



地质学科未来5~10年发展战略: 趋势与对策

董云鹏^{1*}, 任建国², 张志飞¹, 邓军³, 郭安林¹, 张兴亮¹, 胡修棉⁴, 王强⁵, 李建威⁶, 邱楠生⁷, 孙有斌⁸, 赵国春⁹, 张进江¹⁰, 彭建兵¹¹, 林杨挺¹², 初航², 吕大炜²

1. 西北大学地质学系, 大陆动力学国家重点实验室, 西安 710069;
2. 国家自然科学基金委员会地球科学部, 北京 100085;
3. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
4. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;
5. 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640;
6. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074;
7. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249;
8. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061;
9. 香港大学地球科学系, 香港;
10. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871;
11. 长安大学地质工程与测绘学院, 西安 710054;
12. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

* 联系人, E-mail: dongyp@nwu.edu.cn

当代地球科学的内涵和外延已经拓展到涵盖整个固体地球内部及外部层圈形成演化及与资源能源富集、生态环境变迁、地球宜居性和社会可持续发展相关的地球系统科学问题。随着人类社会经济高速发展, 与地球相关的资源能源、气候环境、地质灾害等问题日益突出。为了适应新时代地球科学发展形势, 在地球系统科学理论框架下, 准确分析我国地球科学未来5~10年的发展趋势、明确战略目标和优先发展领域, 不仅能够大力促进和强化我国地球科学的发展、赶超世界领先水平、早日实现从地质大国到地质强国的转变, 而且对于保障国家矿产能源安全、助推国家经济建设和人类社会可持续发展具有重大意义。鉴于此, 国家自然科学基金委员会(以下简称基金委)大力倡导并专门设立学科战略发展研究项目, 组织相关领域专家学者, 开展了地球科学领域以及各学科方向“十四五”发展战略研究, 通过充分调研论证, 提出了地球科学以及各学科领域发展战略、优先发展领域以及跨学科发展领域。

地质学科作为固体地球科学的传统基础学科, 在地球科学的发展中举足轻重。为了充分研判未来地质学科发展趋势, 相关领域专家学者积极响应基金委号召, 国内主要单位代表150余位专家参与调研论证, 分别召集相关讨论会10余次, 先后有千余人次参与讨论。在系统调研本学科领域国内外研究现状与发展趋势、研判未来5~10年国内外地质学科的发展趋势基础上, 从促进学科发展、培养人才队伍、推动原始创新、服务国家重大需求等方面, 探讨地质学科发展态势, 提



董云鹏 西北大学教授、秦岭研究院执行院长, 大陆动力学国家重点实验室主任, 省部共建大陆构造与动力学协同创新中心主任, 加拿大Western University客座教授。从事构造地质和大地构造学研究, 在中国中央造山系形成演化以及东亚大陆聚合过程研究领域取得了突出成果。

出学科发展目标、战略思路和保障措施, 促进学科的交叉融合和均衡协调发展, 提高我国地质科学的创新水平。

1 地质学科的特点和发展现状

1.1 地质学科的特点与发展需求

地质学科是地球科学的核心组成部分和传统分支学科, 具有独特的学科特点: (1) 研究对象的复杂性——主要聚焦于固体地球内部层圈的物质组成、结构构造、地质作用及其形成演化过程与动力学。随着地球系统科学思想的建立和发展, 地质学日益关注和拓展到研究地球内、外层圈相互作用与协同演化, 以及地球系统整体的物质循环、构造事件、

生命演化、宜居地球的形成过程和机理等; (2) 研究手段独特性——以野外观测和实验、分析和模拟为基础的实证性研究; (3) 数据密集型学科——地质数据不仅具有科学大数据的高维度、高复杂性和高不确定性, 而且具有多元、多维、多源、异构、相关性、混杂性、变异性、随机性、模糊性、时空不均匀性和过程非线性等特点; (4) 多学科集成和边缘学科衍生的庞大学科体系; (5) 基础理论研究和和服务社会的应用研究并举。

上述学科特点以及人类社会发 展所面临的资源、环境、灾害等问题对未来地质学科发展提出了新的需求: (1) 适应地球系统科学发展趋势, 研究领域从固体地球内部圈层拓展到地球所有圈层, 理解各圈层的物理化学过程及圈层相互作用、内外动力对宜居地球形成演化和地球-环境-生命协同演化的影响等; (2) 明确地质过程在地球系统各圈层相互关联中的作用, 研究外部圈层施加于固体地球的反馈效应及其过程; (3) 大数据和数据密集型的学科属性以及我国地质数据的高产态势, 决定了地质学大数据研究范式的有效性和可能性; (4) 开展普适性规律研究, 从局部和区域研究拓展到全球大科学问题的研究, 对创新地球系统科学理论提供支撑; (5) 深入开展基础研究平台和重大科学装置建设, 以及拔尖创新人才培养, 促进学科跨越式发展; (6) 推动应用研究与基础研究的有机结合, 满足国家重大需求, 以国家重大需求和社会发 展为导向, 制定基础理论前沿创新与应用性研究并举的策略, 走出科学殿堂和实验室, 为人类社会可持续发展服务。

1.2 国际地质学发展现状

人类社会进入21世纪以来, 矿产、化石燃料、土地和水等资源能源匮乏, 以及自然灾害和环境恶化等问题日益突出, 加之2020年出现的全球性新冠肺炎疫情, 人类社会可持续发展遭遇空前的威胁。地质学作为与研究人类生存环境和可持续发展密切相关的自然科学, 其发展面临一系列从未有过的重大挑战。针对这一严峻形势, 从学科自身发展和社会责任的角度出发, 地质学必须意识到自身地位的重要性, 在迎接挑战中发现前沿性基础科学问题和重大应用性问题, 承担起解决相关基础和应用科学问题的历史重任。

在国际上, 以美国为代表的西方发达国家先后实施了一系列地学研究计划, 引领并代表了国际地质学的研究现状和前沿态势。主要包括美国国家科学基金会(NSF)、美国科学院及其旗下的研究协会(NRC)和美国地质调查局(USGS)的战略规划提出的未来地球、时域地球等10年远景, 欧洲提出地球生存计划, 欧洲地球科学联合会(EGU)和美国地球物理联合会(AGU)等6个地学学会联合发布了地球科学专门知识应对全球社会挑战的重要性宣言^[1]。过去10年, NSF制定和颁布了《地球科学研究的新机遇》^[2](*New Research Opportunities in the Earth Sciences*)和《时域地球——2020~2030愿景报告》(*A Vision for NSF Earth Sciences 2020–2030: Earth*

in Time)^[3]。此外, 美国科学院研究协会和USGS相关领域的发展报告、地质学学科的基金申请报告也颇具影响, 其中值得提及的有: 2011年出版的《地球起源与演化: 演化中的行星科学问题》(*Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet*)^[4]; 2013年出版的《准备下一代地球科学家: 联邦教育和培训计划的审视》(*Preparing the Next Generation of Earth Scientists: An Examination of Federal Education and Training Programs*)^[5]; 2018年出版的《大地构造学研究的挑战和机遇: 从地质时间到人类时间尺度地球系统与变形及其过程的关系》(*Challenges and Opportunities for Research in Tectonics—Understanding Deformation and the Processes that Link Earth Systems, From Geologic Time to Human Time*)^[6]等。所有上述有关地质学发展规划和报告有一个明显的特点, 即都由两大方面的内容组成: 推荐未来优先研究领域以及实现优先领域研究的手段和途径。

