监测预警系统,助推城市地下空间开发利用和城市规划建设。**四是**提高地质灾害调查精度。加强多重灾害过程的识别和研究,及早研判气候变化,研制预警预报模型。

3.3 树立地质大生态观,开辟生态地质新领域

要推动绿色转型升级,为生态修复与保护提供地质解决方案。**一**是要加强生态地质调查。针对岩石圈资源生态功能、地球动力生态功能、地球物理生态功能、地球化学生态功能,开展“四维一体”的生态地质调查,获取地质空间资源的分布、范围、面积及其属性信息,系统掌握生态地质本底状况,为生态系统的稳定和可持续提供地质依据,充分发挥新时代生态文明建设的重要支点作用。**二**是开展生态地质状态监测。运用空-天-地-海一体化的观测技术,在多级尺度上开展生态地质要素和人类活动的观测,挖掘生态地质演化与人类社会发展的耦合关系,支撑实现生态地质状况的动态感知和生态地质问题的预测预警,增进人与自然相互作用的机理认识。**三**是开展生态地质评价和区划。引入医学、生物学、社会学、农学、经济学等相关标准和指标,分级评价生态地质状况,进行全国生态地质区划,开展模型研究,预测生态系统演化,科学指导国土空间规划和生态保护修复工作。**四**是探索运行生态地质智慧服务。实时发布全国生态地质状态白皮书,提供生态补偿、碳汇交易等自然资源市场活动的依据,加速市场主体孵化自然资源市场的新模式,促进生态旅游、生态农业、生态康养、绿色债券等市场模式的落地。

3.4 树立地质大数据观,构建地质科学研究新范式

运用大数据技术,构建中国版“数智地球”,为社会需求提供智慧化地质解决方案。**一**是要加快构建空-天-地-海一体化的地质调查、监测、探测数据采集体系。充分利用卫星遥感、航空遥感、物联网、人工智能等调查、监测、探测技术,搭建完善的地质调查“数字”工作环境,实现多源、多元地球科学数据的动态汇聚与更新,构建形成全天候监测与预警的动态感知体系。**二**是构建地球科学“一张图”和数据动态更新机制。集成整合海量地质数据资源,实施二、三维数据一体化组织管理,形成基础

地质、能源地质、矿产地质等核心调查数据库,建立覆盖“陆地海洋、山上山下、地上地下、上游下游”的地球科学“一张图”大数据资源体系。**三**是大力推进地质大数据科学研究范式构建与示范应用。探索地球系统模拟与预测,建立耦合地质、生态、物理、化学等多种过程的地球系统模式,探索建设地质数据体系和数字模型,实现地质过程与环境变化模拟与分析可视化。强化人工智能应用技术攻关与创新,推动地质工作由“数字化”向“智能化”转变,推进人工智能技术在地质填图、矿产地质调查、地质灾害隐患识别等领域示范应用。**四**是加大力度开发高质量地质调查权威信息产品。通过地质大数据驱动,形成基于多源融合数据的分析、预测、评价、预警业务,建设多元化地质大数据“超市”,主动向相关部门提供专业知识服务,向社会公众提供地质数据和科普服务,将地质部门打造成信息部门和咨询服务部门,跨越从“数据”到“信息”再到“知识”的鸿沟,让全社会对地质工作“看得懂、想得起、用得上”,形成全社会因“地”制宜指导发展的良好局面。

3.5 树立地质大系统观,发展和完善地球系统科学

要发挥地质科学技术第一生产力的作用,聚焦地质科学前沿,不断提高对地球系统的认识,建立基于地球系统科学的新一代地质科学知识体系。**一**是拓宽地质工作新方向。促进地质工作向“大地质”或者“广义地质”转变,与时俱进满足国家和时代的需求,覆盖山水林田湖草沙方方面面,贯穿经济社会发展全链条。**二**是促进多学科融合发展。将解决重大地质科学问题作为推动多学科交叉融合发展的关键抓手,系统开展地球关键带、生态地球化学、青藏高原、环中国海调查等重大问题科技攻关,促进传统地质科学与生态科学、生物科学、大气科学、人口学、经济学等自然科学和社会科学的交叉融合,以解决复杂的科学问题和社会问题。**三**是部署地质前沿研究领域。构建“三深一系统”科技创新体系(朱日祥等, 2021),加强深地、深海、深空探测,深化地球演化过程及机制研究,积极探索洋底动力学过程与资源-环境效应。强化对地球表层环境演变、生态系统与人类活动的耦合响应、生命-环境-气候间协同演化、生物地球化学和水循环等短中时间尺度上的地球表层系统等问题调查研

