宜居地球的过去、现在与未来——地球科学发展战略概要

朱日祥^{1*}, 侯增谦², 郭正堂^{1,2}, 万博¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;

2. 国家自然科学基金委员会, 北京 100085

* 联系人, E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

Summary of “the past, present and future of the habitable Earth: Development strategy of Earth science”

Rixiang Zhu^{1*}, Zengqian Hou², Zhengtang Guo^{1,2} & Bo Wan¹

¹Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;

²National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China

* Corresponding author, E-mail: rxzhu@mail.iggcas.ac.cn

doi: 10.1360/TB-2021-1051

人类对地球和生命起源的好奇心与探索精神促使近代科学的启蒙, 从古希腊到文艺复兴, 再到工业革命, 始终如此。回顾20世纪地球科学发展史, 板块构造理论揭示了行星地球的动力学特征, 引发了20世纪的地学革命, 极大地改变了人类对地球演化历史的认知^[1,2]。面对第四次工业革命的前夜, 地球科学前沿问题究竟是什么? 近年来天文学与深空探测将“宜居性: 适宜生命存在的空间”作为首要研究目标。不同学科的研究表明, 地球表面在很长一段时间内保持了生命“宜居”的环境, 认识这种宜居性如何演化是地球科学家肩负的学科使命。在此背景下, 中国科学家提出, 地球宜居性的科学内涵和演化规律是21世纪的前沿科学问题^[3]。尽管这项研究具有高投入、回报慢且难量化的特点, 但它决定了一个国家地球科学与技术原始创新的能力, 需要国家从战略层面给予稳定支持。同时从业人员也要增强自信, 勇于挑战最前沿的科学问题, 通过原创理论与颠覆性技术实现跨越发展, 为引领第四次工业革命提供科技支撑。

地表是地球宜居性的重要载体, 为此联合国提出了一系列侧重于表层过程与人类可持续发展的方案, 力图认识由水、土、气、生、人多要素相互作用形成的人地耦合系统动力过程^[4]。实际上, 地球内部、表层与相关的空间环境是相互关联的整体; 比如超大陆聚合与雪球地球事件、超级地幔柱与生物灭绝等事件高度相关^[5,6], 地球表层环境与太阳和地外行星的演化也密切相关^[7-9]。金星、地球和火星都位于天文学定义的太阳系宜居带, 它们在38亿年前都没有生命, 在

经历早期频繁的天体撞击和活跃的行星内部动力过程之后, 只有地球演化为生命的适宜星球。为应对人与自然双重作用对地球宜居性的影响, 人类需要充分利用高新技术、大数据以及综合观测资料, 以“上天入地下海观地球——三深一系统”的宇宙视角, 研究地球宜居性的过去、现在与未来(图1)。

1 科学视野——对人类认知的挑战

认识宇宙是科学研究的目的之一。比如, 深空探测使人类逐步认识到宇宙的深邃与地球在宇宙中的“不特殊性”, 开拓了科学与技术协同发展的新视野。为认识宜居地球的可持续性, 我们需要从交叉与融合中获得科学原创, 这是弥补过去科学与技术发展不平衡最有效的措施。太阳系形成的早期, 金星、地球、火星从固体组分和挥发分到外部空间环境都是非常相似的, 而现在这三兄弟演化得非常不一样。未来地球究竟如何演化? 我们究竟该如何应对地球系统的变化? 回答这些问题需要我们“探索宇宙, 理解地球, 用好地球”, 通过比较行星学研究获得地球宜居性原创理论的突破。基于热力学和能量守恒等基本原理, 考虑行星间以及地球各圈层的相互作用, 探索地球周期性冷暖变化规律, 理解重大地质事件及其与地球热量波动之间的内在联系, 量化自然驱动及人类活动对地球环境和气候系统变化的影响, 是新兴的交叉研究领域。