1.2.1 国际地球科学优先发展领域

近10年来, 国际地球科学及其相关学科战略规划建议优先研究的重大科学问题主要包括固体地球、地球系统和服务社会三大领域。以2011年《地球起源与演化: 演化中的行星科学问题》中提出的地球起源、宜居地球等重大科学问题为契机^[4], 2012年在《地球科学研究的新机遇(NROE)》中进一步强调未来新研究机遇将向地球系统科学研究方向的转型, 强调研究对象与海洋、大气、生物科学以及工程、计算机和社会科学的交叉^[2]。它提出的8个研究机遇当中的4个涉及固体地球, 其余为地球系统科学问题, 并首次提出人类世活动对生态环境影响的研究。2018年, 美国地质学界构造学科发布《大地构造学研究的挑战与机遇: 从地质时间到人类时间尺度地球系统与变形及其过程的关系》, 在强调固体地球科学研究的基础上, 提出指导构造地质学未来10年甚至更长时间内研究方向的5个重大挑战: 四维视角认识行星演化、整个岩石圈的流变学变化、从地表到岩石圈底部的断层行为、地表过程与构造地质的相互作用、推进构造地质学和大地构造研究以满足社会需求^[6]。该报告强调固体地球的构造变形是地球系统各圈层相互作用以及地表构造地貌过程的驱动力。2020年, 美国NSF发布《时域地球——2020~2030愿景报告》, 提出了固体地球科学、地球系统和服务人类社会12个优先发展领域^[3]。地球深部动力学成为未来固体地球科学的重大课题, 而地球系统的重大科学问题也由固体地球本身的地质作用为主的研究, 逐步发展到探讨固体地球与其外部圈层的关联和相互作用。同时, 几乎所有的地球科学战略规划都在强调地球科学服务社会的功能, 明确提出地球科学是支持人类社会可持续发展和保障社会文明发展不可或缺的科学基础。

1.2.2 高新技术的引入与研究手段的革新, 地质学教育与人才培养模式创新

国际地球科学界普遍认识到高新技术(分析测试、数据

集成、计算和模拟)和探测设备(高精度实验测试仪器和平台)对于学科发展的重要性,包括探测系统、分析方法、分子技术、计算工具以及生物信息的提取为地球科学发展提供了更多的获取大数据信息的机会^[7]。用新型工具装备起来的地球科学正在转型去探索更加深入的基本科学问题——地球和生命起源、行星构造及其动力学;气候环境变化和生命演化及其与地球内部的联系,以及预测未来地球对人类社会发展的影响。新技术和新仪器的应用使地质学的观测范围从全球尺度的板块构造到纳米尺度的显微构造;不仅可以定量研究微秒时间尺度的岩石瞬间破裂,而且可以确定10亿年时间尺度的造山过程。地质学家可以进入矿物内部分辨单个的原子,测试地球内部重压和高温下的岩石性质;实时监测大陆的漂移、山脉的形成和自然灾害;紧密结合现代生命科学理论和技术发展,揭示生命如何演化并与地球的协同作用过程与机制。同时,深入参与行星科学研究,从陨石和地外提取新的材料和信息,探索行星形成及其内部作用过程与机理。

另外,国际地球科学界日益重视地球科学人才培养问题,积极为未来地球科学研究储备人才。提倡大力培养既懂科学研究又懂测试技术、设备研发的高端人才,同时注意培养数据分析、计算人才以及技术人员等。美国将地质教育分作两部分:学校正规教育和培训计划。前者包括研究型大学的高等教育培养高级人才和学龄前儿童到中学毕业生的基础培育,后者则是针对社会各类人员更新知识和技能所需的培训。

综上所述,地球科学的研究现状和前沿态势表现为:(1)固体地球、地球系统和服务人类社会三部分的研究不仅是过去10年的主题,而且是地球科学未来相当长时间的主旋律;(2)在固体地球领域,深部地球动力学及其相关科学问题不但是当今而且将是未来地质学研究的持续热点;(3)固体地球构造过程与动力学在很大程度上驱动和制约着地球系统多圈层相互作用。因此,以固体地球研究为基础,拓展地球系统多层圈相互作用的多元化研究将是现在和未来的主攻方向;(4)地质学科发展离不开分析探测技术和信息技术的进步,因此软、硬件设施的基础建设非常重要;(5)地学人才的教育培养要从基础教育抓起,提倡大力培养既懂科学研究又懂测试技术、设备的高端人才。

1.3 我国地质学学科发展现状

随着我国国民经济发展和科学技术进步,国家加大了对基础科学研究的投入力度,推动我国地质学学科发展走上了快车道。近10年来,我国地质学在科学研究、服务国家重大需求、人才培养、基础设施建设诸方面都取得了世界瞩目的成就,正在从地质大国向地质强国迈进。

1.3.1 固体地球和地球系统研究并重的格局正在形成

随着国际地学前沿逐渐由大陆动力学研究向地球系统科学研究的转化,基金委适时提出“三深一系统”(深空、深海、深地、地球系统科学)的战略布局,以及“四梁八柱”的科

学构思。目前我国地质学已基本形成固体地球与地球系统研究并重的局面,从大的研究格局上已经与国际前沿接轨^[8,9]。2014年,《国家自然科学基金“十三五”地球科学战略研究报告》中提出的2020年有望突破的地质学5个领域中,3个是固体地球研究领域,2个属于地球系统研究领域,清晰表明我国地质学研究在坚守固体地球科学研究的同时,已经开始向地球系统研究转变^[10]。2017年《板块构造与大陆动力学》学科发展战略,不仅聚焦于地质学构造领域未来研究规划,而且特别强调“构造与环境协同演化”,提出了3个属于地球系统研究范畴的重大科学挑战,主张岩石圈地质构造与地球系统其他圈层的紧密关联以及在多圈层相互作用过程中的重要地位^[11]。2020年出版的《大陆成矿学》学科发展战略不仅聚焦学科前沿、交叉方向和新的生长点,而且提出了矿床学人才与技术平台建设的建议^[12]。2021年出版的《2021–2030地球科学发展战略:宜居地球的过去、现在和未来》,从深地、深海、深空、地球系统和科研政策方面,指出掌握地球作用人类的发展规律,指导人类生存活动、进而实现可持续发展是地球科学研究未来面临的重要科学命题,阐述了地球宜居性的科学内涵、规律及前沿研究目标^[1]。2022年出版的《2021~2035深地科学前沿科学问题战略研究》系统梳理了国内外深地科学研究领域的发展历程,揭示了深地研究的多尺度特色和强系统性,明确了深地科学研究在现代地球科学和地球系统科学中的核心地位,分析了该领域的两大发展趋势(新技术新方法和多学科交叉融合),提出了深地科学前沿的十大科学问题和一个引领性技术支撑体系^[13]。

