



地球宜居性的深部驱动机制

徐义刚^{1*}, 黄小龙¹, 王强¹, 王煜¹, 李高军², 刘耘³, 毛河光⁴, 倪怀玮⁵, 朱茂炎⁶

1. 中国科学院广州地球化学研究所, 同位素地球化学国家重点实验室, 广州 510640;
2. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023;
3. 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081;
4. 北京高压科学研究中心, 北京 100094;
5. 中国科学技术大学, 中国科学院壳幔物质与环境重点实验室, 合肥 230026;
6. 中国科学院南京地质古生物研究所, 现代古生物和地层学国家重点实验室, 南京 210080

* 联系人, E-mail: yigangxu@gig.ac.cn

2023-08-08 收稿, 2023-09-27 修回, 2023-10-07 接受, 2023-10-12 网络版发表

国家自然科学基金(42288201)和国家自然科学基金委员会-中国科学院前沿领域发展战略研究(XK2019DXC003)资助

摘要 除与太阳之间的距离和行星的大小有关外, 地球之所以宜居的一个重要因素是其拥有动力十足的地球内部。与地球宜居性是地球表生作用结果的传统认识不同, 本文认为地球深部驱动着对宜居环境至关重要的外部层圈, 并提出地球内外层圈间的联动机制是地球系统科学研究的突破口。在调研和评述的基础上, 本文建议未来研究需要关注早期地球、地磁场、深地挥发分循环、超级火山、深地新化学反应和地质空调器等方面, 围绕地球宜居性的深部驱动机制这一主题, 开展地球固体层圈与流体层圈的整合研究, 助力我国地球科学研究从单一学科研究向多学科交叉融合研究的转变, 推动我国固体地球科学从跟踪前沿向开拓前沿的跨越式发展。

关键词 地球宜居性, 深部引擎, 深地过程, 层圈相互作用, 地球系统科学

地球是太阳系目前已知唯一具有水圈、大气圈和生命活动的行星。自38亿年前起, 地球上就开始出现生命, 这得益于地球拥有液态海洋、陆地、磁场、稳定的大气组成和适宜的地表温度等有利于生命繁衍生息的条件^[1]。然而地球的宜居性并非与生俱来, 大碰撞导致岩浆洋覆盖全地球, 还原环境使得当时的大气圈以甲烷、氨气为主。那么, 地球是如何从早期相对均一的炽热行星演变成具有良好层圈结构、生机勃勃的宜居星球是地球科学的一个重大问题^[2,3], 也是人类探索未知的终极梦想。地球是如何演变出生命宜居的环境? 如何拥有强大的自我调节/修复功能并维持宜居环境的相对稳定? 如何形成人类赖以生存的资源 and 能源? 这些问题均涉及多个层圈间的相互作用, 需要将地球系

统科学的思想灌注于相关的研究中^[4,5]。

谈到地球宜居性, 人们马上会联想到宜居地球的三要素, 即温度、水和氧气^[1]。液态水是生命不可或缺的元素, 而温度则是控制液态水在行星表面存在的最重要因素。与地球相邻的金星表面温度比地球高出450°C, 而火星则比地球低80°C, 均不适合液态水的存在, 因而无法形成适合生命生存和繁衍的环境。地球上保存的最老沉积岩形成于38亿年前, 保存的碎屑锆石形成于44亿年前^[6], 暗示在地球初期就可能已有液态水的存在。地球表面相对稳定且适宜液态水存在的温度变化区间是层圈相互作用的结果: 温室气体通过反射地表的热辐射升高大气的温度, 而地球系统则通过对温室气体含量变化的调节改变地表温度的变化幅度,

引用格式: 徐义刚, 黄小龙, 王强, 等. 地球宜居性的深部驱动机制. 科学通报, 2024, 69: 169–183

Xu Y G, Huang X L, Wang Q, et al. Earth's habitability driven by deep processes (in Chinese). Chin Sci Bull, 2024, 69: 169–183, doi: [10.1360/TB-2023-0816](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0816)

形成了适宜生命居住的、相对稳定的气候环境。地球历史上5/6左右的时间都是温室气候，两极没有冰盖，期间经历过多次且短暂的极热事件，其中以距今5600万年前后古新世-始新世极热事件最为著名。地球历史上冰室气候相对少见，一般在两极或单极发育常年冰盖。但特别令人不解的是，在距今24~22亿年前后的古元古代和7.2~6.3亿年前后的新元古代，地球曾经发生过极端冰室气候，冰川覆盖赤道地区的海洋，地球成为一个“雪球地球”^[7,8]。虽然这次雪球事件对生命来说是个灾难，但令人惊奇的是，该事件之后，大气含氧量急剧增加，成为寒武纪生命大爆发的“助燃剂”，展示了地球系统强大的自我修复/更新功能。

目前，大多数有关地球宜居性起源和演化的研究集中在岩石圈-大气圈-水圈-生物圈(包括人类)的相互作用上。虽然取得了许多激动人心的研究成果，拓宽了人类的认知边界，但客观地说，至今未形成与板块构造理论相媲美的新地学理论。传统观点认为，地球宜居性是地球表生作用的结果，而本文认为，地球内部层圈(地核、地幔及岩石圈)在整个地球系统的运作中起着支配作用，驱动着对宜居环境至关重要的外部层圈(水圈、大气圈和生物圈)的运行，并提出地球内外层圈间的联动机制是地球系统科学研究的突破口。围绕地球宜居性的深部驱动机制这一主题，本文评述了早期地球、地磁场变化、深地挥发分循环、超级火山、深地新化学反应和地质空调器等在地球宜居性形成与演化中所起的作用及相关研究存在的问题，呼吁通过多学科交叉和研究范式的变革来解决相关问题，推动地球系统科学的发展。

1 地球宜居性的形成与演化受深部控制

天文学家认为，行星的宜居性取决于行星与恒星之间的距离以及行星的大小^[2]。金星、地球、火星均位于太阳系宜居带，因而被称为“孪生”三兄弟。事实上，这3个行星在早期演化阶段的确非常相像，但它们后来的命运却十分迥异。3个行星的大气圈存在显著差异，水星没有大气圈，金星大气圈稠密，大气压力比地球高90倍，火星的大气圈十分稀薄，大气压仅为地球的0.007。现在金星的表面温度为~470°C，是一个失控的温室星球；火星的温度是-63°C，代表了失控的冰室星球，只有地球的平均温度在20°C左右，成为一个宜居星球。金星离太阳近，所以过热，火星离太阳远，所以过冷，这是否说明了行星与恒星之间的距离决定了是否具有

宜居性？但实际上并没那么简单，因为照此推理，离太阳最近的水星应该最热，但水星昼夜温差在450°C~-190°C之间。由此可以推断，除了行星与恒星之间的距离，另有“隐秘”因素决定了宜居性演化。

这个“隐秘”因素在行星内部，主要原因包括以下几方面。

(1) 对比宜居和非宜居星球(图1)可以发现，活跃的地球内部是地球区别于其他类地行星的重要标志，也是维持地球生命存在的根本保证。与地核和地幔的对流、冷却放热过程相关的能量约为34~66 TW，支撑了整个板块构造体系的运行；地球内部的能量一旦耗尽，板块构造也就不复存在。如果没有一个活跃的内部，地球就会像月球一样死寂，人类赖以生存的环境就不复存在。外核的对流导致了地磁场的形成，阻挡了太阳风和宇宙射线，保护了地球大气圈、生物圈和水圈，对生物圈和水圈起到了重要的保护作用。地幔对流是板块运动的主要驱动力，而板块运动又形成了巨型造山带、地震带、岛弧岩浆带和成矿带，对表层系统的三大层圈状态和运行产生巨大的影响。板块俯冲穿越地球各层圈，将地球表层的物质送达地球深部，地幔柱则将核幔边界的物质和能量向地球表层输送，二者共同构成了地球内部的主要物质循环途径，是联系地球深部和表层间的重要纽带。

(2) 地球深部是碳、氢、氧等主要生命元素的重要储库。与深部储库相比，地表的碳、氢、氧含量只是冰山一角，全球99%的碳在地球内部，地球内部的水当量相当可观^[9,10]。由于碳、氢、氧以气态、液态和固态

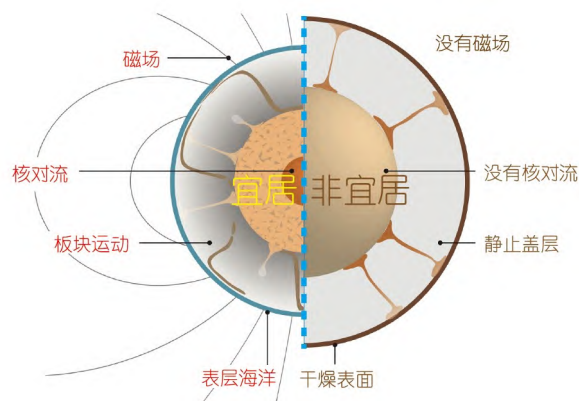


图1 宜居和非宜居星球的对比暗示活跃的行星内部是宜居性形成的关键。修改自文献[3]

Figure 1 Comparison between habitable and inhabitable planets implies the key role of a dynamic planetary interior in developing planet's habitability. Modified after Ref. [3]

3种相态出现, 因而可以在大气圈-水圈-固体地球等圈层间传输, 所以地球深部碳、氢、氧的任何“风吹草动”足以影响表层系统, 从而导致地质时间尺度上变形变质、资源富集以及气候、环境的剧变. 从原核向真核再到多核生物的演化进程中, 至少经历了两次大的增氧事件, 即距今24亿年前后的古元古代大氧化事件(Great Oxidation Event, GOE)和距今6亿年前后的新元古代大氧化事件(Neoproterozoic Oxidation Event, NOE)(图2). 由于大氧化事件前后地幔岩石的氧逸度快速上升^[12], 因此地球大气增氧可能是深部驱动的. 大气圈组成的演变很可能与地球深部氧化还原状态的变化以及地幔持续的去气作用相关(图3).