究。**四是**积极探索行星地质学研究。进一步破解太阳系及其天体形成和演化、地球演变过程、地球生命起源及演化等重大科学问题。

4 结论

(1) 新时代经济社会发展对于地质工作提出了新的要求,如中国式现代化建设、美丽中国建设、“双碳”目标的实现、地球系统处于崩溃边缘等外部需求因素的变化,以及新一轮科技革命和产业变革、行星地球理论的发展等内生动力的变革,传统需求与新兴需求和创新技术的叠加,导致当前的地质工作正处于一个发展的十字路口。

(2) 面对新的形势变化,逐渐催生了地质科学新思维观,可概括为“五观”,即地质大基础观、地质大资源观、地质大生态观、地质大数据观和地质大系统观。地质大基础观,立意于掌握全国地质、资源、环境国情,增进地质、资源、环境融合统一,丰富基础性地质调查内涵和外延,拓展地质调查成果服务领域。地质大资源观,就是将全部地质要素作为资源或环境进行整体调查、开发与保护,实现各类地质资源综合效益的最大化,从而满足人类社会对各类资源的需求,其中,能源和战略性矿产资源是地质大资源观的核心。地质大生态观,就是以地质工作为基本内核,发挥地质工作在促进生态系统稳定与可持续中的作用,充分运用地质学原理、方法、技术,解决生态系统问题或维护生态系统功能的一套科学思维观和方法论。地质大数据观,就是充分运用现代信息科学技术,全面实现地质工作的数字化、智能化转型。地质大系统观,是基于人类社会发展和生存与时俱进的需求,将地球与自然、社会、经济系统融合起来综合考虑,不断扩大地质科学的研究领域,创造新的研究方法,推进跨学科大联合、大交叉、大综合,构建起新的地质科学知识体系,维持地球系统稳定和人类经济社会可持续发展,维护地球的宜居性。

(3) 基于地质科学新思维观,本文提出了未来地质工作新的发展之路。基于新思维观,新时代地质工作要树立地质大基础观,提高基础地质调查水平,深化对地球发展演化的认知;树立地质大资源观,巩固传统地质找矿工作,实现新一轮找矿取得重大突破,拓展自然资源调查评价新领域;树立地

质大生态观,开辟生态地质,为生态修复与保护提供地质解决方案;树立地质大数据观,构建地质科学研究新范式,为社会需求提供智慧化地质解决方案;树立地质大系统观,发展和完善地球系统科学,建立新一代地质科学知识体系。

References

- 2021–2030 Development strategy of Earth science Study Group. 2021. 2021–2030 Earth Science Development Strategy The Past, Present and Future of the Habitable Earth[M]. Beijing: Science Press, 1–174(in Chinese).
- Banwart S A, Chorover J, Gaillardet J, Sparks D, White T, Anderson S, Aufdenkampe A, Bernasconi S, Brantley S L, Chadwick O, Dietrich W E, Duffy C, Goldhaber M, Lehnert K, Nikolaidis N P, Ragnarsdottir K V. 2013. Sustaining Earth's critical zone: basic science and interdisciplinary solutions for global challenges[R]. Report of an international workshop on Critical Zone Observatory science. United Kingdom: The University of Sheffield.
- Bosson J B, Huss M, Cauvy-Fraunié S, Clément J C, Costes G, Fischer M, Poulencard J, Arthaud F. 2023. Future emergence of new ecosystems caused by glacial retreat[J]. *Nature*, 620: 562–569.
- Cheng Q M, Oberhänsli R, Zhao M L. 2020. A new international initiative for facilitating data-driven Earth science transformation [J]. Geological Society, London, Special Publications, 499: 225–240.
- Fang Keding. 2011. Starting point and baseline for strategic research on land resources[J]. *Land and Resources Information*, (3): 2–13 (in Chinese).
- Fu Bojie. 2020. The United Nations sustainable development goals and the historic mission of geosciences[J]. *Science & Technology Review*, 38(13): 19–24 (in Chinese).
- Huang Dingcheng, Lin Hai, Zhang Zhiqiang. 2005. Development Strategy of Earth Science Study[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1–328(in Chinese).
- IEA. 2023. Critical Minerals Market Review 2023[R]. Paris: International Energy Agency.
- Jin Guanping. 2023. Enhancing the resilience and security of the industrial supply chain[N]. *Economic Daily*, 2023–07–04(001) (in Chinese).
- Lenton T, Armstrong M D, Milkoreit M, Powell T. 2023. The Global Tipping Points Report[R]. Exeter: University of Exeter's Global Systems Institute.
- Li Tingdong, Liu Yong, Wang Jun, Zheng Hongwei. 2014. A discussion on ten functions of geological maps[J]. *Geological Review*, 60(3): 473–485 (in Chinese).
- Liu Lijun, Chen Ling. 2004. Co-evolution of continental lithosphere and deep mantle dynamics[J]. *China Science Bulletin*, 69(2): 200–214 (in Chinese).