近十年来,基金委资助了一系列重大研究计划,诸如华北克拉通破坏、地球深部动力学过程、特提斯地球动力系统、西太平洋地球系统多圈层相互作用、水圈微生物驱动地球元素循环的机制等,体现了“深地、深海、深空和地球系统”的科学思路和发展态势。同时,地质学研究在面向国家重大需求和服务于国民经济主战场方面的参与度愈来愈高。正在开展的与地质学相关的重大研究计划“战略性关键金属超常富集成矿动力学”,及重大项目“黄土高原重大工程灾变机理与防控”、“高原峡谷区内外动力耦合致灾机理”、“川藏铁路深埋超长隧道工程灾变机制及防控方法”、“川藏铁路重大灾害风险识别与预警”和新近启动的“黄河专项”等,都反映了在面向国家重大需求和国民经济主战场的前提下,地质学践行重大基础研究和应用性研究导向的科研战略^[14–18]。

目前,围绕宜居地球形成演化的核心科学问题,国家自然科学基金委地球科学部作出了“四梁八柱”、“三深一系统”的顶层设计^[19,20]。这一顶层设计涉及一系列重大前沿科学问题。例如,通过地球深部过程的探索理解地球运行的驱动机制,研究壳幔物质循环发现地球物质的运动规律,研究圈层相互作用理解宜居地球的时空演变以及整合圈层动力过程——模拟和预测地球未来变化。同时,这一设计又与服务于国家重大需求和国民经济主战场的历史重任紧密相关。

1.3.2 地质学学科人才培养势头良好

近年来,我国地球科学研究的蓬勃发展催生了人才培养的良好势头,为地质科学研究队伍源源不断地注入了新鲜血液。在地质人才培养方面,已建成完善的、高质量的本科-硕士-博土地质教育体系,全国有20多所院校开设地质学专业。在高端人才培养方面,基金委、科学技术部、教育部、自然资源部和中国科学院等部门均制定了激励人才成长的有效机制和政策,培育大量的高层次人才,学科领域的创新研究团队建设正在高质量加速发展。2015~2020年期间,国家自然科学基金委地球科学部遴选资助了26个创新研究群体,地球科学部优秀青年科学基金获得者235人、国家杰出青年科学基金获得者127人,其中地质学科的优秀青年科学基金获得者38人、国家杰出青年科学基金获得者24人;地质学科有13名科学家当选中国科学院和中国工程院院士。

1.3.3 基础设施建设发展迅速

目前,我国地质学学科相关的国家重点实验室有44个,装备着世界一流的仪器设备,为地球物质组成、岩石矿物结构和同位素年代学的测试分析及实验模拟提供了强有力的支撑。部分实验室分析测试水平已经跻身国际先进行列,有些技术已经领先国际同类实验室。国际一流的实验设备和高水平的测试技术为我国地质学学科继往开来、深化固体地球科学研究和全面开展地球系统科学研究创造了良好的条件。

2 地质学学科“十四五”发展目标

我国地质学发展的良好态势为“十四五”可持续发展奠定了坚实基础。“十四五”地质学科发展目标将从地球系统研究国际前沿重大科学问题和国家重大需求出发,在“三深一系统”研究战略的引领下,聚焦固体地球及其与地球系统其他圈层相互关联的交叉学科重大科学问题,在以下六方面着力推进、达成主要发展目标。

(1) 遵循“三深一系统”战略方针,聚焦地球系统,继续大力调整和凝聚地质学的研究方向,早日实现针对地球系统研究的“大地学”学科理念,实现科研团队组织模式和地质学教育专业的重新调整。争取未来5~10年在分支学科之间及其与外部学科边缘交叉,催生新的学科生长点和新的跨学科方向。

(2) 继续深入推进地质学科面向“深地、深海、深空和地球系统”的理念革新,改变地质学研究思维方式,扩大研究时空尺度,从研究区域地质问题扩展至探讨整个地球的深地、深海、深空以及地球系统科学问题,从传统地质学基础研究转向地球系统多圈层相互作用及其协同演化,从中低层次的基础研究提升至具普遍意义的理论概括和原始创新高度。未来5~10年,争取取得一批立足于地质学的地球系统科学重大原创理论。

(3) 加强宜居地球形成演化与全球变化研究,促进人类社会可持续发展;强化服务国家重大战略需求和面向国民经济

主战场的意识,作到服务国家战略需求和基础理论创新并举。在服务于国家战略需求中凝练重大地质学科研究课题,并进而为国家战略需求服务。继续提升地质学科服务国家经济建设的能力,在石油、矿床、水文、工程地质等传统领域继续发挥重要作用,同时积极参与国家碳中和的战略。在未来的5~10年,力争在二氧化碳地质封存领域提供地质学科智慧,服务碳达峰、碳中和的国家目标。

(4) 强化地质学创新发展的国际合作。以重大科学问题为导向,采取开放式的创新发展模式,广泛开展高水平国际合作,在合作中学习新观念、新思维和新方法。未来的5~10年,推动中国地质学家从区域地质走向全球地质,参与国际学术竞争,不断提升国际影响力。

(5) 加强实验测试平台、技术和大数据平台等基础设施建设。进一步优化提升地质学科国家重点实验室科学方向、运行机制体制和测试水平,围绕“三深一系统”战略方针,立足满足国家重大战略需求,完成国家重点实验室优化整合,建成地质学科国家基础学科研究中心,增强服务科学研究和满足国家需求的能力,培育更多的创新研究群体。基于国家重点实验室大数据平台基础,充分利用过去十余年海量爆发的地学大数据,争取在“十四五”期间建成全国地质学科大数据共享平台。

(6) 适应地质学学科发展的新趋势,积极培养一批既能从事基础理论创新、又能服务国家重大需求的复合型创新人才。“十四五”期间积极开展对地质学本科教育的改革,调整学科组织架构,革新教学内容;同时,推动青年学者积极参与地球系统科学研究工作,在实践中培养高层次青年人才。

3 需要前瞻部署、可能产生重要突破的主要学科领域方向

随着新的科学思维发展以及基金委“三深一系统”方针的指引,我国地质学研究将会进入一个新时代。地质学研究对象将不断向深地、深海、深空和地球系统科学的转变,越来越多的新观念、新思维和新方法异军突起。与此同时,潜在的、孕育未来重大突破的学科领域已经崭露头角,需要做好前瞻性的思想意识、理论知识和技术方法的准备。为此,亟待前瞻性部署的主要学科领域方向和科学问题主要包括如下内容。