(3) 地幔对大气CO₂的贡献同样不容忽视. 工业革命以来, 大气CO₂浓度上升了180 μg/g, 而地质历史时期, 特别是对应几次生物大灭绝事件的超级火山喷发导致大气CO₂浓度高达3000、4000 μg/g. 源汇间CO₂循环的失衡可以驱动地球宜居性的重大改变, 而起源于地球深部的超级火山恰恰具备这种能力. 大规模溢流

基性岩浆喷发(即大火成岩省)可能是极端气候事件、大洋缺氧和生物大灭绝的直接原因^[13,14].

由上可知, 地球宜居性演化与深部过程密切相关. 以板块构造和地幔柱作用为代表的构造运动驱动地内和地表系统之间的物质交换, 将地表的挥发分带入地球深部, 挥发分经历漫长而复杂的迁移和演化过程之后, 通过火山喷发等方式回到地表, 完成在地球深部的循环^[15], 伴随着构造活动的风化作用和生物地球化学循环, 可以直接影响表层大气与海洋的宜居条件、沉积成矿过程和生命的演化. 然而迄今为止, 尚没有建立“深部过程控制地球宜居性演化”的理论体系. 面临的瓶颈或者挑战有两个: 一是深部过程与表层系统的关联机制不清, 二是控制地球宜居性演化的深部引擎不明.

2 地球宜居性的深部驱动机制

虽然我们已经知道地球深部在地球宜居性的形成与演化中起到决定性的作用, 但对地球内外系统的联

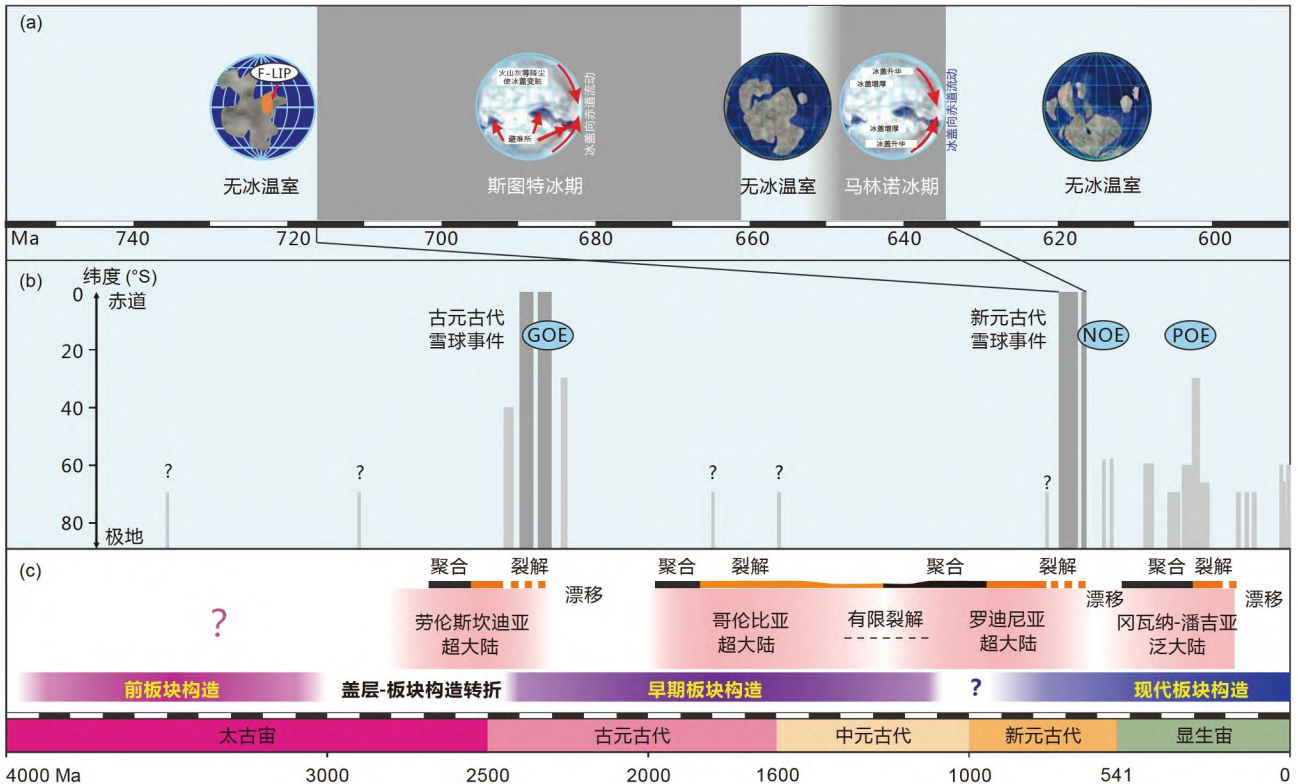


图2 地球历史上的气候变化与构造运动. 修改自文献[8,11]. (a) 新元古代雪球地球; (b) 地球历史上的冰期与大氧化事件; (c) 超大陆运动与板块构造演化. F-LIP, 富兰克林大火成岩省; GOE, 古元古代大氧化事件; NOE, 新元古代大氧化事件; POE, 古生代大氧化事件
 Figure 2 Climate changes and tectonism throughout the Earth's history. Modified after Refs. [8,11]. (a) Neo-Proterozoic snow ball; (b) ice age and great oxidation events through Earth's history; (c) super-continents and plate tectonic evolution. F-LIP, Franklin large igneous province; GOE, Paleo-Proterozoic great oxidation event; NOE, Neo-Proterozoic great oxidation event; POE, Paleozoic great oxidation event

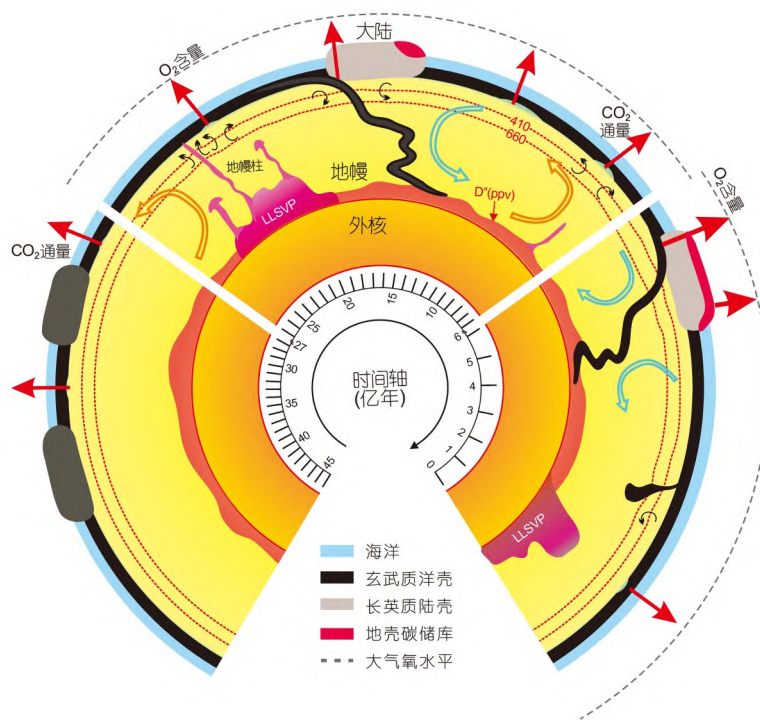


图3 地球深部过程对深部与浅表系统间物质和能量交换过程的控制示意图
 Figure 3 Schematic illustration of material and energy exchanges between deep Earth and surface spheres, modulated by deep processes

系机制还知之甚少。本文阐述几种可能的深部驱动机制及存在的相关问题。

2.1 早期地球演化与宜居地球的雏形

早期地球是指最早十亿年时的地球(45.6~36亿年前)。这一阶段发生了包括大碰撞与地球形成、核-幔分异、地磁场产生、岩浆洋演化与初始陆壳形成、地球早期水圈-大气圈形成、生命起源、板块构造启动等重大地质事件。受限于地质记录,这段历史的认知还很不完善,需要依靠高温高压实验、计算地球化学、计算地球动力学、比较行星学、行星增生动力学等新的研究范式,但它却是理解宜居地球形成的关键。地球独特宜居性的形成,其中的关键问题是如何获得及保存挥发分。这不仅与地球增生过程有关(即受到特殊类型大碰撞事件的控制),也与地球岩浆洋固化过程和早期垂向构造运动有关(即完成挥发分的转移和分布)。同样地,新生地核和地幔的分离使得各大圈层物质和能量重新分配,为地球系统的演化奠定了基调;现今地球深部的结构、成分及运行方式是这些重大地质事件的直接后果。