- Liu L P, Galbrun E, Tang H, Kaakinen A, Zhang Z S, Zhang Z J, Žliobaitė I. 2023. The emergence of modern zoogeographic regions in Asia examined through climate–dental trait association patterns [J]. *Nature Communications*, 14: 8194.
- Minerals Education Coalition. 2023. MEC Minerals Needed Every Year[EB/OL]. MEC. <https://mineralseducationcoalition.org/mining-mineral-statistics>.
- OECD–FAO. 2021. *Agricultural Outlook 2021–2030*[R]. Paris: OECD.
- Ouyang Ziyuan, Liu Jianzhong, Zhang Fuqin, Wang Shijie, Xu Lin. 2002. A Preliminary study on the origin and evolution of the planetary Earth's heterogeneity[J]. *Earth Science Frontiers*, (3): 23–30 (in Chinese with English abstract).
- Richardson K, Steffen W, Lucht W, Bendtsen J, Cornell S E, Donges J F, Drüke M, Fetzer I, Bala G, von Bloh W, Feulner G, Fiedler S, Gerten D, Gleeson T, Hofmann M, Huiskamp W, Kummu M, Mohan C, Nogués–Bravo D, Petri S, Porkka M, Rahmstorf S, Schaphoff S, Thonicke K, Tobian A, Virkki V, Wang–Erlundsson L, Weber L, Rockström J. 2023. Earth beyond six of nine planetary boundaries[J]. *Science Advances*, 9: eadh2458.
- Shi Junfa, Tang Jinrong, Zhou Ping, Zheng Junwei. 2014. Development trend of international geological survey and its implications to China[J]. *Geological Bulletin of China*, 33(10): 1465–1472 (in Chinese with English abstract).
- Shi Junfa. 2020. 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[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 2044–2057 (in Chinese with English abstract).
- Shi Junfa. 2022. *Strategies for Geological Work in the New Era*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–449 (in Chinese).
- Smelror M. 2023. ‘Practically useful, scientifically important, and to the honour of the country’: Geological maps and services provided by the Geological Survey of Norway these past 165 years[J]. *Geological Society, London, Special Publications*, 541.
- Tan Yongjie, Liu Rongmei, Zhu Yueqin, Wen Min. 2023. On the characteristics and development directions of geological big data[J]. *Journal of Spatio-temporal Information*, 30(3): 313–320 (in Chinese with English abstract).
- Thomas W A. 2004. *Meeting Challenges with Geologic Maps*[M]. Alexandria: American Geological Institute, 1–64.
- Trofimov V T. 2001. Ecological geology—A novel branch of geological sciences[J]. *Earth Science Frontiers*, (1): 27–35 (in English with Chinese abstract).
- Wang Anjian, Gao Xinrui. 2020. China's energy and important mineral resources demand perspective[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 35(3): 338–344 (in Chinese with English abstract).
- Wang Anjian, Wang Chunhui. 2023. Challenges of international turmoil situation to China's energy resource security and coping strategies[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 38(1): 72–80 (in Chinese with English abstract).
- Wang Anjian, Yuan Xiaojing. 2022. Security of China's strategic and critical minerals under background of great power competition[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 37(11): 1550–1559 (in Chinese with English abstract).
- Wang Fan. 2023. An analysis of the characteristics and trend of international situation[J]. *National Security Forum*, 2(1): 82–88, 92–93 (in Chinese with English abstract).
- World Meteorological Organization (WMO). 2023. *State of Global Water Resources report 2022*[R]. Geneva: WMO.
- Wu Hequan. 2013. Opportunities and challenges in the era of big data[J]. *Qiu Shi*, (4): 47–49 (in Chinese).
- Xiao Long, Greeley Ronald, Zeng Zuoxun, Huang Dinghua. 2008. Methodology, achievements and prospects of comparative planetary geology[J]. *Geological Science and Technology Information*, (3): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Xiao Qinghui, Jia Yueming, Liu Shucheng, Li Xiaobo. 1994. *Plans for Advancing Frontier Research in Geosciences in China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–75 (in Chinese).
- Xie Shucheng, Luo Genming, Zhu Zongmin. 2024. Surface system impact on the spatiotemporal evolution of deep Earth[J]. *China Science Bulletin*, 69(2): 149–159 (in Chinese with English abstract).
- Xu Yigang, Huang Xiaolong, Wang Qiang, Wang Yu, Li Gaojun, Liu Wei, Mao Huguang, Ni Huaiwei, Zhu Maoyan. 2024. Earth's habitability driven by deep processes[J]. *China Science Bulletin*, 69(2): 169–183 (in Chinese).
- Yang Shunhua, Song Xiaodong, Wu Huayong, Wu Kening, Zhang Ganlin. 2024. A Review and Discussion on the Earth's Critical Zone Research: Status Quo and Prospect[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*[2024–01–11]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html> (in Chinese with English abstract).
- Yang Zhihua, Li Yong, Guo Jungfeng. 2005. Commemorating the 100th anniversary of the theory of relativity: The evolution of planetary earth elements and the relative motion of the earth—On the new global dynamics theory of China's tectonics and its reflection and challenge to the theoretical basis of geoscience[C]// *Proceedings of the symposium on the process of plate tectonics in China since the Mesozoic*. Beijing: Geological Society of China, 156–158.
- Yu Yun, Yang Jianfeng, Xia Ye, Sun Ye, Wang Quan, Lü Chengxun. 2021. The concept of geodiversity and its practical value[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(4): 460–466 (in Chinese with English abstract).
- Zalasiewicz J, Williams M, Haywood A, Ellis M. 2011. The Anthropocene: A new epoch of geological time?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369: 835–841.
- Zhai Mingguo, Hu Bo. 2021. Thinking to state security, international competition and nation strategy of mineral resources[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 43(1): 1–11 (in Chinese with English abstract).

