



地球深部异常或为45亿年前月球形成大碰撞的遗迹

袁迁^{1*}, 邓洪平²

1. Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena CA 91106, USA;

2. 中国科学院上海天文台, 上海 200030

* 联系人, E-mail: qyuan@caltech.edu

The anomalies deep within Earth may be remnants of the giant impact that formed the Moon 4.5 billion years ago

Qian Yuan^{1*} & Hongping Deng²

¹ Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena CA 91106, USA;

² Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030, China

* Corresponding author, E-mail: qyuan@caltech.edu

doi: [10.1360/TB-2023-1081](https://doi.org/10.1360/TB-2023-1081)

月球是地球唯一的天然卫星,也是人类走向深空的第一站。月球的起源一直是地球和行星科学的重大科学问题。目前广为接受的月球起源理论为40多年前提出的“大碰撞”假说。该理论认为在太阳系形成早期,曾有一颗火星大小的行星胚胎(被称为“忒伊亚”)高速(约10 km/s)撞击了原始地球,溅射出了大量碎片,而月球便从碎片盘中聚合生长而成^[1,2]。它为地月系统的三大特征提供了很好的解释:首先,由于原始地球和撞击体“忒伊亚”皆为分异岩质行星,因此撞击所溅射出的物质主要是岩石,这导致形成月球的物质以岩石为主,而缺少铁核物质(分异岩质行星的核心通常主要由铁元素组成)。这与月球铁核质量占月球总质量小于1%的观测相符。其次,“忒伊亚”的高速撞击导致了地月系统角动量剧增,这与地月系统相对于太阳系中其他行星异常高的角动量相一致。最后,大碰撞所释放出的巨大能量使形成月球的月球盘具有极高的温度(4000~6000 K),这高温会导致部分碎片气化,进而使得一些挥发性成分迅速逃逸。这也解释了为什么与地球相比,月球样品中的挥发性元素较为缺乏。

因为大碰撞的空间尺度和温度压力范围都远远超过实验室模拟所能达到的条件,自从大碰撞假说被提出以后,很多学者用计算机定量模拟的方法验证这个假说。由于计算机算力和算法的制约,早期的大碰撞数值模拟不能准确且稳定地给出撞击过程的细节。直到2001年,Canup和Asphaug^[3]发表在*Nature*的工作才建立了第一个被广泛接受的大碰撞数值模拟模型。该模型成功地验证了大碰撞猜想,并被称为月球形

成的标准大碰撞模型(Canonical giant impact)^[4]。该模型中早期地球受到“忒伊亚”45°方向的高速撞击,撞击产生的碎片可以在轨道上形成与当今月球质量相近的天体,而且撞击后地月系统的角动量与目前的观测结果一致(图1)。

虽然标准大碰撞模型很好地解释了地月系统的几个主要特征,但是随着对月球样品进行越来越多的高精度地球化学分析,学者发现该理论也面临着越来越多的挑战。其中最主要的挑战被称为大碰撞的“同位素危机”^[5]。对阿波罗探月任务返回的月球样品和月球陨石的同位素分析皆表明地球和月球的很多同位素(尤其是氧同位素)惊人地相似。由于天体化学界早已发现太阳系内不同区域的岩石的同位素组成差异很大,所以作为独立的星球,撞击体“忒伊亚”不太可能具有与地球一样的同位素组成,而只有形成月亮的物质主要来自于地球才能解释它们之间非常相似的同位素组成。然而,标准大碰撞模型结果却显示构成月球的物质主要来自于撞击体“忒伊亚”,而不是地球,这与同位素观测证据相悖。为了更好地解决这一矛盾,近10多年来,学界先后提出了3种大碰撞新模型,分别是碰撞-逃逸(Hit-and-run)模型^[6]、高自旋地球碰撞(Fast-spinning Earth impact)模型^[7]以及高角动量-高能量大碰撞模型^[8,9]。这几种新模型的结果都增加了组成月球的物质由地球贡献的比例,从而得以更好地解释地月同位素的一致性。但是这几个新模型带来了一些新的问题,其中最为关键的是,这些模型撞击后的地月系统角动量都高于现在的观测值^[10],而之前的经典模型并没有此问题。另外一个更令人深思的问题是,新模型,尤其是高角动量-高能量模型为原