原始地球的增生过程在很大程度上决定了地球最

初的热-物理-化学状态,是地球早期演化的起点。目前普遍认为,地球的增生过程经历了以下几个阶段:从直径小于微米的星尘凝聚成直径公里级别的星子(planetaryesimal),再由星子聚集成直径达数百至上千公里的星胚(embryo),这些星胚在增生晚期经历了一系列大碰撞事件,最终形成原始地球。由此可见,原始地球的增生过程伴随着温度的升高、挥发分的反复丢失与凝聚、金属相与硅酸盐相的分离、硅酸盐的多次熔融与结晶等多种复杂过程。尽管近年来随着研究的不断深入,学界在地球增生的理论模型上已基本达成共识,但在诸多关键问题上仍存在激烈的争论,尤其是在涉及地球增生最晚期的两个关键过程——月球形成大碰撞和后期加积(late veneer)过程上:(1)月球形成大碰撞事件被广泛认为是原始地球增生过程中的最后期且最重要的一次全球事件,大碰撞之后,原始地球不仅达到了其现今质量的~99.5wt%,也基本上完成了硅酸盐和金属相的分离,因此,月球形成大碰撞决定了原始地球最初的物理化学状态^[16,17]。但是人们目前无法回答这次大碰撞究竟是高能还是低能大碰撞,以及这两种碰撞形式的地球化学响应究竟如何。(2)在月球形成大碰撞之后,后期加积事件仅仅贡献了约占现今地球总质量

0.3wt%~0.8wt%的物质,但是这些物质关系到地球上水等其他重要组分(C、N、强亲铁元素等)的来源问题,是地球宜居性形成的起点。

核幔分异是地球形成的里程碑事件。地核的形成过程并非一蹴而就,而是通过成百上千次小的星子撞击而逐步生长。地球通过一次次这样的撞击完成其增长,而每次撞击后的核幔分异过程则促成了地核的形成。地球液态外核的带电流动,即地球发电机的运转,产生了地球磁场,形成了人类及地表生命的保护伞。地磁场抵御了太阳风和高能宇宙射线的辐射,是生命起源和演化的重要保障条件之一。地球磁场的出现至少可以追溯到35亿年前^[18]。而长期维持这一稳定的磁场需要持续的能量输出驱动地球液态外核的对流。目前,液态外核的对流被认为主要由内核结晶生长释放轻元素以及潜热而形成的成分对流驱动。另外,液态外核热传递中形成的热对流可以予以辅助^[19]。

早期地球的大气化学成分是调控地球气候环境的关键因素,同时也为生命的出现和演化提供了重要的物质和能量基础。因此,对地球原始大气成分及相关化学过程进行研究是深入了解地球宜居环境起源及演化的重点。液态水是生命起源和维持生命活动的关键,在40亿年前的冥古宙,地球表面已出现大面积的海洋,但由于早期太阳的辐射能量只有现今太阳的70%~80%,若要在当时维持液态水的存在,早期地球大气必须含有大量温室气体,这个问题被称为“暗淡太阳悖论”^[20]。确定多种温室气体(如氢气、二氧化碳、甲烷等)的含量被认为是解决暗淡太阳悖论的关键。然而,由于缺乏直接且有效的地球化学指标,在这些温室气体含量的估算上分歧极大,同一气体的估算浓度可相差几个数量级^[21]。早期地球的大气化学成分亦为生命的出现和演化提供了重要的物质和能量基础。虽然大气化学在前生命化学中逐渐被忽略,但值得强调的是,大气化学过程导致的大气成分改变(如有机气溶胶形成等),直接影响有多少高能紫外线可到达地表,有多少有机物质可沉降到地表,这些都是驱动地表甚至深海环境前生命化学的重要能量和物质基础。

前板块构造(pre-plate tectonics)是地球在其形成开始到板块构造启动为止,在内、外动力作用下发育的构造运动的统称,其持续时间约为15亿年,约占1/3的地球地质历史。全球构造体制涉及地球内部在全球尺度上的物质运动方式,主要关注岩石圈及深部地幔之间的相互关系,还涉及地球的对外散热机制(如地幔对

流、岩石圈热传导和对外的热辐射)。其中,岩石圈是否参与地幔对流是判断类地天体构造体制性质的主要依据。因此,前板块构造是早期地球在内、外动力作用下深部与浅部能量和物质交换的体现。从能量角度出发,前板块构造控制了地球岩石圈参与地幔对流的形式及总体散热速率,极大地影响了地球整体的热演化;从物质循环角度看,前板块构造控制了壳幔分异的具体方式和速度,与长英质地壳最初形成和大陆增长密切相关。因此,前板块构造是制约地壳的起源及后期演化的基础和关键控制性过程,也是研究早期地球动力学演化的重要内容。

地幔是硅酸盐地球的主要组成部分,也是最大的地球化学储库。对早期地幔性质及其在地质历史中如何演化的认知,可为揭示早期地球增生、核-幔分异、壳-幔分异、初始大气圈、水圈和地磁场的形成等重大地质事件及其他星体演化提供重要的制约。20世纪80年代,地幔地球化学研究领域最重要的进展是地幔化学不均一性的发现,并基于板块构造理论提出了岩石圈拆沉、俯冲洋壳再循环、地幔交代和地幔对流等来解释地幔不均一性的形成^[22,23]。一些特殊的地幔区域,如大低剪切波省(Large Low Shear Velocity Province, LLSVP, 图3),由于其特殊的物理性质,可能未被地幔搅动均一化,并遗留下了地球形成最初时的一些地球化学信号。研究这些特殊地幔区域的同位素地球化学特征,对于了解地球原始的构成成分、后期加积的物质来源、核幔相互作用等深地深时过程,具有重要指示意义。

2.2 地磁场变化与地表宜居性

不同于周边行星,地球拥有强大的偶极子磁场。地磁场的存在以及磁场强度的变化与地球宜居环境有着千丝万缕的联系。一方面,磁场在地球外部层圈形成磁层,阻碍大气圈的逃逸,且阻挡太阳风、紫外线和银河宇宙射线到达地球表面,从而使地球生命免受辐射的影响,是地球成为宜居星球的主要原因之一。磁场对宜居环境的正面影响还可以从火星的演化历史得到验证。现今火星只有极弱的偶极子磁场。火星磁场的消亡被认为是火星大气圈消失的根本原因,从而导致火星环境从早期的富水和沉积环境向现今干旱、无菌环境的转变^[24]。

另一方面,古地磁研究表明,在地球历史中地磁场的极性经常发生倒转。在磁极倒转或磁偏移过程中,偶

极子磁场强度整体下降,降低幅度最大可达90%^[25]。磁场强度的降低导致其保护大气圈的能力降低,部分大气逃逸,大气圈中臭氧和氧气含量也随之降低^[26],甚至形成臭氧空洞,以致到达地表的紫外线辐射增强,生物圈因而遭受较大影响。早在20世纪80年代,Raup^[27]就提出生物大灭绝可能与地球磁极倒转有关,但由于磁场极性变化的时间尺度的不确定以及深时生物演化缺乏高精度时间约束,这一地球深部过程与地表宜居性的关联直到近年才逐渐被确认。最著名的研究案例是晚第四纪哺乳动物的演化。由于地磁场可以影响平流层中臭氧层的保存,磁场强度常被作为抵达地球紫外线辐射量的替代指标。根据新发现的化石及其精确定年,人类演化树以及地球磁场强度的高精度重建,Channell和Vigliotti^[24]发现,到达地表紫外线辐射量的变化、地球磁场强度的变化和哺乳动物的演化之间存在时间关联。特别是约4万年前和1.3万年前发生的两次大型哺乳动物的灭亡事件(前者包括著名的欧洲尼安德特人的消失),分别对应于地球磁场强度的最低值(即Laschamp和MD01-2444磁偏移),暗示到达地表的紫外光辐射量的变化影响了哺乳动物的演化。此外,20万年以来,人类演化树分支发生的时间也与地球磁场强度的低值时间相对应,进一步说明紫外光辐射量的增加对人类演化的长期、负面影响^[24]。

地磁场变化对生物圈的影响不仅仅是负面的,有时也是一种环境胁迫因子,促进生物适应环境变化能力的提升^[25,28]。Meert等人^[28]发现,埃迪卡拉末期生物灭绝和寒武纪生物大爆发在时间上与地磁场快速倒转相对应。埃迪卡拉末期许多软体动物灭绝;到了早寒武世,具有垂向挖掘能力的动物开始出现,且生物矿化作用也变得常见。Meert等人^[28]认为,高频地磁倒转期间进入浅海的紫外光辐射量增加,造成软体动物灭绝。而在这种环境的胁迫下,一些动物开始具备垂向挖掘能力,在水中上下游动,并逐渐长出保护硬壳,以避免紫外光辐射的伤害。这些过程改变了海底生态环境,大大增加了生态空间,有利于物种的更替,最终促进了寒武纪生物多样性的爆发。