(1) 构造地质学和大地构造学是地质学的纲领性学科。构造运动在地球系统多圈层相互作用中的角色历来是地球科学的重大核心科学问题。板块构造和地幔柱构造主导的各种地球动力学过程诱发地球各圈层内部及圈层之间相互作用。以板块构造为代表的构造运动在多圈层相互作用起着何种作用、如何起作用、何时开始起作用?在地质-环境-生命相互关联和宜居地球的形成过程中,构造如何起着主导作用?这些都是构造地质学和大地构造学面临的重大课题。同时,大陆流变学日益受到国际地球科学界的关注和重视,使用流

变学理论定量研究大陆岩石圈复杂的变形历史和变形机制,将地质-地球物理观测、流变学实验、动力学模拟相结合,利用中国地域优势,研究造山带和陆内变形带的流变学结构和构造演化,可以为完善、超越板块构造理论提供新的契机。

(2) 矿物学和岩石学是地质学科的关键基础学科。高温高压实验、地球化学和同位素年代学研究成果和技术手段的飞速发展,为矿物学和岩石学研究奠定了坚实的理论支撑和技术保障。未来可预见的突破有:矿物的形成、演化与资源环境效应,板缘造山作用的矿物学与岩石学约束,大陆生长、演化与深部过程的矿物岩石学记录,层圈作用、地球宜居性与地球系统科学的矿物学和岩石学表征。

(3) 沉积学与地层学是地质学的重要支撑学科。有望突破的学科方向为年代地层系统、表生物循环时空演化。年代地层系统要加强前寒武系的研究,完善古生代-中生代海相地层断代工作和明确中生代-新生代陆相地层建阶方案,促进中国地层学研究发挥全球引领作用。表生物循环时空演化着重于研究沉积物的产生与控制机制、源-汇过程和沉积盆地动力系统,从地质演化和全球视角认识沉积物质循环对重大地质事件的响应和反馈,理解成矿物质的迁移和富集规律,为圈定沉积矿产资源能源的时空分布提供依据。

(4) 古生物学和生物地质学是研究地球-生命系统形成与演化的核心学科。古生物学和生物地质学是目前我国地质学学科中具有较大国际影响力的学科,有望继续获得重大科学发现。需要进一步前瞻性部署的重大科学问题主要有:主要生物类群的起源及其重大生命演化事件、地质历史时期和现今的地质微生物过程和生物地球化学循环;全方位多维度揭示化石的时空分布规律及其形成演化过程,不断拓展与其他学科的交叉,引领科学前沿,在生命演化过程的内外因驱动机制、宜居地球的阶段性演化规律等优先领域形成重大的理论创新。

(5) 第四纪地质学是研究宜居地球形成和演化的关键学科。新生代是全球构造活跃、气候剧变和现今宜居地球气候环境格局形成的关键时期,而距今最近的第四纪以气候大幅波动和人类出现为特征,是衔接宜居地球过去、现在和未来的关键时段。研究新生代构造-气候相互作用和季风-干旱环境分异演化,是查明宜居地球形成与人类演化的重要前提。新生代海-陆-气多圈层相互作用下季风-西风协同变化及其环境效应是未来需要重点关注的研究方向。未来研究应聚焦新生代多圈层相互作用及其气候环境效应、第四纪多尺度气候变化及其如何影响人类演化与适应、人与自然的互馈与和谐发展等前沿科学问题,前瞻性部署气候环境变化与人类演化适应重大课题,系统研究新生代地球气候环境系统变化规律、机理及其对人类演化的影响,为未来气候变化预测和应对全球变化提供科技支撑。

(6) 水文和工程地质学是城市地下水资源和地下空间可持续利用与安全的保障。随着我国城镇建设的推进以及经济

社会的可持续发展问题的日益突出,水文地质和工程地质学科的角色越来越重要。未来发展的重点包括城市地下水、地热资源可持续利用与安全保障机理、城市地下空间开发的地质基础研究。前者面向城市地下水资源的可持续利用这一人类重大需求,后者旨在查明城市地下空间资源,揭示地下开挖与地质环境之间的作用机理,实现全生命周期信息化管理,对提升我国城市地下空间利用水平具有重要意义。

(7) 矿床学、石油与天然气地质学是国家矿产能源安全的科学保障。矿床学未来有望取得重大突破的研究方向主要有:地球核-幔-壳分异及相互作用对大型-超大型矿床的控制,地质流体起源和演化,成矿过程的定量刻画,深部矿成矿理论与勘查技术方法,关键金属矿产的富集机理、成矿规律、探测技术与高效利用,信息化找矿勘查模型等。石油和天然气地质学方向是与国家安全、经济建设最为密切相关的方向,也是地质学服务国家重大战略需求的重要领域。需要进行前瞻性部署主要方向有:海相深层-超深层和古老层系油气资源形成机理,非常规油气形成、富集与保存机理,油气-金属矿床共生和富集机制。

4 优先发展领域

科学判断和精准确立优先发展领域在一定意义上关系到未来我国地质学的发展方向和发展质量。为此,我们必须首先确保优先领域遴选指导思想的正确性和遴选原则以及遴选过程的合理性。遴选优先领域的指导思想:从国家战略需求和世界科技前沿高度出发,以满足国家重大需求和我国经济发展以及有利于推动我国地质学基础研究取得重大突破的重大基础科学问题为导向;注重中国特殊地质问题与全球性地质问题相结合;注重有利于促进我国已有研究基础的重大地质科学问题的未来发展;注重有利于揭示地球系统多圈层相互作用过程中固体地球圈层(构造)作用。遴选过程具体包括:多渠道广泛征集和听取工作在地质学科研教第一线国内外专家学者的意见,收集参阅近年国内外地质学发展相关战略报告、项目申报报告、国内外地质学相关会议议题,充分开展不同层面的交流、讨论、论证和评审等。围绕优先发展领域,开展关键科学问题和重大应用问题的深化、集成研究,产出系统化的创新成果。

(1) 地球关键金属元素的分布和循环。关键金属(指稀土、稀有、稀散和稀贵金属)是支撑航空航天、电子信息、高端制造、新能源、新材料等重点领域发展的重要物质基础,不仅对国家经济社会发展和国防安全十分关键,而且成为工业4.0时代全球经济发展和先进制造业的重要战略资源。关键金属矿产在全球范围内分布极度不均匀,其形成和分布受制于元素在地球不同圈层之间的循环和演化过程。关键金属元素在地球圈层相互作用过程中的迁移、转化、富集和成矿作用机制及资源分布规律已成为国际地球科学的热点问题和前沿领域,其中关键的科学问题包括:地球关键金属

元素的三维分布特征、板块构造和地幔柱在关键金属元素循环和分布中的全球尺度效应、壳幔物质交换中的关键金属元素循环、地表作用中的关键金属元素循环和分布、地球内部各种地质作用(岩浆作用、变质作用、热液活动等)过程中关键金属元素的运移和富集。