地球形成于大约46亿年前^[10]。最初的7亿年被称为黑暗时代, 其演化过程几乎全部被地质活动和天体过程所覆盖。

图1 “三深一系统”的地球宜居性研究体系

Figure 1 The study strategy for the Earth habitability by “three deeps and one system”

因此我们对此知之甚少，唯一可确定的是地球从黑暗时代逐步演化成了适合孕育生命的宜居行星。从地球生命的多样性，我们可以推测宇宙生命的复杂性。比如地球陆地上的生命绝大多数需要空气、阳光和淡水，而地球海底生命却既不需要空气，也不需要阳光和淡水；由于地球在宇宙中的不特殊性，宇宙至少存在与地球陆地和海洋相类似的生命形式。深空探测的预期之一是帮助我们了解地球宜居性的演化、地球生命的起源。当然我们要注意，从宇宙的视角，很难确切给出生命宜居的定义。液态水是生命存在的必要条件，这是我们基于对地球生命认知得出的结论。宇宙生命存在的形式未必有简单的通则，比如土卫六可能就存在生命演化的新形式。地球气候系统变迁和生物圈演化与恒星风作用直接相关^[1]，对这一问题的认知需要创新思维方式和研究范式。火星曾经也可能是类似地球的生命宜居星球，但现在是不毛之地，火星磁场消失导致其大气和水逃逸可能是火星环境恶化的重要原因，值得深入研究。

对于地球宜居性，尤其是对宜居地球发展演化的深部控制机制，有太多的未知等待人类去探索。宜居地球的演化可分为“准稳态模式”和“突变模式”；后者即是人们熟知的重大地质事件，如大氧化事件、雪球地球、海洋缺氧事件、生物大灭绝等。我们并不清楚它们之间是否相关？如何相关？是什么造成了地球生物大灭绝和新生命形式的出现？又是什么触发了地球气候系统的改变？大氧化事件的氧气究竟如何产生？是什么造成了深部地幔熔融和大火成岩省？是什么扰动了常态地幔对流并触发了超大陆的汇聚与裂解？为什么地球内部存在地磁极性频繁倒转和超静磁带两种动力过程？认识这些重大地质事件的本质对理解宜居地球过去、现在与未来非常重要。

与太阳系宜居带其他行星相比，活跃的地球内部动力过程造就了地表观测到的板块俯冲作用、火山喷发以及频发的地震活动。正是由于地球内部活跃的动力过程，为地表生命提供了生存所需的资源能源。通过地球内部动力过程，深部碳-氢-氧-硫元素与表层及空间的物质循环对地球宜居性具有决定性的影响。碳元素的循环控制地球的气候系统，氢元素的循环与水和油气等资源密切相关，氧元素的循环影响地球生命繁盛与衰落，硫元素的循环决定海洋生命系统和多种资源能源的形成。地球之所以演化成今天的生命宜居状态，与地球深部动力过程对碳-氢-氧-硫循环的驱动密切相关。研究发现，地球内部是一个巨大的碳库和水库。从地球演化的角度讲，人类排放的CO₂对地球气候系统仅仅是短暂的扰动。其实大气和海洋的碳含量仅占地球系统可循环碳的5%左右，我们研究宜居性不能忽略地球内部95%的可循环碳^[12]。与氢元素直接相关的是水，地表浩瀚的太平洋、大西洋、印度洋等所蕴含的水，与地球内部的水比起来可能还是“小巫见大巫”^[图2]。

近年来，我国科学家在深地过程与宜居地球相关性研究领域已经取得了令人振奋的突破^[13]。人们所熟知的物理化学规律，在1800 km深下地幔的温压条件下呈现出超乎寻常的属性。迄今，我们对地球超深部的认知主要来自地球物理、地球化学以及高温高压计算与实验。未来的地球科学亟待与高温高压物理学、化学和人工智能等学科交叉融合，揭示自地心到地表、从过去到未来深部动力在地球宜居性演化中的作用，其研究成果将推动地球科学的发展甚至促进化学新理论的建立。