由上可见,地磁场变化在不同时空尺度上对表层环境和生物圈产生了影响,是深部过程驱动地球宜居性演变的生动例子。然而目前对地磁场生物效应基本机制的认知还非常有限。该方向研究的深化有赖于深时岩石中古地磁场和生物化石的全时域、高分辨率记录的恢复。

2.3 深部挥发分循环与地球宜居性演化

深地挥发分的赋存和迁移不仅深刻塑造地球深部的状态、物性和过程,其循环也是影响水圈和大气圈的形成与演化、调控地表宜居性的重要机制。板块俯冲将包括挥发分在内的地表物质输送进入地球深部。全球俯冲带向地球深部输送蚀变洋壳约60000 Mt/a^[29],及其上覆沉积物约1800 Mt/a^[30,31]。尽管不同俯冲带的沉积物化学组成存在很大差别,但有研究者对全球俯冲沉积物的平均化学组成作出估计^[32]。只要知道俯冲沉积物和洋壳中的挥发分平均含量,就可以计算出从地表储库向地球深部储库的挥发分输入通量(俯冲的岩石圈地幔不计入地表储库)。目前估计,水、C、S、N的输入通量分别为1000、82、26~132和0.7~2.3 Mt/a^[33]。

火山喷发是地球深部挥发分得以返回地表储库的主要途径。洋中脊、俯冲带、板块内部火山喷出岩浆的通量分别为50000、8000和2000 Mt/a。除火山喷发之外,在板块内部和俯冲带,弥散式去气的贡献也相当可观。综合不同研究的结果,目前估计俯冲带向地表输出水、C、S、N的通量分别为300、23、3~23和0.55 Mt/a;洋中脊水、C、S、N的输出通量分别为120、16、50和0.1 Mt/a;板内水、C、S的输出通量分别为90、40和2 Mt/a^[33]。

尽管对挥发分通量的估计仍存在很大的不确定性,将输出通量与输入通量相除,可以得到水、C、S、N的再循环效率分别约为50%、100%、100%±50%、70%±30%。这暗示C和S的输出通量与俯冲输入通量基本相当,而水和N再循环回到地表的效率偏低。如果这能代表显生宙以来的基本情况,可以推断,寒武纪时的海平面高度更高,大气中也含有更多的氮。如果将地球深部储库的挥发分总量除以通量,可以得出挥发分在地球深部的居留时间在十亿年到百亿年量级。

与板块俯冲输入和火山喷发输出这两端相比,对挥发分在地球深部迁移机制和通量的约束更加困难。俯冲板片中的主要含水矿物包括角闪石、绿泥石、多硅白云母、硬柱石、蛇纹石等。随着温度和压力的上升,部分含水矿物发生变质脱水或熔融,形成富水流体、硅酸盐/碳酸盐熔体,甚至超临界流体等不同类型的板片流体^[33,34]。板片流体作为介质将大量挥发分从板片迁移至上覆地幔楔,机械刮削或底辟作用也有助于挥发分的迁移。van Keken等人^[35]对全球大洋俯冲热的结构和板片岩石变质脱水进行了分析,粗略估计

俯冲板片平均在弧前和弧下深度(<90 km)脱去1/3的水,在100~230 km深度又脱去1/3,剩下1/3的水进入更深部的地幔。在经历弧下流体提取后,板片中残留的碳酸盐矿物继续俯冲,在上地幔底部发生熔融,形成碳酸盐熔体,碳酸盐熔体与低氧逸度的深部地幔发生氧化还原反应,“冻结”(redox freezing)形成金刚石^[36,37]。含有金刚石的地幔上涌,又可以因为氧逸度的升高而发生熔融(redox melting),形成碳酸盐熔体或碳酸盐化硅酸盐熔体,幸存的金刚石可以被板内火山喷发带至地表。目前对深部地幔中S和N的迁移与演化图像尚不十分清晰。

多硅白云母、硬柱石、蛇纹石等含水矿物可以在高压下保持稳定,石榴石和辉石等名义上无水矿物的储水能力也随压力升高而增大,成为向地球深部输送水的载体^[10]。实验证明,瓦茨利石和林伍德石能够携带2%的水,而来自地幔转换带金刚石中发现的富水林伍德石暗示410~660 km深的地幔转换带是地球的主要水库,可能储存着2~3个地表海洋的水^[9]。Tschauner等人^[38]在超深(24 GPa)金刚石包体中发现了纯水的高压相冰-七。

此前主流观点认为下地幔是干的,因为下地幔的主要组成矿物布里基曼石和铁方镁矿不能带水。但近年来的高温高压实验改变了这一传统观点。以前之所以找不到超高压含水矿物,是因为大家循着瓦茨利石和林伍德石等镁硅酸盐的路线,即寻找高密度含水镁硅酸盐(dense hydrous magnesium silicates, DHMS),找到的许多新相都会在高温高压下分解。命名按发现的次序从A排起,只有2015年发现的H相可以在下地幔稳定存在^[39]。其实以镁硅酸盐为主的布里基曼石虽然是下地幔的主要矿物,但它只占深俯冲大洋板片的1/4,其他各约占1/4的斯石英、毛钙硅石、毛河光矿也同样重要。Lin等人^[40]发现,沿着俯冲板片的温压条件,斯石英可以含>3%的水。而且虽然历经氯化钙相、赛石英相等相变而逐步释放水,但直到2900 km的核幔边界仍可以保持相当的含水量。这些发现为地球深部水含量和存在形式打开了新的窗口,但需要更多的野外观察和高压实验来确定上地幔、转换带乃至下地幔真实水含量、存在形式及其对地幔物理化学属性的影响。

2.4 超级火山与重大地质事件

火山活动是衔接地球深部与表层系统的重要桥梁,短时间内释放巨量岩浆和挥发分的超级火山系统是打

破全球气候环境平衡的主要因素。来源于深部的超级火山更是在驱动地球宜居性演化中发挥了重要作用。超级火山系统指由地壳、地幔来源的岩浆汇聚于岩浆储库(即岩浆房)并经过一定时间的演化后在短时间内释放巨量岩浆及挥发分,形成猛烈喷发的超级火山(火山爆发指数VEI达7~8级以上),或形成规模巨大的、以基性岩浆为主的大火成岩省(面积>16万平方公里,体积>10万立方公里,75%以上的主体岩浆在约1~5百万年形成;图4)。

印度尼西亚多巴火山(VEI=8.8)和美国黄石火山是典型的超级火山(图4)。多巴火山的喷出量是2022年年初喷发的汤加火山的~300倍,火山灰覆盖了南亚、整个印度洋及非洲大部,全球降温达5°C,对气候影响长达数千年,并导致当时约90%智人死亡及大量哺乳类动物的灭绝,造成了人类演化史中的“人口瓶颈”事件^[41]。欧亚大陆上的大火成岩省包括西伯利亚暗色岩系、德干高原和峨眉山大火成岩省等(图4),其分布面积分别达200万、100万、100万平方公里,在时间上分别与二叠纪末、白垩纪末和瓜达卢普末的生物大灭绝吻合。

超级火山之所以能引发地球宜居性的剧变,原因在于其具有熔融程度高、岩浆储库大、喷发速度快的特点。导致地幔熔融形成岩浆的因素包括减压、增温和挥发分的加入,分别对应于洋中脊、地幔柱和俯冲带3种构造背景。但要在短时间内生成巨量岩浆,则需要岩浆源区具有异常高温,或者含有丰富的挥发分(H₂O、CO₂等)。这是因为地幔温度越高,地幔绝热上升线与固相线交点与岩石圈底部之间的距离就越大,地幔部分熔融程度越高,形成的岩浆量自然越大;同理,体系中挥发分含量越高,地幔固相线温度越低,形成的岩浆量也就越大(图5)。起源于核幔边界的地幔柱满足温度高这一条件,而俯冲过程中大洋板片的脱水(或脱挥发分)作用可以提供巨量挥发分。理论上,高温和挥发分的联合作用也能引发巨量岩浆的形成,且其复合效应可能更大(图5(c))。这种情形可出现在地幔柱与俯冲板片相互作用中,如全球最大超级火山之一的美国黄石火山就是黄石地幔柱与法拉龙板片相互作用的结果^[42]。也有一些远离LLSVP的地幔柱/热点,其形成可能与板片俯冲至下地幔引起地幔物质流扰动有关^[43],海南地幔柱可能就是由周边板片深俯冲引起地幔上涌而形成的^[44]。我国的长白山是世界上最危险的活动火山之一,至少发生过4次7级以上的大喷发,深部探测揭示,现今该火山下的岩浆储库仍在活动,岩浆量达数千