(2) 大陆形成演化与板块构造的起始。大陆和板块构造是行星地球独有的地质特征,是宜居地球形成的最重要物质和构造基础。主要的科学问题包括:大陆形成过程与构造机制、大陆物质来源、板块构造产生的构造背景、板块构造出现的时间的标志、板块构造在地球上产生的必要条件、板块构造发生的过程、板块构造启动的机制、板块构造与早期大陆的关系、与类地行星的地质构造对比及其启示等。

(3) 俯冲带壳幔相互作用的矿物学和岩石学过程。板块俯冲引发的深部物质循环过程是地球内部的一级运行机制,是国际地球科学研究的重要前沿。俯冲带壳幔相互作用是一个复杂的物理化学过程,涉及俯冲带变质作用、交代作用、岩浆作用等一系列地质过程。这些过程发生的机制和方式与汇聚板块边界的地质结构、物质组成、热状态、俯冲速率、俯冲角度等因素密切相关。科学问题是将俯冲带变质、交代和岩浆作用有机地结合起来,通过矿物学与岩石学、地球化学等多学科研究与现代原位微区分析技术、实验研究、数值模拟等手段相结合,查明俯冲带地质作用过程,揭示各种元素在地球内部的迁移过程、机制及其环境和资源效应,深入理解俯冲带壳幔相互作用的控制因素、化学地球动力学机制和过程。

(4) 地球深部过程与动力学。地球深部过程是固体地球内部和浅层构造变动和物质循环的动力源,构成了控制地球系统各圈层相互作用的第一驱动,是宜居地球环境和构造-生物协同演化的关键。因此,亟待在地、深海、深空和地球系统科学战略引领下,深入研究地球深部过程与动力学,探讨多圈层相互作用过程及其动力学机制。主要科学问题有:固体地球圈层形成与演化、地球历史中构造体制转换的原因和机理、固体地球各圈层的性状与物质循环、固体地球各圈层的相互作用和互馈机制、地球深部结构和动力学机制、构造体制转换的原因和机理、板块构造和地幔柱的形成条件和动因、地球深部流体和挥发分的构造作用等。

(5) 深部过程与浅表系统互馈及宜居地球环境。深部构造与浅表系统(包含水圈、大气圈和生物圈)构成相互作用的动态耦合体系。深部构造控制和驱动浅表构造地貌过程,构造地貌演化影响着气候环境变化,进而控制着大气、水和生物资源的发展变化。而水圈、大气圈、生物圈又反作用于地表过程,并且通过沉积加载和侵蚀卸载等影响地球内部的应力状态,借助重力均衡来调整深部物质垂向和侧向的运动,参与固体地球构造过程。深部构造与浅表系统的耦合作用过程对区域和全球气候、生态环境和生物演化产生重要影响并

营造宜居地球环境。关键科学问题主要有深部构造对于浅表系统控制、浅表系统的反馈作用、深部构造与浅表系统的耦合过程及宜居地球环境的形成。

(6) 地球圈层相互作用与特提斯构造域盆山体系动力学及资源环境效应。新生代印度-欧亚板块的陆陆碰撞及持续的汇聚造就了特提斯构造域青藏高原及环青藏高原盆山体系。该盆山体系不仅是研究特提斯构造动力学、盆-山耦合关系、活动构造和地震、构造-地貌-环境协同演化的最佳天然实验室,也是我国最大的天然气勘探区和战略接替区。因此,以特提斯构造演化为核心,以青藏高原及环青藏高原盆山体系为研究对象,开展构造-地貌-环境协同演变研究,探讨特提斯构造演化过程中的盆山体系结构与地球动力学、成盆过程与大型气田富集机理。该研究不仅有望实现地质学基础理论创新,而且能为保障国家能源安全和重大工程建设提供理论支撑。科学问题主要包括:特提斯构造演化过程中的盆山体系结构与地球动力学、区域活动构造与地震灾害、高原隆升引发的构造-地貌-气候-环境的协同演变、高原内部及环青藏高原盆山体系成盆过程与大型油气田富集机理。

(7) 生命之树重建与地球宜居性的演化。地球是已知在太阳系中唯一支持生命存在的星球,壮阔的生命现象是宜居地球最为显著的特点,生命的起源、演化及其与地球无机环境之间的关系是永恒的科学命题。生命之树是达尔文进化理论的核心思想之一,即地球上的所有生物都起源于一个共同祖先,它们之间的演化关系可以用一棵树的形式表达。生命自40亿年前起源以来,对地球宜居性的演化产生了巨大影响,改变了地球表层的物质循环。因此,未来优先发展领域拟围绕生命之树重建与地球宜居性的演化这一重大科学前沿方向,依托我国丰富而优越的古生物资源、人才队伍和综合实力,利用新技术手段、大数据和模拟方法,揭示生物各类群的起源、演化过程及其对地表环境的影响,研究生命在重大地质、环境、气候事件中的响应过程,探索宜居地球的形成和演化。科学问题主要包括:主要生物类群的起源和演化、生命宏观演化过程、重大生物演化事件的发生过程和原因、生物与地球表层系统的互馈作用过程与机理、宜居地球环境的演变过程等。

(8) 新生代多圈层相互作用下的多尺度气候环境变化动力学。中国大陆具有独特复杂的地貌和气候特征,是研究地球多圈层相互作用下多尺度气候环境变化动力学的最佳区域之一。未来优先发展领域为新生代多圈层多尺度气候环境变化动力学,通过全球变化和地球系统科学的深度融合,扩大研究范围、提高时空分辨率、实现气候要素定量化、区分人与自然因素的不同贡献,发挥多种地质生物载体的集成优势,以多时空尺度气候变化动力学为主线,查明新生代百万年至季节尺度气候变化的特征和机理,提出地球气候环境系统变化新理论,预估未来气候变化趋势及环境影响,为适应和应对全球变化提供科技支撑。该领域应关注以下关键科

学问题:不同时间尺度季风-西风的演化规律和影响、海-陆-气相互作用对西风-季风气候时空变异的调控、极端气候环境事件的规律和机理、人与自然相互作用的规律和趋势。

(9) 沉积物质的产生、发展与演变,以及高分辨率年代地层系统。以动态变化的理念研究沉积物的风化、侵蚀、搬运、沉积过程是沉积学研究永恒的主题。主要科学问题包括:陆源碎屑物质产生与发展的决定因素与通量、异常富集的沉积金属元素的控制因素与机理、沉积作用是如何控制沉积物由陆到海(湖)的剥蚀-搬运-堆积(源汇)过程、沉积作用和沉积特征之间的响应关系和控制机制、从时间尺度如何定量恢复沉积物质的通量并探讨沉积物质随时间演变的规律。同时,高分辨率综合年代地层系统是沉积学的关键。未来将以生物地层相对年代格架为基础,综合化学地层、磁性地层、旋回地层、事件地层等信息,依靠同位素年代地层学赋予的绝对年龄,建立可在区域和全球识别与对比的年代地层框架。其关键在于古生物化石分类体系的完善和量化以及高精度放射性同位素年龄和“地时”研究计划和化学地层的综合应用等。