海洋对地球系统碳、氢、氧、硫等多种物质循环都有调控作用，深入认识海洋及相关的海底动力与能量物质循环过程是理解地球宜居性和应对未来碳排放与发展权益的关键。在太阳系形成的早期，地球、火星、金星大气中的CO₂含量几乎是相同的；现在火星大气中CO₂含量为95%，金星大气中CO₂含量为97%，地球大气中CO₂含量只有0.04%。造成三者CO₂含量如此巨大差别的主要因素是地球表层海洋与陆地能够通过成岩等方式固定大量的CO₂，随后地球大洋板块俯冲将地表系统固定的碳带入地球深部。流体/挥发分是地球的血脉，它不仅将物质、能量的传递与大规模构造变形相联系，而且控制着地球系统物理化学属性的转变以及宜居性的演化，这是未来必须解决的重大前沿科学问题。

海水通过海底蚀变、沉积过程、热液活动等影响着大洋板块的物理性质和化学成分；而俯冲板块则将地表流体带到地球深部，影响着岩浆活动、板块运动乃至整个地球演化。进入地球内部的水诱发地幔物质部分熔融，助力软流圈和下地幔过氧层的形成。理解这些过程是认识板块运动驱动力和地球大氧化事件成因的有效途径。因此，深部熔流体的活动机制，如俯冲板块驱动的水循环、碳循环等是理解地球宜居性的核心；同时，以海洋为核心的多圈层流固耦合研究是认

图2 地球内外系统联动机制的工作模型。修改自文献[3]

Figure 2 The interaction between solid Earth and the Earth's surface. Revised from Ref. [3]

识与经略海洋国家战略的重要科学支撑。

地球生命在何处产生、如何产生一直是困扰我们的难题。大洋是水岩反应器，蛇纹岩是地球上规模最大的水-岩相互作用的产物；蛇纹石化可能是地球热源、构造活动和生命起源的发动机。生活在海底的生命不需要光合作用，这或许为我们认识生命起源打开了一扇窗户；海底热液，特别是低温碱性热液甲烷的产生，为生命从无机物到有机转变提供了线索。未来地球科学家、化学家、生物学家等通力合作，深入研究泥火山(蛇纹石化)过程中甲烷与各种蛋白质物质的成因，或许有助于我们破解地球生命的起源。更重要的是，从行星地球系统角度研究生物灭绝与繁盛对认识宜居地球过去、现在与未来是非常重要的(图3)。

2 科学攻坚——满足地球宜居需求

创造新技术是人类发展的助推剂。回望30年前，很少有人看好页岩气；技术进步开创了21世纪初的“页岩革命”，改变了世界能源版图。下一次能源革命的爆发点是什么？谁将成为引领者？现在还难以回答，可以肯定的是科技创新是关键。地球科学需要前瞻布局，通过科学攻坚，比如创新“资源形成与富集理论”，服务人类对宜居地球的需求。有机-无机相互作用对油气生成、储运、成藏保存的影响，是石油地质理论研究的新领域。同时，海洋含有丰富可再生能源(如潮汐能、潮流能)、深海多金属资源、生物资源等。如何合理开发利用

这些资源能源？也是当前面临的科学与技术难题。矿物形成与宜居地球演化也是互馈的；地球上现有的5740种矿物中有2/3是在生命出现之后形成的^[14]。数量众多的新岩石类型的形成也与生物作用密切相关，研究战略性大宗与稀有矿产资源的形成机制不仅是国家战略需求，也是认识地球宜居性的新途径。

地球演化伴随着一些灾变事件，大陆强震就是其中之一。了解大陆强震孕育的地球深部环境和动力过程是地震学研究的突破口。利用新的监测手段研究强震预警新理论和新方法是减轻地震灾害的有效途径之一。同时，人类开发和利用资源日益活跃，人工诱发地震引起社会的广泛关注。应该尽快开展人工诱发地震机理与灾害评估的超前理论与实验研究，为未来重大工程的建设提供科技支撑。