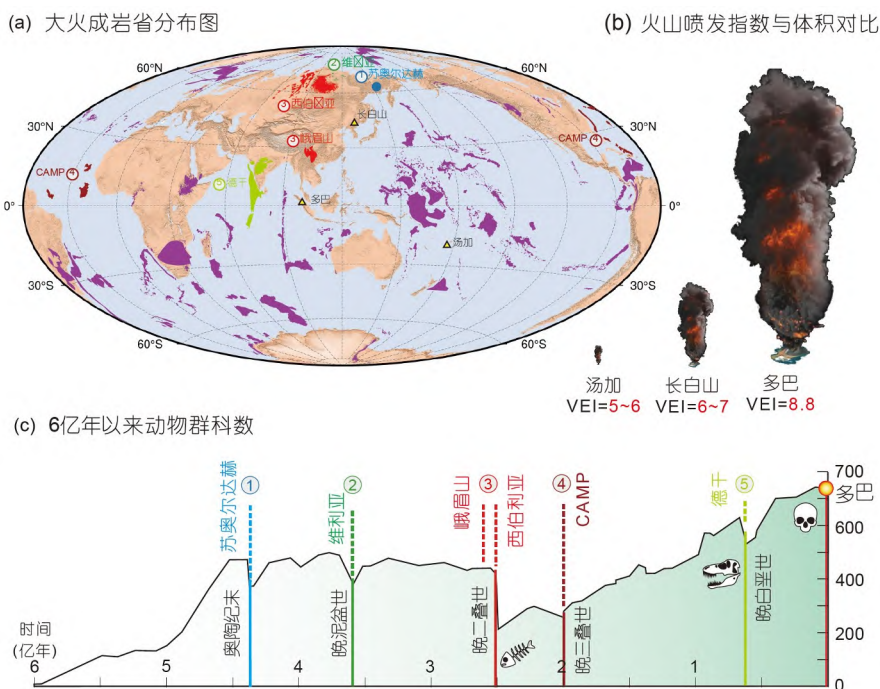


图4 全球大火山岩省分布(a)、超级火山喷发(b)与生物大灭绝关系图(c)
 Figure 4 Schematic illustration of global distribution of large igneous provinces (a), and relationship between super-volcanic eruption (b) and mass extinction (c)

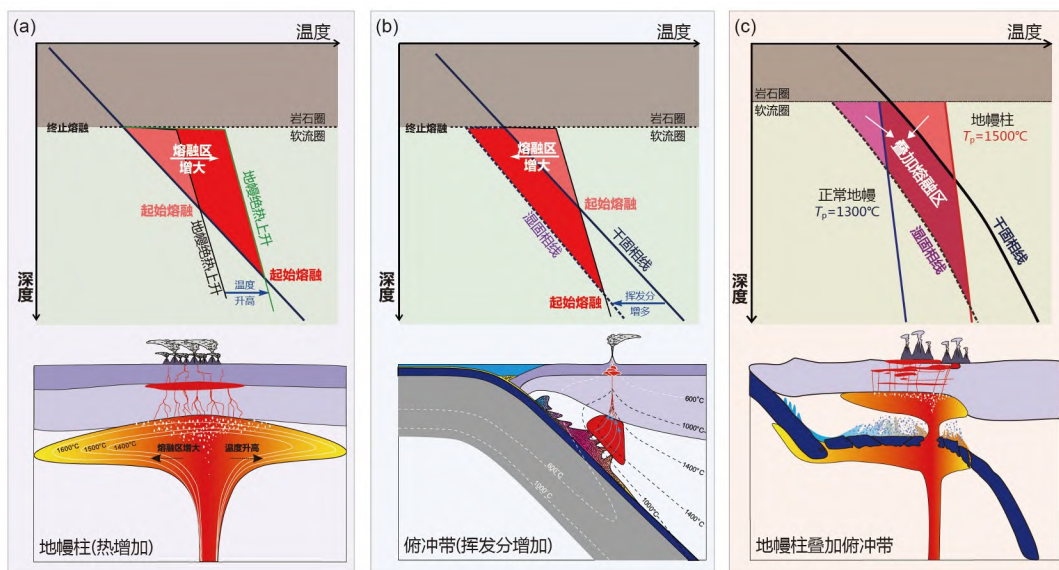


图5 地幔柱(a)、俯冲带(b)、地幔柱-俯冲复合(c)背景下地幔发生高程度部分熔融示意图
 Figure 5 Schematic illustration of high-degree partial melting of the upper mantle in three tectonic scenarios: Mantle plume (a), subduction zone (b) and slab-mantle plume interaction (c)

立方公里^[45], 存在再次喷发的可能性^[46]. 长白山火山的构造背景应属于板内环境, 但其复合火山锥地貌和巨量火山碎屑岩却与俯冲带上的超级火山极为相似. 地

震层析成像揭示, 俯冲的太平洋板块滞留在地幔转换带中^[47], 滞留板片的脱水或脱碳作用引起大地幔楔的熔融^[48,49]. 这种大地幔楔系统中流体助熔形成板内岩

浆是经典板块理论中所没有阐述的。因此, 尽管黄石、长白山、海南所处的构造背景相差很大, 但三者都反映出地幔(柱)与俯冲板片相互作用在超级火山形成过程中的重要作用。

另一个决定超级火山系统形成与快速喷发的因素是岩浆储库。深部熔融形成的熔体并不具有瞬时迁移的能力, 而需要经过长期的孕育发展才能穿过数十公里厚的地壳喷出地表。导致岩浆从深部向地表迁移的主要作用力是浮力, 因此当岩浆穿过重要的密度断面时, 岩浆的浮力以及上升速度会发生骤变: 上升的岩浆最容易在地幔与地壳的界面(莫霍面)和上地壳与下地壳的界面(康拉德面)失速并驻留, 从而形成一定规模的岩浆储库。岩浆储库越大, 所含的挥发分越多, 岩浆持续供给能力越强, 都是决定超级火山系统形成的关键。

火山的喷发方式也影响了其影响地球宜居性的程度。普利尼式喷发可将火山灰和火山气体释放到水圈、生物圈、大气圈、甚至到达平流层之外, 从而对全球气候产生重大影响。挥发分散布在大气后, 可以通过连锁反应控制地球表层温度的升高和降低, 形成酸雨, 影响大气圈和水圈的pH和氧化还原状态, 从而直接或间接地影响生态系统。例如, 超级火山喷发释放的硫可以导致全球短暂变冷^[50]; 形成大火成岩省时释放的巨量S可以导致全球生态系统发生剧烈变化, 造成生命大灭绝^[51]。地质历史时期发育过众多超级火山系统, 导致了显生宙以来4次生物大灭绝事件, 如二叠纪末西伯利亚大火成岩省事件(图4), 造成了~81%的海洋物种和~89%的陆地物种灭绝^[52], 从根本上改变了地球生命的进化历程。

超级火山也可能是地球上两次雪球事件的幕后推手(图2)。雪球地球假说认为, 新元古代早期罗迪尼亚超大陆集中分布在赤道及中纬度地区, 强烈的风化作用加剧了大气CO₂的降低。同时, 风化作用导致海洋营养物质供应充分, 初级生产力增加, 大量有机碳在超大陆裂解形成的全球大面积裂谷盆地中的沉积中埋藏下来。加之哈德利环流对热传导作用的削弱或者改变, 最终导致冰室气候的发生。当高纬度冰川推进到低纬度30°左右的时候, 在冰川对太阳光的强反射作用下, 冰室效应进一步加强, 冰川快速推进到赤道地区, 导致地球表面全部被巨厚的冰川覆盖(厚度可达1 km以上), 形成雪球地球。然而, 有关雪球冰期事件的触发机制、冰期和间冰期转换过程, 以及雪球事件和大氧化事件的联系还没有得到解决。新元古代巨型岩浆活动为揭开上述

困惑提供了潜在方案。分布在北美和西伯利亚的富兰克林大火成岩省是触动雪球冰期发生的关键原因, 因为其喷发时间与全球冰期沉积发生时间相吻合(7.18亿年前)^[53]。古元古代雪球事件与全球构造(低纬度超大陆聚合和裂解)和岩浆活动存在一定的联系^[9]。特别是有证据表明, 古元古代中期23~22亿年之间构造和岩浆活动出现长达1亿年左右的停滞期, 显然这种地球深部动力学过程对地球表层宜居性产生重大影响^[54]。

尽管如此, 仍有一些有关火山作用影响地表系统的重大科学问题尚待解决, 包括火山喷发的类型、规模和地理位置与环境因子之间的定量关系如何, 火山作用怎样引起海-陆-气系统之间的连锁反应, 火山活动与地质环境、生物的地质记录如何耦合? 只有揭示超级火山系统的形成条件, 才能理解深部引擎的运转方式; 只有阐明挥发分多圈层循环的失衡机制, 才能破解地球宜居性演变的深部驱动之谜。

2.5 深下地幔新化学与地球“有氧”运动

如前所述, 部分水可随板块俯冲作用进入下地幔。在下地幔条件下, 水会与地幔物质反应, 并呈现出与地表条件下截然不同的物理化学规律。

铁和氧是地球内部最重要的组成, 分别占地球总重量的35%和30%以上。地球分成以氧为主的地幔和以铁为主的地核两大部分。大气中的自由氧和组成地核的金属铁代表了这两种元素在地球上存在的两极状态。以往认为在地球内部, 随着深度增加, 氧逸度逐渐变小, 铁氧化物中的氧含量亦随之降低。地球表面常见的赤铁矿(Fe₂O₃)逐渐过渡为上地幔磁铁矿(Fe₃O₄), 到下地幔至核幔边界存在方铁矿(FeO)。然而, 最新的研究却发现, 在深下地幔温压条件下, 水成为强氧化剂, 能与铁镁氧化物反应, 提升铁的氧化程度, 释放氢并沉积过氧化铁(FeO₂)^[55]。由于高压导致的特异化学规律, 氧含量在板片接近地核时不降反升, 形成氧含量梯度的反转。后续的研究进一步发现, FeO₂晶格可以含一定量的氢, 随着加热峰值温度的增加, 含氢FeO₂相将继续脱氢, 其体积逐渐变小^[56]。