- Zhang Guowei, Dong Yunpeng, Zhang Jinjiang, He Dengfa, Guo Anlin, Yao Anping. 2021. Thoughts on the contemporary Earth science and tectonics[J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 51(6): 911–921(in Chinese with English abstract).
- Zhao Pengda. 2019. Characteristics and rational utilization of geological big data[J]. *Earth Science Frontiers*, 26(4): 1–5 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Chenghu, Wang Hua, Wang Chengshan, Hou Zengqian, Zheng Zhiming, Shen Shuzong, Cheng Qiuming, Feng Zhiqiang, Wang Xinbing, Lü Hairong, Fan Junxuan, Hu Xiumian, Hou Mingcai, Zhu Yunqiang. 2021. Geoscience knowledge graph in the big data era[J]. *Science China Earth Sciences*, 51(7): 1070–1079 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Shouwei, Zhu Junlong. 2021. Exploration of ways to helping "Carbon Peak and Neutrality" Strategy[J]. *Natural Gas Industry*, 41(12): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Rixiang, Hou Zengqian, Guo Zhengtang, Wan Bo. 2021. Summary of "the past, present and future of the habitable Earth: Development strategy of Earth science" [J]. *China Science Bulletin*, 66(35): 4485–4490 (in Chinese).
- ### 附中文参考文献
- 2021—2030 地球科学发展战略研究组. 2021. 2021—2030 地球科学发展战略 宜居地球 的过去、现在与未来[M]. 北京: 科学出版社, 1–174.
- 方克定. 2011. 国土资源战略研究的起点和基点[J]. *国土资源情报*, (3): 2–13.
- 傅伯杰. 2020. 联合国可持续发展目标与地理科学的历史任务[J]. *科技导报*, 38(13): 19–24.
- 黄鼎成, 林海, 张志强. 2005. 地球系统科学发展战略研究[M]. 北京: 气象出版社, 1–328.
- 金观平. 2023. 提升产业链供应链韧性和安全水平[N]. *经济日报*, 2023–07–04(001).
- 李廷栋, 刘勇, 王军, 郑洪伟. 2014. 略论地质图件的十大功能——纪念黄汲清先生诞辰 110 周年[J]. *地质论评*, 60(3): 473–485.
- 刘丽军, 陈凌. 2024. 大陆岩石圈与地球深部动力过程的协同演化[J]. *科学通报*, 69(2): 200–214.
- 欧阳自远, 刘建忠, 张福勤, 王世杰, 徐琳. 2002. 行星地球不均一成 因和演化的理论框架初探[J]. *地学前缘*, (3): 23–30.
- 施俊法, 唐金荣, 周平, 郑军卫. 2014. 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*, 33(10): 1465–1472.