随着世界经济的高速发展，人类活动产生的有害物质对生态环境和人类健康带来不同程度的影响。尽管各国已启动多项有针对性的研究计划，但这些计划距离回答和解决人类面临的可持续发展问题还相差甚远，面向宜居地球的环境调控与治理路径仍不清晰。未来还需加强对环境污染过程和机理、环境污染的生态效应与修复等基础性科学问题的深入研究，从而为宜居地球的生态与环境调控提供科学支撑(图4)。

我们要建设生态文明与美丽中国，需要从环境容量上去考虑中国的经济发展和城市化，与此相关的核心科学问题就是地球与生命健康。科学发展史充分说明，生命健康与宜居

图 3 深部水循环与海平面变化及海底热液循环示意图. 修改自文献[3]

Figure 3 The Earth's deep water cycle, sea level variations, and the circulation of hydrothermal fluids at the seafloor. Revised from Ref. [3]

图 4 地球系统科学发展的优先战略研究领域^[3]

Figure 4 Priority research fields of Earth system science^[3]

地球总是密不可分。在面对未知病毒时，人类更深刻体会到认识自然、研究自然的重要性；同时也意识到现有知识体系还不足以保证人类与宜居地球的和谐发展。未知病毒让我们进一步认识到，地球与生命健康(Geo-Health)对人类至关重要。

要，地球科学家责任重大。

3 科技支撑——变革性技术

地球科学是一门高度依赖观测技术的学科，通过变革性

图5 综合PNT体系基础设施框架^[3]. GNSS, 全球导航卫星系统

Figure 5 The comprehensive PNT system's construct framework^[3]. GNSS, Global Navigation Satellite System

技术获取第一手观测资料是宜居地球研究所面临的新挑战。比如，基于不同原理的多种导航、定位、定时(PNT)信息源，经过云平台控制、多信息源综合利用建成的综合PNT体系^[15]。这种综合PNT体系能够为深空、深海、地表乃至深地的观测提供最新资料，比如未来的深空探测就可依赖脉冲星X射线信息源，太阳系和地月系可构建与我国北斗系统同源同基准的拉格朗日星座并提供无线电PNT信息源；低轨空间可依赖低轨通信卫星信息源，海底可构建类似于陆地大地网和卫星星座的海底PNT基准网，最终形成从深空到深海无缝覆盖的PNT综合体系(图5)。

同时我们也要认识到人类观测能力和方法的局限性。当前正在兴起的数据革命也许能够弥补观测局限性的短板，从而支撑地球科学的创新发展。机器学习和人工智能的主要目的在于挖掘隐藏在数据中的科学内涵，从数据分析中发现新的机理与规律。利用计算机视觉和自然语言等实现机器人的高级智能行为，已迅速应用到自然科学、社会科学和工程科学等领域。地球科学家已将机器学习和人工智能技术成功用于天气预报、资源能源勘探开发、火山和地震预警等领域。大数据及人工智能将极大推动机器学习和人工智能集成与融合新时代的出现。

4 实现途径与展望

科学是文化的分支，科学创新需要文化氛围，文化氛围本身就是社会公共产品，同样需要政府的政策引导。着眼于

未来科学发展，国家需要不断完善创新型人才培养、引进、选拔机制，实施激励科学原创的评价奖励制度，健全不同类型人才的考核标准，作到“人尽其才、才尽其用”。对面向未来的创新人才，应注重不同功能型人才的比例，既要有能把握国际学科前沿的战略型科学家，也要有能扎根基层解决具体问题的战术型科学家，更要有大量从事观测实验与数据分析的技术型人才和服务于整个科研过程的组织管理人才。

