

## 专题26: 月球的形成和演化——基于嫦娥工程的新认识

## 大碰撞事件对地月系统的初始状态的影响

周游<sup>1,2</sup>, 刘耘<sup>1\*</sup>

1. 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 550002; 2. 成都理工大学, 成都 610059

月球形成的大碰撞假说因其能够较好地解释地月系统间一系列的重要观测事实与约束条件, 因此自确立以来, 近几十年来一直被广为接受。然而大碰撞事件不仅仅形成了月球, 同时也确定了原始地球的初始状态, 因此开展大碰撞研究不仅可以帮助我们了解月球是如何形成的, 更是理解地月系统早期状态和演化的钥匙。

大碰撞数值模拟能够提供大碰撞事件的碰撞速度、碰撞角度、碰撞体(Theia)的质量等可能的初始条件信息, 也能够提供碰撞温度、系统角动量、月球质量、物质组成(地幔与地核)、标志性元素与同位素组分(如 $\Delta^{17}\text{O}$ )等一系列的碰撞过程与碰撞结果信息。此外, 大碰撞事件也是行星形成中、后期一种非常普遍的增生事件, 开展大碰撞模拟对研究太阳系其他行星以及系外行星的形成也具有重要的价值。

一般认为在地月系统形成的中晚期, 发生了十至数十次的大碰撞事件, 在最后一次大碰撞中才形成了月球(Raymond 等, 2009)。过去对大碰撞模拟的研究都集中在月球形成的最后一次碰撞上(Canup 和 Asphaug, 2001; Canup, 2012; Čuk 和 Stewart, 2012; Reufer 等, 2012; Rufu 等, 2017), 最后一次大碰撞事件对现今地月系统具有最重要的影响, 决定了地月系统的许多重要的初始状态, 如月球的质量、地月系统角动量、月轨的离心率与轨道倾角等。但地月系统形成的最后一次大碰撞迄今仍然充满争议, 比如其碰撞方式、物质组成、初始的热状态等并无确定的认识, 甚至连碰撞角度、碰撞速度、Theia 的质量等最重要的细节在各个模型中都完全不相同, 因此从最后一次的单一碰撞来推断地月系统的更多初始状态非常困难。但地月系统仍然有一些初始状态受到晚期的十至数十次的大碰撞事件的影响。通过开展地月系统形成最后阶段不同类型的大碰撞事件的模拟研究, 我们可以得到更多关于地月系统初始状态的信息, 从而为地月系统早期演化的理论框架建立提供帮助。

我们使用的计算模拟方法叫 SPH 方法, 该方法自 1987 年 Benz 首次用于模拟大碰撞以来, 迄今仍然是大碰撞模拟的首选方法。地月系统形成的晚期阶段为原始地球从  $0.1M_{\text{Earth}}$ (火星)一直增生到  $1M_{\text{Earth}}$ (现今地球)的阶段。模拟的参数范围包括: 碰撞角度的范围为  $0^\circ\sim 90^\circ$ , 碰撞体质量范围为  $0.05\sim 0.5M_{\text{Earth}}$ , 碰撞体速度为  $1\sim 4V_{\text{esc}}$ ( $V_{\text{esc}}$  为逃逸速度), 该参数范围涵盖了晚期可能的碰撞参数范围。本研究通过对该增生阶段所有可能的碰撞进行了 240 次模拟, 对早期地月系统的一些初始状态得到一些认识。

(1) 地月系统的初始核幔化学平衡状态。大碰撞过后, 原始地球的核幔处于不平衡状态, 而原始月球的核幔则处于平衡状态。由于晚期会发生 Core-merging 碰撞事件, 原始地核会保存过量的轻元素(H、C、S、Si、O 等), 其中 Si、O 可以由地幔物质带入, 而 C、S 可以由碰撞体的核带入。

(2) 地月系统核幔边界的初始异常区域。晚期的大碰撞事件将在原始地球的核幔边界形成异常区域(ULVZs), 这些异常区域会导致核幔的导热系数异常, 进而驱动原始地球的最初

第一作者简介: 周游(1980-), 男, 副教授, 研究方向: 大碰撞模拟、行星增生动力学. E-mail: zhouyou@mail.gyig.ac.cn

\*通信作者简介: 刘耘(1968-), 男, 研究员, 研究方向: 行星增生动力学、同位素理论与计算. E-mail: liuyun@vip.gyig.ac.cn

始的地幔对流，而原始月球的核幔边界则不存在这些异常区域(ULVZs)。

(3) 地幔不均一性。如果月球形成的大碰撞是一次低能的斜碰撞(Canup 和 Asphaug, 2001; Rufu 等, 2017), 那么碰撞体 Theia 将只影响原始上地幔; 如果月球形成的大碰撞是一次高能碰撞(Canup, 2012; Čuk 和 Stewart, 2012; Reufer 等, 2012), 那么碰撞体 Theia 将影响全地幔。