

月球晚期重轰击和 Nice 模式

陈 丰¹, 王世杰^{1,2}

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. 中国科学院 地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

摘要: 晚期重轰击(一般又称为月球灾难, 简称 LHB)指的是距今约 3.8~4.1 Ga 时段月球受到大量陨石的轰击, 于月面上形成的大量撞击坑, 并推论地球、水星、金星和火星也经历了这样一次重轰击。Nice 模式是关于太阳系动力学演化的一种设想: 在初始原行星气体星盘消散之后很久, 大行星从最初紧凑的结构迁移到目前的位置。这个行星迁移理论用来解释包括内太阳系的晚期重轰击, 以及 Oort 云、Kuiper 带、海王星和木星 Trojans 行星等形成的历史事件。

关键词: 晚期重轰击; Nice 模式; 大行星; 迁移

中图分类号: P84 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2011)02-0210-05

Lunar Late Heavy Bombardment and Nice model

CHEN Feng¹, WANG Shi-jie^{1,2}

1. *The State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,*

Guiyang 550002 China; 2. *The State Key Laboratory of Environment Geochemistry, Institute of Geochemistry,*

Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: The Late Heavy Bombardment (LHB), which is commonly referred to as the lunar cataclysm, is a period of approximate from 3.8 to 4.1 Ga when a large number of impact craters are believed to have been formed on the Moon, and is inferred that have happened on the Earth, the Mercury, the Venus, and the Mars as well. The Nice model is a dynamical evolution scenario of the Solar System. It was named after the location of the Observatory of the Cote of Azur, CNRS in Nice, France, where it was initially developed. Nice model proposes that giant planets migrated from initial compact configurations into their present positions, long after the dissipation of the initial protoplanetary gas disk. This planetary migration is used to explain historical events including the Late Heavy Bombardment of the inner Solar System, and the formation of the Oort cloud, the Kuiper belt, the Neptune and the Jupiter Trojans etc.

Key words: late heavy bombardment; nice model; giant planet; migration

1 晚期重轰击

月球晚期重轰击(Late Heavy Bombardment, 简称 LHB)指的是距今约 3.8~4.1 Ga 时段在月球和太阳系内部行星(包括地球、水星、金星、火星)上发现的大量陨石轰击事件。其证据主要来自月球撞击熔融岩石样品聚集在 3.8~4.1 Ga 的年龄数据^[1]。20 世纪 70 年代中期此事件引起一些科学家

的注意^[2~4]。有人将这些月面上的强烈撞击记录称之为“月球灾难”(lunar cataclysm)。一些科学家认为这些重轰击仅持续了 20~200 Ma^[2, 3, 5~7]。

月球样品来自阿波罗和月球(克莱门汀任务)登陆点采集的撞击熔融岩石的放射性同位素年龄数据。如 Apollo-15、16 和 17 登陆点采集了靠近 Imbrium、Nectaris 和 Serenitatis 盆地的样品。这些撞击坑直径达 100 km 以上, 样品年龄显示大多数撞

收稿日期: 2009-09-25 收到

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40803019, 40873055, 40673053); 中国科学院知识创新导向项目(KZCX2-YW-110); 国家 863 项目(2008AA 12A 213)

第一作者简介: 陈丰(1933—)男, 研究员, 研究方向: 矿物学、天体化学。

击熔融岩石形成于非常窄的时间段内,分属于酒海纪和早雨海纪的两期重轰击事件。

研究表明,晚期重轰击样品的绝对年龄数据尚有争议。这主要是对取样点的地质认知,也可能涉及样品处理等深层次的问题。但总的说来,近年测定的年龄数据趋向于较年青的一端,时间上也更为集中。酒海纪轰击事件主要形成3个撞击坑。文献^[8]的作者在评述样品测定结果时指出,酒海盆地的撞击年龄倾向于3.85~3.95 Ga,而不是过去认为的4.1 Ga。Crisium坑和Serenitatis坑的年龄都接近于3.89 Ga,前者的形成时间可能稍早于后者。1980年之前普遍认为早雨海纪的年龄小于3.85~3.90 Ga,近年发表了两个年龄,认为可以定为3.85±0.02 Ga和3.77±0.02 Ga。这样,酒海期和早雨海期的撞击年龄可以确认为约3.77~3.95 Ga,虽然比文献^[9]给出的3.85~3.92 Ga稍宽,但比过去认为的年龄更年青一些。