如果俯冲板片所携带的水与深下地幔发生新化学反应, 形成过氧化铁FeO₂H_x并释放氢, 长期累积后在核幔边界形成厚度大于10 km的富铁富氧区域。地震学研究揭示, 在核幔边界的确有一层几公里到几十公里厚且波速异常的超低速区(ultra low velocity zone, ULVZ), 其地震波纵波波速比周围约低10%, 横波波速约低

30%，但ULVZ成因尚无定论。Liu等人^[57]利用金刚石对顶砧装置、同步辐射X光衍射和非弹性谱学的实验，结合第一性原理计算方法，成功地模拟了含氢的过氧化铁(FeO_2H_x)在地球核幔边界温度压力环境(135万大气压和3000 K以上)地震波的性质，发现 FeO_2H_x 具有低波速、高密度等特性，与ULVZ性质相符。Ohtani^[39]证实了有关高压下水-铁新化学反应实验的重复性，他强调，在ULVZ发现含氢 FeO_2 ，表明俯冲含水物质可被携带至核幔边界，揭示了整个地幔都参与到地球深部水循环过程中。

这些发现颠覆了传统的地球化学认知。首先，过氧化铁的铁氧比很特别，似乎表示铁的价态超过三，但X光谱学的测试显示铁并不是四价，而是氧化变成小于二价^[58]，说明人们熟知的元素价态规律在深下地幔不再适用。其次，单质氢一般被视为非常还原的物质，在深下地幔却可以与非常氧化的过氧化铁共存，因而需要重新审视氧逸度的根本观念。最后，深下地幔的水循环与浅部的水循环完全不同。在浅部，水循环等同于氢的循环(即氢氧不分离)，而在深部，氢、氧分离，放出氢，把额外的氧留在矿物里。也就是说，水把氧泵到深下地幔，局部储存高度氧化的岩石矿物，水的循环以氢上升的形式完成。

这些新发现对于理解深部引擎有重大意义。图6展示了地球内部新引擎控制重大地质事件的概念模式图^[59]。俯冲板块所携带的水与深地化学作用，该反应具有双重结果，即是持续堆积富氧物质并释放氢。一方面，富氧物质在核幔边界长期累积过量，将发生间歇性的爆发，形成富氧超级地幔柱。富氧物质抵达上地幔和地壳，能显著降低地幔岩石熔点^[60]，产生大量岩浆，是大火成岩省、大氧化事件、和后续的氧波动引起的环境变迁及生物灭绝的根源。

另一方面，深下地幔释放的氢以多种途径上升返回地面：可能与金属元素化合成金属氢化物，也可能与其他非金属元素化合，变成碳氢、氮氢、硫氢、磷氢等挥发分或与氧化物反应成水回归地表，或者以单质氢气回到地表。氢气由于其极高的活性会逃逸掉，但在马里发现的氢储层与辉绿岩相间，说明在某种地质条件下，部分氢会储集到地质储库中。全球首家开发利用天然氢气资源的企业HYDROMA的成功为寻找替代传统化石能源的清洁能源提供了动力。考虑到目前水解氢的成本居高不下，研究深部过程产生无机氢形成和储集的重要性不言而喻，是新的科学和能源研究前沿。

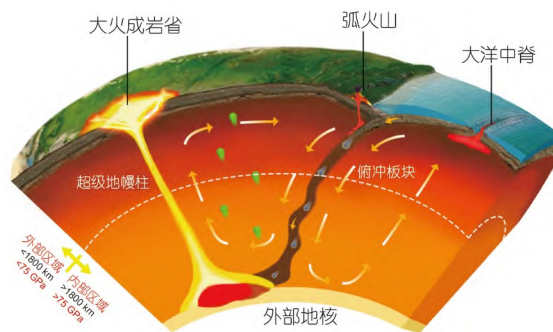


图6 地球内部新引擎和地球“有氧运动”的概念模式图。据文献^[59]修改。大于1800 km的深下地幔(>75 GPa)，其物理化学规律与浅部不同，造成了水循环中氢和氧的分离驱动了地球的活动。蓝色水滴状符号代表含水矿物随板块下沉；水氧化了深下地幔矿物释放了氢(绿色上升符号)累积了氧(红色)；累积超过阈值发生氧爆发成黄色的超级地幔柱上升；富氧物质抵岩石圈底部引起大程度熔融岩浆造成大火成岩省

Figure 6 Conceptual model showing new deep Earth engine and aerobic movement. Modified after Ref. [59]. The physio-chemical rule of elements in the deep lower mantle (>1800 km, >75 GPa) is different from in the shallow level. Specifically, hydrogen and oxygen are separated during deep water cycling, which may represent the driving forces of mantle Earth processes. Blue water drops denote downwelling of hydrous minerals along with subduction of slab. Water oxidizes minerals of deep lower mantle, releasing hydrogen (green upwelling symbols) and accumulating oxygen (red). When accumulated oxygen surpasses the threshold, oxygen eruption occurs, forming superplume. When oxygen-rich materials arise to the base of the lithosphere, large degree of partial melting takes place, giving rise to the large igneous provinces

如果这些深部地球氢气资源可以被开采利用，将同时解决目前人类面临的能源短缺和环境污染两大难题。

2.6 “地质空调器”

宜居地球研究的核心问题之一是地球如何在长达40多亿年的地质历史中长期维持相对稳定的宜居气候，从而保证生命的持续演化进程。地质记录表明，至少从40亿年前开始，除几次短暂的全球性雪球事件外，地球表面液态水长期大量存在^[6]。地表液态水的长期存在除了需要一定的重力、磁场条件阻止大气逃逸外，更要求地表温度长期稳定在狭窄的区间。但是，40亿年以来，太阳发光度、地表反射率、温室气体含量等气候控制因子都发生了剧烈变化，与地球表面温度的长期稳定性形成鲜明对比。因此，维持地表温度长期稳定的机制成为广为关注的科学议题，是理解地球宜居环境形成的关键^[61]。

在40亿年前，太阳比现在黯淡，其辐射是现在的~75%。如果40亿年前大气中温室气体含量与当前一样，全球地表温度只有-5.3°C。但是低温下水汽含量更低，

ϵ 值(红外辐射的大气吸收率)更低,冰川扩张也会导致地表反射率增高,全球温度可能更低。因此,在早期黯淡太阳的照射下,地球需要极高的温室气体含量或者极低的反射率才能维持液态水的存在。但是,早期地球具体的温室气体含量和地表反射率还存在很大的争议,而且高的 CO_2 含量可能形成高反射率的 CO_2 云,并不能补偿低的太阳发光度^[62]。更难以解释的是,如果早期地球由于较高的温室气体含量或者较低的反射率维持了宜居环境,那么随着太阳发光度的增高,在其他条件不变的情况下,温室气体含量或者地表反射率需要随着太阳发光度的增加而降低或者升高,从而抵消太阳发光度升高引起的增温效应,避免出现类似金星的过热环境。但是,太阳发光度变化是太阳本身的物理过程,地球地表反射率和温室气体含量是地球自身的过程,两个系统之间的匹配需要有效的自动反馈调节机制。因此,地球系统如何自动响应太阳发光度、地表反射率等因子的剧烈变化而实现自我调节,维持相对稳定的气候,成为研究地球宜居环境形成的重要议题,并逐渐形成两种假说体系,即盖亚假说和风化假说。

盖亚假说认为,地球生命的出现是关键,地球所有生命与无机环境紧密结合在一起,形成一个具有自我调节力的复杂系统,从而维持生命所需的最佳环境条件^[63]。盖亚假说中地球必须是一个精巧的超级智能,才能协调物种个体、种群之间的有序合作,维持稳定的环境。但地球生命之间并没有超联系,生命积极参与维持地球的宜居环境也与生命的利己本能矛盾。因此,解析生命圈和生命演化如何调节宜居环境因子,特别是如何通过负反馈机制实现温度的自我调节,成为盖亚假说研究的重要内容,并提出了包括雏菊数值模型^[64]、二甲基硫气溶胶反馈等机制^[65]。由于生命系统影响自然环境的多样性和复杂性,以及地球系统本身的演化,也很难解析出生命系统调节环境的具体机制,因此盖亚假说面临较大的挑战。

大陆风化假说从地质碳循环角度出发讨论宜居环境的形成,认为地表温度的稳定性与大气 CO_2 含量和地球气候之间负反馈机制有关。特别是在液态水的环境中,大陆风化吸收大气 CO_2 的速度响应大气 CO_2 的温室效应,从而扮演了地质空调的角色^[61]。大陆风化是指地球关键带水、气和生物的作用之下岩石和矿物发生分解的过程,联系了地球岩石圈、大气圈、水圈和生物圈的运行。大气和土壤中的 CO_2 与水结合形成碳酸,然后通过水解作用分解硅酸盐矿物,是大陆风化最主要