(10) 地球动力学过程与成矿机制。板块构造和地幔柱构造主导的各种地球动力学过程诱发地球各圈层内部及其之间的构造-岩浆-变质-流体活动,促进金属元素、挥发分和络阴离子的循环、迁移、分配、富集和沉淀,最终在大陆浅部和大洋深处形成丰富多样的矿产资源。地球动力学过程与成矿机制优先发展领域主要包括:研究各类地球动力学过程有关的成矿作用特征,阐明壳幔相互作用对物质-能量交换及成矿物质聚散的控制,揭示发现大型-超大型矿床的形成条件与时空分布规律。主要科学问题包括:板块边界成矿动力学、大陆碰撞成矿作用、陆内成矿及其动力学机制、地幔柱成矿作用、层圈相互作用与金属元素壳-幔循环、克拉通岩石圈改造与巨量金属成矿、盆地动力学与成矿作用时空演化、现代海底热液活动与多金属硫化物及富钴结壳的成因机制、地球关键带地质-生物过程与表生成矿、构造控制的流体过程及其资源能源效应。

(11) 常规油气-致密油气-页岩油气-煤系气序列成藏以及煤矿富集机制。含油气盆地受不同的构造沉积与油气系统演化过程的控制作用,形成常规油气-致密油气-页岩油气-煤系气的序列成藏特征,油气藏类型从常规油气到致密油气,再到页岩油气,其控制因素包括埋深(成岩作用)、沉积相与岩相、储层类型、裂缝发育程度等。亟待发展和完善“常规-非常规油气序列成藏”理论。需要重点关注的科学问题有:深层-超深层系油气资源形成机理、致密油气-页岩油气形成富集与保存机理、煤系气成藏与产出的动力学机制。其中,探索深层页岩气的赋存与富集机理,揭示其主控因素,将为开辟页岩气资源接替阵地提供科学依据。煤炭在一定的时期内仍然是我国最主要的一次能源,煤中显微组分和矿物质决定了煤炭的利用效率和洁净利用程度。关键科学问题包括不同

聚煤环境下显微组分的来源和形成机理、煤中有机质和无机质相互作用、煤中战略性关键金属赋存状态和成矿机理。

(12) “一带一路”重大水文地质和工程地质、城市地下空间利用。地下水与生态系统相互作用的关键机理是“一带一路”水文地质和工程地质的基础。以地下水的生态功能为核心,优先发展生态水文地质学的理论与方法,建立定量分析评价地下水与生态系统相互作用的多尺度、多过程耦合模型。主要研究方向包括:地下水影响湿地和陆地植被生态的关键机理研究、地下水-地表水相互作用及其生态效应的量化理论和方法、岩溶含水层的生态水文地质特性。同时,“一带一路”沿线工程的安全建设与运营,亟须加强水文地质和工程地质问题的孕育与演化规律研究,并实现风险防控。关键科学问题包括:活动构造与气候变化下水文地质工程地质演变规律、高原隆升-河谷深切-岸坡卸荷-岩体损伤耦合过程与规律、“一带一路”沿线工程岩土体的分布规律与典型水文地质工程地质问题防控技术。另外,城市地下空间开发、地下水资源可持续利用与安全保障机理,对提升我国城市地下空间利用水平具有重要意义。

(13) 月球-火星的物质组成、结构、演化及行星宜居性。行星地质学优先聚焦月球和火星的重要科学问题,部署小天体形成与类地行星初始物质组成研究,同时兼顾冰卫星、地外海洋及地外生命的探测。优先研究方向和科学问题包括:月球深部物质组成和结构及其对地-月系统形成的约束,科学问题为月球岩浆活动和热演化史、完整的月球撞击历史、月球水和挥发分的分布和来源、月球内部物质组成、月球内部结构;火星的宜居环境及其演化,科学问题为火星的岩浆活动历史、现代火星水和其他挥发分的分布、火星的古环境及其演化、火星的撞击历史及影响、火星的磁场及粒子逃逸机制、火星多圈层的相互作用机制;小天体的形成与类地行星初始物质组成;卫星、地外海洋与生命探测。

5 国际合作优先领域

地质学研究的国际合作是催生重大地质成果、创新地质学理论、推进我国地质学科跻身国际前沿和成为地质强国的必由之路。在已有的国际合作基础上,未来将聚焦国际地质学前沿领域、面向“一带一路”国家倡议,以重大科学前沿问题和国家需求为导向,围绕关键学科领域,与国际上具有优势的国家和地区开展国际合作研究。

(1) 围绕活动地块边界带的动力学过程研究,与中亚、东南亚国家合作,解读活动地块对边界断裂强震活动的控制作用、陆内非稳态变形与孕震机制、活动地块演化与构造继承性科学问题,探讨活动地块边界带的动力学过程与强震发生机理,为重大工程的规划实施和防震减灾提供理论依据。

(2) 深化“特提斯动力学系统及资源效应”研究,特提斯构造域与“一带一路”沿线国家所在区域高度一致,在基金委启动

的“特提斯地球动力系统”重大科学计划基础上,面向国家重大需求和国际地学前沿,持续推动“一带一路”沿线国家国际合作研究。(3) 瞄准大洋岩石圈演化与地球动力学科学问题,通过国际合作与交流(包括参与海上航次),获取不同类型样品和地质资料,揭示大洋岩石圈组成、结构、演化及其深部动力学机制,探索有关初始洋壳的组成与形成机制、大洋板块起始俯冲的物质循环与机制、大洋板块俯冲过程中的元素地球化学行为、大地幔楔的形成与壳幔相互作用、板块俯冲与陆壳和化学地幔柱起源等核心科学问题。(4) 推动关键地质时期的古气候、古海洋演化国际合作研究,在全球地层精确对比的基础上,从全球视角认识气候、海洋的演变,进而更好地理解其时空变化趋势和控制机制;同时,古气候、古海洋的研究需要开展大量的分析测试和模型模拟等工作。(5) 围绕第四纪气候环境变化规律、机理及影响,与欧美国家合作开展亚欧大陆、太平洋和北美大陆北半球纬向气候环境对比、穿越地球环境时空变化研究和深地环境-生物协同演化计划。(6) 与具有地层和古生物资源优势的国家合作,共同探索研究地质历史时期重大生命演化事件的过程和机制、生物矿化作用的机制和演化历史以及特异埋藏生物群的保存机制等。(7) 开展关键成矿带与典型矿床成矿机制和成矿规律的国际合作研究,通过与中亚造山带、特提斯造山带和环太平洋造山带相关国家的合作研究,联合欧美和澳大利亚的顶尖学者,围绕我国重要矿床和成矿带开展合作研究,进而开展跨国相邻成矿带成矿机制与综合对比研究,满足“一带一路”倡议需求。(8) 推进深层-超深层油气形成与富集机制国际合作,解决我国深层-超深层盆地油气地质基础和进一步的高效开采利用问题。