除登陆点采集的样品外,还可以用月球陨石的年龄数据来验证。月球陨石是月球表面岩石的随机样品,其中某些样品可能源于阿波罗登陆点区域,许多长石质的月球陨石可能来自月球背面,其中一些撞击熔融的年龄更小。与上述灾难假说一样,没有一个月球陨石的年龄大于3.9 Ga^[10, 11],跨度为2.5~3.9 Ga^[12]。然而,这些数据未出现聚集峰。

晚期重轰击也曾发生在内太阳系行星上^[13]。月球高地撞击坑大小分布研究指出,晚期重轰击条件下,水星和月球受到同一族星体的发射轰击^[14]。如果水星上晚期重轰击的衰减历史与月球相近,水星上最年青的大盆地Caloris的年龄可以与月球最年青的大盆地Orientale和Imbrium相比较,水星全部平原单元老于3 Ga。南极火星陨石ALH 84001的Ar-Ar法年龄为3.92±0.04 Ga^[15],Rb-Sr法的年龄为3.90±0.04 Ga,Pb-Pb法的年龄为4.04±0.10 Ga^[16],这与灾难年龄相近。文献^[17]对月球、火星、金星和水星撞击坑尺寸分布的研究表明,它们与近地小行星带非常类似,而不同于火星与地球之间的主行星带。

假如确实有过月球灾难性的撞击事件的话,地球也理应受到过影响。如果以月球撞击速度来推断地球,这个时段形成了下列撞击坑:直径20 km以上的撞击坑22 000个或更多,直径约1000 km的撞击盆地约40个,直径约5000 km的撞击盆地数个^[13]。然而,目前地球上找到的最老的撞击坑南非Vredefort Crater(直径250 km,年龄约2.10 Ga)显然与这一事件无关。西格陵兰3.7~3.8 Ga的Isua

绿岩带中沉积-变质岩和加拿大北拉布拉多有关岩石的¹⁸²Hf-¹⁸²W系(半衰期9 Ma)研究发现,岩石中有¹⁸²Hf异常,表明它们含有来自陨石的组分^[18],可以与月球灾难事件相联系。但后来对上述岩系的⁵³Mn-⁵³Cr测定并未发现有异常^[19]。

过去常常认为,从地球形成到约3.8 Ga期间地球表面保持着熔融状态。3.8 Ga年龄是全球已知岩石中最老的年龄,并且表现为一个强烈的年龄“截止点”(cutoff point)。没有找到更老的岩石——甚至使用不同的测年方法(包括相当精确和最少受环境影响的方法,如锆石的U-Pb测年)也没有发现比3.8 Ga更古老的岩石。所以,时常假定直到3.8 Ga地球长期保持着熔融状态,3.8 Ga是早期冥古宇与后来的太古宇之间的分界点。

然而,找到过3.8 Ga以上年龄的陨石,这说明小行星或星子的年龄大于3.8 Ga。而陨石上也有一个强烈的截止点。时常假定约4.56 Ga为围绕年青太阳的原行星盘上形成的第一批固体(岩石)的年龄。从这个观点出发,冥古宇是从地球形成到大约600 Ma后地壳最后固化之间的时段。这个时段包括从星盘内行星增生,到它的撞击星体重力潜能被释放,再到缓慢冷却形成地壳。

近年,地壳形成于3.8 Ga的观点受到了质疑。计算表明,物体重力能释放和冷却速度依赖于物体大小,再考虑地球的尺寸和质量,实际冷却过程应该进行得很快,快到完成于约100 Ma的时段之内。当然,测定与理论之间在时间上的差别常常是个谜。