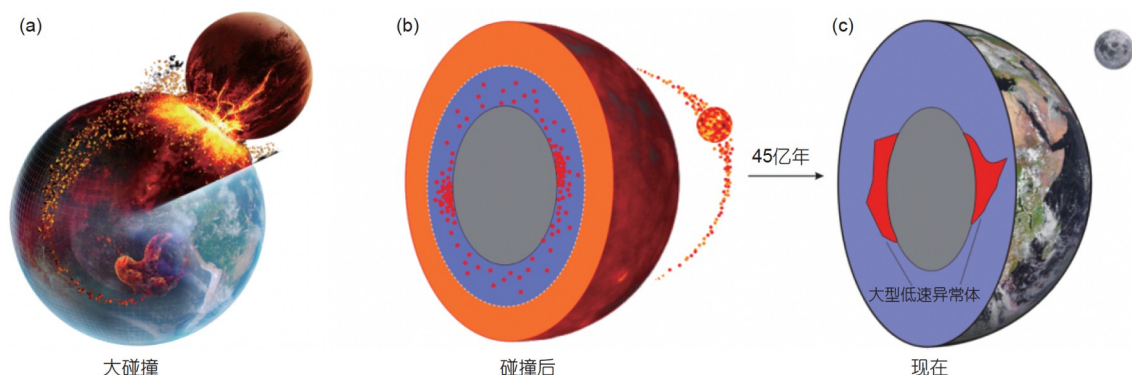


图 1 (网络版彩色) 撞击地球形成月球的“忒伊亚”行星地幔形成地幔大型低剪切波速体的演化模式。(a) 一个火星大小的原始行星“忒伊亚”以45°角撞击了原始地球；(b) “大碰撞”之后，地球的地幔呈现出了双层结构：上层主要是岩浆，呈橘红色；而下层则以固体岩石为主，其中包含了“忒伊亚”地幔的~15% (表现为红色粒子)；(c) 下层地幔中的“忒伊亚”物质由于其较重的密度迅速下沉，经历了45亿年的变迁，最终形成了现在通过地震波探测到的两个大型低剪切波速体。图片(a)来自于邓洪平及杭州思斐迩科技有限公司

Figure 1 (Color online) The formation of the large low shear velocity provinces through the mantle of Moon-forming impactor's mantle. (a) A Mars-sized protoplanet “Theia” collided with the proto-Earth at a 45° angle; (b) after the collision, Earth's mantle displayed a two-layered structure: The upper layer was primarily magma, colored orange-red; the lower layer was mainly solid rock, which contained ~15% of “Theia's” mantle (represented by red particles); (c) the Theia material in the lower mantle, due to its higher density, rapidly sank. After 4.5 billion years, it eventually formed the two large low velocity anomaly regions currently detected by seismic waves. Credit of (a): Hongping Deng, Hangzhou Sphere Studio, China

始地球注入了大量碰撞能量，这将不可避免地导致地球地幔完全熔融并混合均匀。然而，这种均一地幔的推论与众多地幔地球化学以及地球物理观测证据直接矛盾。尤其是一些洋岛玄武岩相关的稀有气体同位素证据强烈地表明地幔存在比月球年龄还要古老的物质，且大碰撞事件以及45亿年的地幔对流作用并没有将地幔充分混合^[11]。所以，如何调和碰撞理论、地月同位素一致性，以及地球地幔不均一性问题是—一个跨学科、跨领域、跨时空的重大科学问题。