6 跨学部优先发展领域研究

跨学部的交叉研究是催生重大科技前沿、产出原创理论成果的重要途径,优先发展领域包括:(1) 与生命科学领域的演化发育生物学、微生物学等学科交叉融合,开展地质历史时期生命演化事件的分子遗传基础和极端环境下的生命现象研究,探索依托地质学或生物学单一学科无法解决的重大科学问题。(2) 从地球系统科学的角度出发,将第四纪地质学、火山地质学、地热地质学与环境生物学和考古学等学科交叉,开展气候环境与生物协同演化及资源环境效应、全球变化的内热驱动机制等领域研究。(3) 随着大数据时代的来临,大数据科学与技术正在引发地球科学领域的深刻革命,

亟待开展地质学与数学、计算机和信息科学等跨学部交叉融合,优先开展深时数字地球、面向大数据的古地理与古环境演变,以及智能勘查学领域研究。(4) 针对地球圈层耦合问题,将地质学与数学、计算科学、地理学、物理学、材料科学相结合,应用大数据、人工智能、可视化、高温高压实验、高性能计算等新技术,开展多尺度变形的动力学模拟与实验,重建多尺度、高分辨率的地球圈层三维结构和动力学演化过程。(5) 矿床学与材料科学的交叉融合,利用纳米材料的技术和方法刻画矿石矿物、蚀变矿物和副矿物在纳米尺度的结构和谱学特征,从纳米尺度揭示元素扩散迁移、矿物生长机制和流体交代作用。结合微区原位的矿物化学和同位素组成分析,查明成矿演化,示踪成矿流体,为认识矿床成因提供重要信息和全新视角。进一步融合纳米材料合成技术与成岩成矿实验思路,开展矿石矿物生长和各种矿物结构的合成,揭示纳米尺度的成藏成矿过程和机理,拓展纳米技术在隐伏矿床探测方法等方面的应用。(6) 用石油天然气和煤地质学与环境科学和化学学科交叉融合,开展石油天然气和煤炭生产应用过程中的环境影响研究,推进能源的多元化发展,提高油田的采收率与环境保护。

7 学科发展保障措施

为了促进地质学科快速发展,建议落实以下保障措施:(1) 加大解决前沿科学问题和国家重大需求项目资助力度,促进优势学科的发展;(2) 鼓励和支持非共识方向和交叉学科领域项目,加大对跨学科研究的资助力度;(3) 关注和扶持不可或缺、但薄弱和濒危方向,促进学科均衡协调发展;(4) 加强对基础平台、研究基地和系统建设的资助力度,强化重大科学仪器研制和关键技术的研发能力;(5) 建立空间对地观测网络、地面监测网络、地球深部探测网络,适应广覆盖、大尺度、长时序、全实时的科学数据需求;(6) 加大力度资助人才培养与国际合作项目,促进领军人才的成长和人才队伍的建设;(7) 积极开发大数据和人工智能等新技术的地质应用和共享平台,促进学科资源共享;(8) 创新地质学科教育和人才培养模式,培育能够胜任地球系统科学大数据分析、计算机学习和数值模拟的复合型人才;(9) 大力开展地质学科普及活动,组织和创建更多的电子期刊,提高广大少年儿童和普通百姓的地球科学知识水平,为人才培养作更为广泛的社会铺垫;(10) 设立地球科学全国研究生暑期学校公益项目。

致谢 调研工作主要由10位科学家担任相关方向召集人,组织国内相关单位和领域代表150余人参加调查研究和10余次的学术研讨,撰写了《国家自然科学基金地质学科“十四五”战略规划》,并由国家自然科学基金委员会地质学科处组织专家组评审验收通过。本文是基于该战略调研报告凝练而成,特向相关单位和专家学者致以衷心感谢。感谢国家自然科学基金委员会“地质学科发展战略研究”项目(42042006)资助。

推荐阅读文献

- 1 Research Group of Development Strategy of Earth Science from 2021 to 2030. The Past, Present and Future of the Habitable Earth: Development Strategy of Earth Science from 2021 to 2030 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2021. 1–174 [2021–2030地球科学发展战略研究组. 2021–2030地球科学发展战略: 宜居地球过去、现在与未来. 北京: 科学出版社, 2021. 1–174]
- 2 National Science Foundation (USA), National Research Council. New Research Opportunities in the Earth Sciences. Washington DC: The National Academies Press, 2012. 1–132
- 3 National Science Foundation (USA), National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. A Vision for NSF Earth Sciences 2020–2030: Earth in Time. Washington DC: The National Academies Press, 2020. 1–172
- 4 National Research Council (USA), Committee on Grand Research Questions in the Solid-Earth Sciences. Origin and Evolution of Earth: Research Questions for a Changing Planet. Washington DC: The National Academies Press, 2011. 1–152
- 5 National Research Council (USA), Committee on Trends and Opportunities in Federal Earth Science Education and Workforce Development, Board on Earth Sciences and Resources, Division on Earth and Life Studies. Preparing the Next Generation of Earth Scientists: An Examination of Federal Education and Training Programs. Washington DC: The National Academies Press, 2013. 1–120
- 6 Huntington K W, Klepeis K A, Allmendinger R, et al. Challenges and Opportunities for Research in Tectonics: Understanding Deformation and the Processes that Link Earth Systems, from Geologic Time to Human Time. A Community Vision Document Submitted to the U.S. National Science Foundation. Seattle: University of Washington, 2018. 1–84
- 7 Zhai M G, Yang S F, Chen N H, et al. Big data epoch: Challenges and opportunities for geology (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2018, 33: 825–831 [翟明国, 杨树锋, 陈宁华, 等. 大数据时代: 地质学的挑战与机遇. 中国科学院院刊, 2018, 33: 825–831]
- 8 National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Discipline Development Strategy in the Next 10 Years: Earth Sciences (in Chinese). Beijing: Science Press, 2012. 1–297 [国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 未来10年中国学科发展战略: 地球科学. 北京: 科学出版社, 2012. 1–297]
- 9 Research Group of Resource and Environmental Sciences Strategy. Strategic Research Report on Resource and Environmental Science—The “13th Five-Year Plan” Strategy Research of the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). 2014 [资源与环境科学战略研究组. 资源与环境科学战略研究报告——国家自然科学基金委员会“十三五”规划战略研究. 2014]
- 10 National Natural Science Foundation of China. Strategic Research Report on Earth Science—The “13th Five-Year Plan” Strategy Research of the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). 2014. 1–179 [国家自然科学基金委员会. 国家自然科学基金“十三五”规划战略研究地球科学战略研究报告. 2014. 1–179]
- 11 National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Discipline Development Strategy: Plate Tectonics and Continental Dynamics (in Chinese). Beijing: Science Press, 2017. 1–396 [国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略: 板块构造与大陆动力学. 北京: 科学出版社, 2017. 1–396]
- 12 National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. China's Discipline Development Strategy: Continental Metallogeny (in Chinese). Beijing: Science Press, 2020. 1–439 [国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 中国学科发展战略: 大陆成矿学. 北京: 科学出版社, 2020. 1–439]
- 13 National Natural Science Foundation of China, Chinese Academy of Sciences. Strategic Research on Frontier Scientific Issues in Deep Earth Science from 2021 to 2035 (in Chinese). Beijing: Science Press, 2022 [国家自然科学基金委员会, 中国科学院. 2021–2035深地科学前沿科学问题战略研究. 北京: 科学出版社, 2022]
- 14 Yao Y P, Xiong J H, Gu S Z, et al. An introduction of the projects administrated by the Division of Geology, Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China in 2015 (in Chinese). Adv Earth Sci, 2015, 30: 1339–1342 [姚玉鹏, 熊巨华, 顾松竹, 等. 2015年度地质学科项目受理与资助分析. 地球科学进展, 2015, 30: 1339–1342]
- 15 Yao Y P, Xiong J H, Gu S Z, et al. An introduction of the projects administrated by the Division of Geology, Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China in 2016 (in Chinese). Adv Earth Sci, 2016, 31: 1267–1270 [姚玉鹏, 熊巨华, 顾松竹, 等. 2016年度地质科学领域工作报告. 地球科学进展, 2016, 31: 1267–1270]
- 16 Yao Y P, Xiong J H, Gu S Z, et al. An introduction of the projects administrated by the Division of Geology, Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China in 2017 (in Chinese). Adv Earth Sci, 2017, 32: 1332–1336 [姚玉鹏, 熊巨华, 顾松竹, 等. 2017年度地质科学领域工作报告. 地球科学进展, 2017, 32: 1332–1336]
- 17 Ren J G, Pei J L, Chen X, et al. An introduction of the projects administrated by Division of Geology, Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China in 2018 (in Chinese). Adv Earth Sci, 2018, 33: 1282–1285 [任建国, 裴军令, 陈曦, 等. 2018年度地质科学领域工作报告. 地球科学进展, 2018, 33: 1282–1285]
- 18 Ren J G, Chen X, Chu H, et al. An introduction of the projects administrated by Division of Geology, Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China in 2019 (in Chinese). Adv Earth Sci, 2019, 34: 1175–1178 [任建国, 陈曦, 初航, 等. 2019年度地质科学领域