的形式。因此,大陆风化可以通过释放阳离子和关键营养元素P,从而控制海洋碳酸盐沉淀与有机碳埋藏,在宜居地球的运行和地表碳循环过程中发挥了重要作用^[66]。

硅酸盐风化消耗大气 CO_2 的速率受控于气候,与大气 CO_2 含量之间形成负反馈关系,成为“地质空调”机制的关键环节。在构造时间尺度碳循环中,相对于地质碳循环通量,地表碳储库较小,碳的存留时间短。碳循环源汇不平衡或地球的温度过高或过低都会导致大气 CO_2 浓度迅速发生变化,从而通过 CO_2 的温室效应改变硅酸盐风化吸收 CO_2 的速度,最终抵消碳循环不平衡或温度异常^[61]。当气候变暖时,硅酸盐风化吸收大气 CO_2 的速度增加,导致大气 CO_2 含量下降,从而阻止进一步升温;反之,气温降低导致风化吸收 CO_2 降低,阻止进一步降温。

大陆风化假说仍面临诸多挑战。(1)大陆风化热稳定器还缺乏有效的地质证据。在更多的时候,大陆风化似乎驱动了气候变化,而非稳定气候。例如,造山运动、植物登陆以及易风化基性岩类的聚集均可能加强大陆风化吸收大气 CO_2 ,从而引起冰期气候^[67,68]。(2)大陆风化响应气候还缺乏直接的证据和动力学机制。大量现代观测表明,大陆风化很大程度上受物理剥蚀,即新鲜岩石的供应控制而非响应气候^[69]。(3)大陆风化热稳定器的长期运行需要可风化陆地的长期暴露和固体地球不断向地表圈层释放 CO_2 。

3 研究展望

地球宜居性表面上涉及地球表生系统中的层圈相互作用,实则与地球深部引擎和过程密切相关。活跃的地球内部决定了地表宜居性的发生和发育。从能量角度看,与地核和地幔的对流、冷却放热过程相关的能量约为34~66 TW,支撑了整个宜居地球体系的运行;从物质组成的角度看,对地表宜居环境有决定性影响的碳、氢、氧等元素,实际上超过90%都储存在地球深部。这些元素的深浅循环以及深地新化学反应深刻影响地球表层系统,从而导致地质时间尺度上变形变质、资源富集以及气候、环境的剧变。地球内部作用不仅直接导致了诸如核幔边界大低剪切波速省、地核发动机等深部巨型构造的发育,也是引发陆壳生长、板块构造启动、大陆聚合裂解、大氧化、雪球地球、大火成岩省、生命大爆发、生物大灭绝等地质史上一系列重大事件的首要驱动力。所以说,地球深部是整个地球系统运行的引擎。只有抓住了这个“七寸”,才能有

效揭示地球系统中不同圈层相互作用的本质, 促进地球系统科学的发展。

西方学者自20世纪80年代就提出了地球内部研究(study of Earth's interior), 主要涉及地球内部的结构、组成与过程。本文认为, 除了要继续关注上述研究内容, 还应重视地球内外系统的联系机制。由于地球内部(地壳、地幔、地核)是一个复杂的多元体系, 并与地表圈层(水圈、大气圈、生物圈)高度关联, 因而深地科学研究具有鲜明的多尺度特色和强系统性。地球深部虽然下不去、看不见、摸不着, 但依托基于深源和陨石样

品的地球化学研究、基于地震波等的地球物理探测、基于高温高压模拟实验以及数值计算和动力学模拟等手段, 可以很好地约束地球深部组成和动力过程。如果将地球深部圈层与浅部圈层进行整合研究, 那更需要更多学科间的合作以及时间与空间维度上的结合, 并借助于整合大数据和人工智能方法的地球系统模型来探索。从这个角度来说, 宜居地球研究必须多学科交叉和多维度综合, 由此才能确立地球过去的历史和预测地球的未来, 并对其他类地星球的演化进行制约以及为深空探测提供更好的反馈。

致谢 感谢两位审稿人给予的中肯建议。本文得到了许多专家和同行的指导与帮助, 在此一并致以谢意。

参考文献

- Langmuir C H, Broecker W. How to Build a Habitable Planet. Princeton: Princeton University Press, 2012
- Elkins-Tanton L. What makes a habitable planet? *Eos*, 2013, 94: 149–150
- Shahar A, Driscoll P, Weinberger A, et al. What makes a planet habitable? *Science*, 2019, 364: 434–435
- Wang P X, Tian J, Huang E Q, et al. Earth's System and Evolution (in Chinese). Beijing: Science Press, 2018 [汪品先, 田军, 黄恩清, 等. 地球系统与演变. 北京: 科学出版社, 2018]
- Xu Y G, Chen J. Strategic Investigation into Frontier Problems in Deep Earth Science (in Chinese). Beijing: Science Press, 2023 [徐义刚, 陈骏. 深地科学前沿科学问题战略研究. 北京: 科学出版社, 2023]
- Wilde S A, Valley J W, Peck W H, et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago. *Nature*, 2001, 409: 175–178
- Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P, et al. A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science*, 1998, 281: 1342–1346
- Young G M. Aspects of the Archean-Proterozoic transition: How the great Huronian Glacial Event was initiated by rift-related uplift and terminated at the rift-drift transition during break-up of Lauroscandia. *Earth-Sci Rev*, 2019, 190: 171–189
- Pearson D G, Brenker F E, Nestola F, et al. Hydrous mantle transition zone indicated by ringwoodite included within diamond. *Nature*, 2014, 507: 221–224
- Schmidt M, Poli S. Devolatilization during subduction. In: Holland H D, Turekian K K, eds. Treatise on Geochemistry, 2nd Ed. Oxford: Elsevier, 2014. 669–701
- Hoffman P F, Abbot D S, Ashkenazy Y, et al. Snowball Earth climate dynamics and Cryogenian geology-geobiology. *Sci Adv*, 2017, 3: e1600983
- Aulbach S, Stagno V. Evidence for a reducing Archean ambient mantle and its effects on the carbon cycle. *Geology*, 2016, 44: 751–754
- Ernst R E, Youbi N. How Large Igneous Provinces affect global climate, sometimes cause mass extinctions, and represent natural markers in the geological record. *Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol*, 2017, 478: 30–52
- Svensen H H, Jerram D A, Polozov A G, et al. Thinking about LIPs: A brief history of ideas in large igneous province research. *Tectonophysics*, 2019, 760: 229–251
- Bekaert D V, Turner S J, Broadley M W, et al. Subduction-driven volatile recycling: A global mass balance. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2021, 49: 37–70
- Canup R M. Forming a moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science*, 2012, 338: 1052–1055
- Lock S J, Stewart S T, Petaev M I, et al. The origin of the moon within a terrestrial synestia. *JGR Planets*, 2018, 123: 910–951
- Tarduno J A, Cottrell R D, Davis W J, et al. A Hadean to Paleoproterozoic geodynamo recorded by single zircon crystals. *Science*, 2015, 349: 521–524
- Nimmo F, Price G D, Brodholst J, et al. The influence of potassium on core and geodynamo evolution. *Geophys J Int*, 2004, 156: 363–376
- Sagan C, Mullen G. Earth and Mars: Evolution of atmospheres and surface temperatures. *Science*, 1972, 177: 52–56
- Catling D C, Zahnle K J. The Archean atmosphere. *Sci Adv*, 2020, 6: eaax1420
- Hofmann A W. Mantle geochemistry: The message from oceanic volcanism. *Nature*, 1997, 385: 219–229
- White W M. Isotopes, DUPAL, LLSVPs, and Anekantavada. *Chem Geol*, 2015, 419: 10–28
- Channell J E T, Vigliotti L. The role of geomagnetic field intensity in late quaternary evolution of humans and large mammals. *Rev Geophys*, 2019,