在最新发表的Naure文章“Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies”中，袁迁及合作者^[12]指出，地球地幔底部观测到的两个巨大的地震波异常体可能来源于45亿年前撞击地球的“忒伊亚”行星的地幔物质。这为重新认识月球形成及地月系统早期演化提供了一个全新的视角。地震学家几十年前就发现地球地幔的底部存在两个大型地震波异常体，其中一个在非洲板块下方，另外一个在太平洋板块下方。当地震波穿过这两个区域时，地震波波速，特别是剪切波波速明显降低，一般称这两个区域为大型低剪切波速体(large low shear velocity provinces, LLSVPs)^[13]。这两个区域是地球地幔中最大的两个异常体，每一个都在核幔边界绵延几千公里，高度可达几百至上千公里^[14,15]。虽然这两个异常体在几十年前就已被地球物理学家发现，但是学界对其成因至今仍存在很大争议。经过几十年的深入研究，虽然科学家仍不能排除这两个异常区域是否仅是高温异常，但越来越多的研究者认为这两个区域是由热化学异常物质构成。这意味着它们不仅温度比周围地幔更高，而且化学成分也与周围地幔有所不同^[16]。但究竟是什么导致了这种化学成分异常还众说纷纭。鉴于它们存在于地球内部，学者通常用地

球内部的过程来解释它们的形成机制，例如俯冲洋壳的堆积^[17]、地幔底部早期岩浆海的固结过程^[18]，或者是地核和地幔的相互反应^[19]。但是，若是地球内部过程形成了这两个区域的异常化学物质，就无法很好地解释跟这些异常区域相关的洋岛玄武岩的稀有气体同位素为何具有比月球还要古老的原始地幔物质^[11]，甚至是太阳系星云物质^[20]。

综合以上证据，袁迁及合作者指出，如果大型低剪切波速体确实是撞击体“忒伊亚”行星的地幔物质，那么就可以非常好地解释这些观测到的地幔深处的古老原始物质。具体来说，该研究提出了三点主要证据来证实这个观点。首先，他们采取了当今最先进的模拟算法以更好地捕捉大撞击过程中的湍流和细微的物质混合^[21,22]，研究结果发现在标准大碰撞模型下，地球的地幔仅熔化了上半部分地幔，而下半部分地幔则依然处于固态^[21]。同时他们的模型显示，有接近地球质量2%的撞击体地幔物质，会在撞击过程中直接进入固态的地球下地幔，而这部分撞击体地幔的质量与现在通过地震学观测到的两个地震波异常体质量基本一致。其次，他们通过分析已有的地球地幔以及月球地幔模型，发现月幔具有相对更高的Fe含量。因此，如果月球物质是来源于早期地球和“忒伊亚”行星的混合物，这就要求“忒伊亚”地幔具有更高的Fe含量——这意味着其在相同的温度压力条件下会具有更高的密度。进一步的热动力学计算显示，“忒伊亚”行星的地幔高的Fe含量会导致“忒伊亚”地幔岩石比地球地幔物质重2%~3.5%。最后，他们开展了详细的全地幔对流模拟工作，发现这些在大碰撞过程中进入地球下地幔的“忒伊亚”地幔由于较高的密度，会很快下沉到核幔边界之上；此外，虽然在俯冲板块的不断交互中改变形态，但是它们在经历了地球45亿年的演化后

仍然存在于地核之上,且分散成为两个孤立的热化学异常体.模拟的这两个热化学异常体的体积与目前地震学观测到的大型低剪切波速体非常一致.接下来,他们通过热力学软件,计算了模拟的热化学异常体的地震波波速,发现它们确实要比背景地幔值低0.5%~3%,这也与现在的地震学观测相符.加上前文提到的古老稀有气体同位素证据,这4条证据共同

支持这两个探测到的大型低剪切波速体可能来源于45亿年前撞击地球形成月球的“忒伊亚”行星的地幔物质(图1).他们的这项研究调和了“大碰撞”理论与地幔不均一性的矛盾,并为解释地月同位素一致提供了新的模型依据^[21].此外,由于大碰撞事件在太阳系早期可能普遍存在,在其他石质星球的内部也可能存在类似的异常物质.