基金项目评审与成果分析. 地球科学进展, 2019, 34: 1175–1178]

- 19 Ren J G, Chu H, Lü D W. Discipline layout and prospects of geological sciences in the National Natural Science Foundation of China (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 162–168 [任建国, 初航, 吕大伟. 国家自然科学基金地质学学科布局及展望. 科学通报, 2021, 66: 162–168]
- 20 Yao Y P, Guo Z T. Implementing the strategic plan of earth sciences and optimizing funding structure of disciplines (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2021, 66: 143–144 [姚玉鹏, 郭正堂. 落实地球科学战略规划、优化学科资助格局. 科学通报, 2021, 66: 143–144]

Summary for “地质学科未来5~10年发展战略：趋势与对策”

Development strategy of geology in next 5–10 years: Trends and countermeasures

Yunpeng Dong^{1*}, Jianguo Ren², Zhifei Zhang¹, Jun Deng³, Anlin Guo¹, Xingliang Zhang¹, Xiumian Hu⁴, Qiang Wang⁵, Jianwei Li⁶, Nansheng Qiu⁷, Youbin Sun⁸, Guochun Zhao⁹, Jinjiang Zhang¹⁰, Jianbing Peng¹¹, Yangting Lin¹², Hang Chu² & Dawei Lü²

¹ State Key Laboratory of Continental Dynamics, Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China;

² Department of Earth Sciences, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China;

³ School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

⁴ School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

⁵ Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

⁶ School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

⁷ College of Geoscience, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;

⁸ Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China;

⁹ Department of Earth Sciences, University of Hong Kong, Hong Kong, China;

¹⁰ School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

¹¹ School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

¹² Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

* Corresponding author, E-mail: dongyp@nwnu.edu.cn

The recent great development in science and technology has launched Earth Science to higher expectations. The connotation and extension of Earth science have been expanded to Earth system science, including the formation and evolution of the inner and outer layers of solid Earth, mineral resource enrichment, ecological environment change, Earth habitability and social sustainable development. As the core of Earth science and a traditional subject, geology urgently needs a rapid development through in-depth study of the subject development trend and formulation of development strategy.

Relying on support of the National Natural Science Foundation of China through the project “research on development strategy of geology” and the great efforts made by a number of experts in various disciplines of Earth science, we have fulfilled the following tasks: (1) Investigated the current development status and future trend of geology at home and abroad and set up 6 subject development goals in scientific research innovation, optimization of scientific research organization, serving and meeting critical national needs, construction of testing technology innovation and platform, strengthening international cooperation and cultivation and innovation of geological talents. (2) Suggested to deploy a series of foresight projects around the national Earth science program of “deep Earth, deep sea, deep space and earth system science”, that are expected to make a breakthrough in the areas of structural geology and tectonics, mineralogy and petrology, sedimentology and stratigraphy, paleontology and biogeography, Quaternary geology, hydrology and engineering geology, mineral deposit science, and oil and gas geology. (3) Identified and summarized a number of key scientific issues from 13 priority development areas as follows. The distribution and circulation of the Earth's key metal elements, the formation and evolution of continents and the initiation of plate tectonics, the mineralogical and petrological processes of the crust-mantle interaction in the subduction zones, deep processes and dynamics of the Earth, interaction between deep processes and shallow system and the habitable Earth environment, Earth's multispheric interaction and dynamics and resource-environment effects of the basin-mountain system in the Tethys tectonic domain, reconstruction of the tree of life and evolution of the Earth's habitability, dynamics of the multiscale climate and environment change under the conditions of the Cenozoic multispheric interaction, generation, development, evolution of sedimentary materials, the high-resolution chronostratigraphic system, the geodynamic processes and metallogenic mechanism, accumulation of conventional and unconventional oil and gas series, and coal mine enrichment mechanism, major hydrogeological and engineering geology of “One belt, one road”, utilization of city underground space, composition and structure evolution of the Moon and Mars and planetary habitability. (4) Selected 8 priority areas in international cooperation as follows. The dynamic processes of boundary zones between active blocks, the Tethys dynamic system and resource effect, the evolution and geodynamics of the oceanic lithosphere, the paleoclimate and paleo-ocean evolution in the key geological periods, the law and mechanism of climate and environment change in the Quaternary, the process and mechanism of major life evolution events in the geological history, the ore-forming law and mechanism in the key metallogenic belts and typical deposits, and the formation and enrichment mechanism of deep and super deep oil and gas. (5) Six priority research fields crossing science departments are proposed. The major focus is on the multispheric interaction of the Earth system science, the origin and evolution of life, exploration, development and efficient utilization of mineral and energy resources, and digital earth. (6) A series of safeguard measures to implement the development strategy of geology is also addressed.

geological subject, deep Earth-deep sea-deep space, Earth system science, development strategy, priority development areas

doi: [10.1360/TB-2022-0194](https://doi.org/10.1360/TB-2022-0194)