科技发展越来越依靠多组织、多部门甚至多国家(或地区)联合实施的大科学工程/计划。参与、进而发起和组织国际重大科学研究计划，将加快我国进入世界科学前列的步伐，提升我国地球科学基础研究水平和原始创新能力。未来在某些有地域特色研究“领跑”的同时，通过广泛的国际合作加速全球性重大科学问题研究从“跟踪”到“并行”进而“领跑”的转变，为地球科学发展贡献中国智慧、创立中国学派。

中国40年融入世界之路表明，科技合作和交流是国际关系中的关键与核心；我们需要有开放与包容的大国情怀，在国际合作中提出世界科技转型的战略思路。中国科学家在未来研究中不仅需要国际视野，还要明晰国家战略需求。地球科学的内在属性需要我们用宇宙视野和坚持以我为主的原则，广泛、深入地开展国际合作和交流，这将有助于加深对重大科学问题的认知，有助于高效利用全球创新资源。中国科学家将站在人类命运共同体的高起点，与国际科技界携手努力，为应对人类面临的共同挑战作出应有贡献。

致谢 感谢2021–2030地球科学发展战略研究组各位成员以及中国地球科学界同仁的参与和贡献。感谢国家自然科学基金(41942015)和中国科学院学部学科发展战略研究项目(XK2019DXC007)资助。

推荐阅读文献

- 1 Hsü J K. *Challenger at Sea: A Ship That Revolutionized Earth Science*. New Jersey: Princeton University Press, 1992
- 2 Oreskes N, Le Grand H E. *Plate Tectonics: An Insider's History of the Modern Theory of the Earth*. Colorado: Westview Press, 2001
- 3 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 [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]
- 4 Fu B J. The historical mission of the United Nation's Sustainable Development Goals and Geographical Science (in Chinese). *Sci Tech Rev*, 2020, 38: 19–24 [傅伯杰. 联合国可持续发展目标与地理科学的历史任务. 科技导报, 2020, 38: 19–24]
- 5 Courtillot V, Olson P. Mantle plumes link magnetic superchrons to Phanerozoic mass depletion events. *Earth Planet Sci Lett*, 2007, 260: 495–504
- 6 Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, et al. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. *Sci Adv*, 2017, 3: e1600983
- 7 Haigh J D. The Sun and the Earth's climate. *Liv Rev Sol Phys*, 2007, 4: 2
- 8 Yin Z Q, Ma L H, Han Y B, et al. Long-term variations of solar activity. *Chin Sci Bull*, 2007, 52: 2737–2741 [尹志强, 马利华, 韩延本, 等. 太阳活动的甚长周期性变化. 科学通报, 2007, 52: 1859–1863]
- 9 Gray L J, Beer J, Geller M, et al. Solar influences on climate. *Rev Geophys*, 2010, 48: RG4001
- 10 Amelin Y, Krot A N, Hutcheon I D, et al. Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions. *Science*, 2002, 297: 1678–1683
- 11 Lammer H, Lichtenegger H I M, Kulikov Y N, et al. Coronal Mass Ejection (CME) activity of low mass M stars as an important factor for the habitability of terrestrial exoplanets. II. CME-induced ion pick up of Earth-like exoplanets in close-in habitable zones. *Astrobiology*, 2007, 7: 185–207
- 12 Plank T, Manning C E. Subducting carbon. *Nature*, 2019, 574: 343–352
- 13 Mao H, Mao W L. Key problems of the four-dimensional Earth system. *Matter Radiat Extrem*, 2020, 5: 038102
- 14 Hazen R M, Papineau D, Bleeker W, et al. Mineral evolution. *Am Miner*, 2008, 93: 1693–1720
- 15 Yang Y X. Concepts of comprehensive PNT and related key technologies (in Chinese). *Acta Geod Cartogr Sin*, 2016, 45: 505–510 [杨元喜. 综合PNT体系及其关键技术. 测绘学报, 2016, 45: 505–510]