57: 709–738

- 25 Pan Y, Li J. On the biospheric effects of geomagnetic reversals. *Natl Sci Rev*, 2023, 10: nwad070
- 26 Wei Y, Pu Z, Zong Q, et al. Oxygen escape from the Earth during geomagnetic reversals: Implications to mass extinction. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 394: 94–98
- 27 Raup D M. Magnetic reversals and mass extinctions. *Nature*, 1985, 314: 341–343
- 28 Meert J G, Levashova N M, Bazhenov M L, et al. Rapid changes of magnetic field polarity in the late Ediacaran: Linking the Cambrian evolutionary radiation and increased UV-B radiation. *Gondwana Res*, 2016, 34: 149–157
- 29 Peacock S A. Fluid processes in subduction zones. *Science*, 1990, 248: 329–337
- 30 Burgisser A, Scaillet B. Redox evolution of a degassing magma rising to the surface. *Nature*, 2007, 445: 194–197
- 31 Plank T, Langmuir C H. The chemical composition of subducting sediment and its consequences for the crust and mantle. *Chem Geol*, 1998, 145: 325–394
- 32 Plank T. The chemical composition of subducting sediments. In: Rudnick R L, ed. *Treatise on Geochemistry*. Amsterdam: Elsevier, 2014. 607–629
- 33 Ni H, Zhang L, Xiong X, et al. Supercritical fluids at subduction zones: Evidence, formation condition, and physicochemical properties. *Earth-Sci Rev*, 2017, 167: 62–71
- 34 Manning C E. The chemistry of subduction-zone fluids. *Earth Planet Sci Lett*, 2014, 223: 1–16
- 35 van Keken P E, Hacker B R, Syracuse E M, et al. Subduction factory: 4. Depth-dependent flux of H₂O from subducting slabs worldwide. *J Geophys Res Solid Earth*, 2016, 116: B01401
- 36 Rohrbach A, Schmidt M W. Redox freezing and melting in the Earth's deep mantle resulting from carbon-iron redox coupling. *Nature*, 2011, 472: 209–212
- 37 Thomson A R, Walter M J, Kohn S C, et al. Slab melting as a barrier to deep carbon subduction. *Nature*, 2016, 529: 76–79
- 38 Tschauner O, Huang S, Greenberg E, et al. Ice-VII inclusions in diamonds: Evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle. *Science*, 2018, 359: 1136–1139
- 39 Ohtani E. Hydration and dehydration in Earth's interior. *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2021, 49: 253–278
- 40 Lin Y, Hu Q, Meng Y, et al. Evidence for the stability of ultrahydrous stishovite in Earth's lower mantle. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, 117: 184–189
- 41 Ambrose S H. Did the super-eruption of Toba cause a human population bottleneck? Reply to Gathorne-Hardy and Harcourt-Smith. *J Hum Evol*, 2003, 4: 231–237
- 42 Liu L, Spasojevic S, Gurnis M. Reconstructing Farallon plate subduction beneath North America back to the Late Cretaceous. *Science*, 2008, 322: 934–938
- 43 Zhang N, Li Z X. Formation of mantle “lone plumes” in the global downwelling zone—A multiscale modelling of subduction-controlled plume generation beneath the South China Sea. *Tectonophysics*, 2018, 723: 1–13
- 44 Wang X C, Li Z X, Li X H, et al. Identification of an ancient mantle reservoir and young recycled materials in the source region of a young mantle plume: Implications for potential linkages between plume and plate tectonics. *Earth Planet Sci Lett*, 2013, 377-378: 248–259
- 45 Xu J D, Liu G M, Wu J P, et al. Recent unrest of Changbaishan volcano, northeast China: A precursor of a future eruption? *Geophys Res Lett*, 2012, 39: L16305
- 46 Hammond J O S, Wu J, Ri K, et al. Distribution of partial melt beneath Changbaishan/Paektu Volcano, China/Democratic People's Republic of Korea. *Geochem Geophys Geosyst*, 2020, 21: e2019GC008461
- 47 Huang J, Zhao D. High-resolution mantle tomography of China and surrounding regions. *J Geophys Res Solid Earth*, 2006, 111: B004066
- 48 Xu Y, Li H, Hong L, et al. Generation of Cenozoic intraplate basalts in the big mantle wedge under eastern Asia. *Sci China Earth Sci*, 2018, 61: 869–886
- 49 Zhao D. Global tomographic images of mantle plumes and subducting slabs: Insight into deep Earth dynamics. *Phys Earth Planet Inter*, 2004, 146: 3–34
- 50 Self S, Blake S. Consequences of explosive supereruptions. *Elements*, 2008, 4: 41–46
- 51 Callegaro S, Baker D R, De Min A, et al. Microanalyses link sulfur from large igneous provinces and Mesozoic mass extinctions. *Geology*, 2014, 42: 895–898
- 52 Shen S, Crowley J L, Wang Y, et al. Calibrating the End-Permian Mass Extinction. *Science*, 2011, 334: 1367–1372
- 53 Macdonald F A, Wordsworth R. Initiation of Snowball Earth with volcanic sulfur aerosol emissions. *Geophys Res Lett*, 2017, 44: 1938–1946
- 54 Spencer C J, Murphy J B, Kirkland C L, et al. A Palaeoproterozoic tectono-magmatic lull as a potential trigger for the supercontinent cycle. *Nat Geosci*, 2018, 11: 97–101
- 55 Hu Q, Kim D Y, Yang W, et al. FeO₂ and FeOOH under deep lower-mantle conditions and Earth's oxygen-hydrogen cycles. *Nature*, 2016, 534: 241–244

- 56 Mao H K, Hu Q, Yang L, et al. When water meets iron at Earth's core-mantle boundary. *Natl Sci Rev*, 2017, 4: 870–878
- 57 Liu J, Hu Q, Young Kim D, et al. Hydrogen-bearing iron peroxide and the origin of ultralow-velocity zones. *Nature*, 2017, 551: 494–497
- 58 Koemets E, Leonov I, Bykov M, et al. Revealing the complex nature of bonding in the binary high-pressure compound FeO₂. *Phys Rev Lett*, 2021, 126: 106001
- 59 Mao H, Mao W L. Key problems of the four-dimensional Earth system. *Matter Radiat Extrem*, 2020, 5: 038102
- 60 Lin Y, van Westrenen W. Oxygen as a catalyst in the Earth's interior? *Natl Sci Rev*, 2021, 8: nwab009
- 61 Walker J C G, Hays P B, Kasting J F. A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature. *J Geophys Res*, 1981, 86: 9776–9782
- 62 Caldeira K, Kasting J F. Susceptibility of the early Earth to irreversible glaciation caused by carbon dioxide clouds. *Nature*, 1992, 359: 226–228
- 63 Lovelock J E, Margulis L. Atmospheric homeostasis by and for the biosphere: The Gaia hypothesis. *Tellus*, 1974, 26: 2–10
- 64 Watson A J, Lovelock J E. Biological homeostasis of the global environment: The parable of Daisyworld. *Tellus Ser B Chem Phys Meteorol*, 1983, 35B: 284–289
- 65 Charlson R J, Lovelock J E, Andreae M O, et al. Oceanic phytoplankton, atmospheric sulphur, cloud albedo and climate. *Nature*, 1987, 326: 655–661
- 66 Li G, Yang R, Xu Z, et al. Oxygen isotopic alteration rate of continental crust recorded by detrital zircon and its implication for deep-time weathering. *Earth Planet Sci Lett*, 2021, 578: 117292
- 67 Berner R A. The rise of plants and their effect on weathering and atmospheric CO₂. *Science*, 1997, 27: 544–546
- 68 Macdonald F A, Swanson-Hysell N L, Park Y, et al. Arc-continent collisions in the tropics set Earth's climate state. *Science*, 2019, 364: 181–184
- 69 Larsen I J, Almond P C, Eger A, et al. Rapid soil production and weathering in the southern Alps, New Zealand. *Science*, 2014, 343: 637–640

Summary for “地球宜居性的深部驱动机制”

Earth's habitability driven by deep processes

Yi-Gang Xu^{1*}, Xiao-Long Huang¹, Qiang Wang¹, Yu Wang¹, Gaojun Li², Yun Liu³, Ho-Kwang Mao⁴, Huaiwei Ni⁵ & Maoyan Zhu⁶

¹ State Key Laboratory of Isotope Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

² School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China;

³ State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China;

⁴ Center for High Pressure Science and Technology Advanced Research, Beijing 100094, China;

⁵ CAS Key Laboratory of Crust-Mantle Materials and Environments, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

⁶ State Key Laboratory of Palaeobiology and Stratigraphy, Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210080, China

* Corresponding author, E-mail: yigangxu@gig.ac.cn

Earth is the only habitable planet in the solar system with life. The Earth has two major characteristics that distinct itself from all the inhabitable planets: One is that it has an active interior, and the other is that it has plate tectonics, where the former is a prerequisite for the latter. The energy related to the convection, cooling and exothermic processes of the core and mantle is about 34–66 TW, which supports the operation of the entire plate tectonic system. Once the energy inside the Earth is exhausted, the plate tectonics will cease accordingly. From the perspective of material composition, more than 90% of elements such as carbon, hydrogen, and oxygen that have a decisive impact on the habitable environment on the surface are essentially stored in the deep Earth. Therefore, a slight “turbulence” in the deep Earth will profoundly affect the Earth's surface system, resulting in deformation and metamorphism, resource enrichment, and dramatic changes in climate and environment on the geological time scale. The dynamism of Earth's interior not only directly leads to the development of deep megastructures such as the large low shear velocity provinces of the core-mantle boundary and the core engine, but also gives rise to a series of major events in geological history as the primary driving force, such as the growth of continental crust, the initiation of plate tectonics, continental aggregation and breakup, Great Oxidation Event, Snowball Earth, large igneous provinces, life explosions, and mass extinctions. Therefore, the deep Earth is the operation engine of the entire Earth system. Only by grasping this crucial Earth's engine and unraveling the linking mechanism between internal spheres and exospheres of the Earth represents can we effectively reveal the nature of the interaction of different layers in the Earth system and promote the development of Earth system science. This paper suggests following research themes in future: Early Earth, geomagnetic field, volatile cycling, supervolcanoes, new chemical reaction in deep interior and geo-air conditioning.

Earth's habitability, deep engine, deep Earth processes, interactions between the Earth spheres, Earth system science

doi: [10.1360/TB-2023-0816](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0816)