- 施俊法. 2020. 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[J]. *地质通报*, 39(12): 2044–2057.
- 施俊法. 2022. 新时代地质工作方略[M]. 北京: 地质出版社, 1–449.
- 谭永杰, 刘荣梅, 朱月琴, 文敏. 2023. 论地质大数据的特点与发展方向[J]. *时空信息学报*, 30(3): 313–320.
- 王安建, 高蕊蕊. 2020. 中国能源与重要矿产资源需求展望[J]. *中国科学院院刊*, 35(3): 338–344.
- 王安建, 王春辉. 2023. 国际动荡局势对我国能源资源安全的挑战与应对策略[J]. *中国科学院院刊*, 38(1): 72–80.
- 王安建, 袁小晶. 2022. 大国竞争背景下的中国战略性关键矿产资源安全思考[J]. *中国科学院院刊*, 37(11): 1550–1559.
- 王帆. 2023. 国际形势特点与走势分析[J]. *国家安全论坛*, 2(1): 82–88, 92–93.
- 邬贺铨. 2013. 大数据时代的机遇与挑战[J]. *求是*, (4): 47–49.
- 肖龙, Greeley Ronald, 曾佐勋, 黄定华. 2008. 比较行星地质学的研究方法、现状和展望[J]. *地质科技情报*, (3): 1–13.
- 肖庆辉, 贾跃明, 刘树臣, 李晓波. 1994. 推进我国地质科学前沿研究的谋划[M]. 北京: 地质出版社, 1–75.
- 谢树成, 罗根明, 朱宗敏. 2024. 地球表层系统对深部圈层时空演变的影响[J]. *科学通报*, 69(2): 149–159.
- 徐义刚, 黄小龙, 王强, 王煜, 李高军, 刘耘, 毛河光, 倪怀玮, 朱茂炎. 2024. 地球宜居性的深部驱动机制[J]. *科学通报*, 69(2): 169–183.
- 杨顺华, 宋效东, 吴华勇, 吴克宁, 张甘霖. 2024. 地球关键带研究评述: 现状与展望[J/OL]. *土壤学报*, 1–14[2024–01–11] <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20230411.1337.012.html>.
- 杨志华, 李勇, 郭俊锋. 2005. 纪念相对论发表 100 周年: 行星地球元素的演化与地球的相对运动——论中国大地构造的新全球动力学理论及其对地学理论立论基础的反思与挑战[C]// 中生代以来中国大陆板块作用过程学术研讨会论文摘要集. 北京: 中国地质学会, 156–158.
- 余韵, 杨建锋, 夏焱, 王泉, 吕承训. 2021. 地质多样性概念及其实践价值[J]. *地质通报*, 40(4): 460–466.
- 翟明国, 胡波. 2021. 矿产资源国家安全、国际争夺与国家战略之思考[J]. *地球科学与环境学报*, 43(1): 1–11.
- 张国伟, 董云鹏, 张进江, 何登发, 郭安林, 姚安平. 2021. 当代地球科学和大地构造学研究发展的几点思考[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 51(6): 911–921.
- 赵鹏大. 2019. 地质大数据特点及其合理开发利用[J]. *地学前缘*, 26(4): 1–5.
- 周成虎, 王华, 王成善, 侯增谦, 郑志明, 沈树忠, 成秋明, 冯志强, 王新兵, 闫海荣, 樊隽轩, 胡修棉, 侯明才, 诸云强. 2021. 大数据时代的地质知识图谱研究[J]. *中国科学: 地球科学*, 51(7): 1070–1079.
- 周守为, 朱军龙. 2021. 助力“碳达峰、碳中和”战略的路径探索[J]. *天然气工业*, 41(12): 1–8.
- 朱日祥, 侯增谦, 郭正堂, 万博. 2021. 宜居地球的过去、现在与未来——地球科学发展战略概要[J]. *科学通报*, 66(35): 4485–4490.