推荐阅读文献

- 1 Hartmann W K, Davis D R. Satellite-sized planetesimals and lunar origin. *Icarus*, 1975, 24: 504–515
- 2 Cameron A G W, Ward W R. The origin of the Moon. In: Abstracts of the Lunar and Planetary Science Conference, 1976. 7: 120–122
- 3 Canup R M, Asphaug E. Origin of the Moon in a giant impact near the end of the Earth's formation. *Nature*, 2001, 412: 708–712
- 4 Zhou Y, Liu Y. Advances of the research on numerical simulation for the moon-forming giant impact theory (in Chinese). *Bull Mineral Petrol Geochem*, 2017, 36: 673–686 [周游, 刘耘. 月球形成大碰撞理论的数值模拟研究进展. *矿物岩石地球化学通报*, 2017, 36: 673–686]
- 5 Melosh H J. An isotopic crisis for the giant impact origin of the Moon? In: Annual Meteoritical Society Meeting, 2009. 5104
- 6 Reufer A, Meier M M M, Benz W, et al. A hit-and-run giant impact scenario. *Icarus*, 2012, 221: 296–299
- 7 Cuk M, Stewart S T. Making the Moon from a fast-spinning Earth: A giant impact followed by resonant despinning. *Science*, 2012, 338: 1047–1052
- 8 Canup R M. Forming a Moon with an Earth-like composition via a giant impact. *Science*, 2012, 338: 1052–1055
- 9 Lock S J, Stewart S T. The structure of terrestrial bodies: Impact heating, corotation limits, and synestias. *JGR Planets*, 2017, 122: 950–982
- 10 Asphaug E. Impact origin of the Moon? *Annu Rev Earth Planet Sci*, 2014, 42: 551–578
- 11 Mukhopadhyay S. Early differentiation and volatile accretion recorded in deep-mantle neon and xenon. *Nature*, 2012, 486: 101–104
- 12 Yuan Q, Li M, Desch S J, et al. Moon-forming impactor as a source of Earth's basal mantle anomalies. *Nature*, 2023, 623: 95–99
- 13 Garnero E J, McNamara A K, Shim S H. Continent-sized anomalous zones with low seismic velocity at the base of Earth's mantle. *Nat Geosci*, 2016, 9: 481–489
- 14 Yuan Q, Li M. Instability of the African large low-shear-wave-velocity province due to its low intrinsic density. *Nat Geosci*, 2022, 15: 334–339
- 15 Ni S, Tan E, Gurnis M, et al. Sharp sides to the African superplume. *Science*, 2002, 296: 1850–1852
- 16 McNamara A K. A review of large low shear velocity provinces and ultra low velocity zones. *Tectonophysics*, 2019, 760: 199–220
- 17 Christensen U R. Influence of chemical buoyancy on the dynamics of slabs in the transition zone. *J Geophys Res*, 1997, 102: 22435–22443
- 18 Labrosse S, Hernlund J W, Coltice N. A crystallizing dense magma ocean at the base of the Earth's mantle. *Nature*, 2007, 450: 866–869
- 19 Knittle E, Jeanloz R. Simulating the core-mantle boundary: An experimental study of high-pressure reactions between silicates and liquid iron. *Geophys Res Lett*, 1989, 16: 609–612
- 20 Williams C D, Mukhopadhyay S. Capture of nebular gases during Earth's accretion is preserved in deep-mantle neon. *Nature*, 2019, 565: 78–81
- 21 Deng H, Ballmer M D, Reinhardt C, et al. Primordial earth mantle heterogeneity caused by the moon-forming giant impact? *Astrophys J*, 2019, 887: 211
- 22 Deng H, Reinhardt C, Benitez F, et al. Enhanced mixing in giant impact simulations with a new lagrangian method. *Astrophys J*, 2019, 870: 127