晚期重轰击被用来重新解释上述过程。按照上述模式,3.8 Ga的岩石年龄表示地壳为被轰击破坏后的再固化年龄。北美克拉通地盾Acasta地区和西澳Narryer片麻岩中的Jack Hills被认为是地球最老的大陆碎片,形成于晚期重轰击之后。如西澳Yilgarn克拉通Narryer山变质石英岩和Jack山变质砾岩的锆石U-Pb法年龄为4.14 Ga^[20]。这个地区还用锆石离子探针给出²⁰⁷Pb/²⁰⁶Pb的4404±8 Ma年龄;它的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为5.0‰~7.4‰^[21],与花岗岩岩石熔体生长的石英 $\delta^{18}\text{O}$ 值(8.5‰~9.5‰)相近^[22]。西澳大利亚Murchison District地区也得到过3 Ga年龄石英岩中的锆石原位测定U-Pb和O同位素:前者为3910~4280 Ma, $\delta^{18}\text{O}$ 值为5.4±0.6‰~15.0±0.4‰^[23];结合其他矿物证据,表明4.2 Ga前就已经有水圈了^[24]。

显然,地球上的最古老的矿物年龄至今仍是Jack Hills的锆石,但这只不过是经历这次重轰击事件后的地壳碎片,被包含在更年青(约3800 Ma)

的岩石之中。虽然,有地质学家确认加拿大魁北克找到的 4.28 Ga 古老岩石^[25]。

这些认知导致对冥古宇这个地球早期历史的某些革新。较老的参考书一般认为冥古宇时地球有一个有火山的近熔融表面,冥古宇的名称影射这个时段地球处于“地狱”般的环境。现在则认为除了早期冥古宇,其后的大部分时段中冥古宇的地表是固体,有适度的偏酸性水的覆盖。显然,晚期重轰击肯定要对地球的水圈产生巨大影响。

对生命而言,晚期重轰击既可能是地球生命的起源,也可能是生命的浩劫,以至于生命的灭绝。如果生命形成于晚期重轰击之后,或者是更早期生物的幸存。那么,文献[26]提出的格陵兰沉积岩中的碳同位素比是有机物遗迹的设想引起了人们的兴趣,他认为这些沉积岩的年龄约为 3800 Ma^[27],而其他人认为可能是 3600 Ma 更“适中”些。如果 Schidlowski 的数据是精确的,那么,晚期重轰击引起生命起源的设想显然时间太短了,更可能的是在晚期重轰击下的幸存物的早期生物。研究表明, Schidlowski 找到的岩石年龄确实是 3850 Ma 左右的较老的一端,可能后一种答案更合适一些。最近西澳 Jack Hills 岩石的类似研究也显示当时可能有生命的信息:4250 Ma 年龄的锆石中有少量的金刚石和石墨的微量碳,通常是生命“过程”信号的¹²C/¹³C异乎寻常地高^[28]。这些岩石锆石的离子探针剖面年龄近于 3.9 Ga,与月球灾难的年龄一致^[29]。

那么,生命能否历经晚期重轰击的劫难而幸存呢?有人用三维计算机模式以 16S 小准单元核糖体 RNA8 模拟水热细菌,认为地壳上的微生物能免于轰击。他们建立的模式指出,虽然撞击十分强烈,地球表面已灭菌,但地表以下的水热排出口为亲热水微生物提供了避难所,从而使生命得以延续^[30]。

晚期重轰击的主要特征:

(1)行星形成的晚期有一次大规模的重轰击事件,遍及月球和类地行星。它不同于一般行星撞击增生形成理论所说的行星形成后轰击事件的数量和质量简单地随时间呈指数式衰减的看法,而是出现一个明显的峰值。至于其前的轰击状况,尚有待月球取样来查明。

(2)晚期重轰击是冥古宇的最后一幕。冥古宇时地球表面不是处于长期熔融状态,而是已冷凝成固相,出现了海洋。晚期重轰击可能造成地球表面的大面积破碎和熔融,使原有岩石大规模重组,表现为一次重大的同位素分馏。

(3)晚期重轰击使地球的水圈和大气圈发生重大变化。其撞击和重力能的释放,使海洋和地表水蒸发,甚至逃逸出地球之外;重轰击使地壳和地幔的岩石再次熔融,出现地表喷流,释放出岩浆水;而重轰击物质中的小行星,特别是彗星又带来了大量太阳系的原始水。不过,晚期重轰击造成的地球水圈收支状况尚不清楚。

(4)关于地球上的生命起源,天文学家比较钟爱彗星有机物带来生命的设想;然而,约 3.85 Ga 的晚期重轰击峰值与最古老的近于 3.8 Ga 或超过 3.8 Ga 的古生物遗迹和地球化学证据,似乎时间上不能匹配;而更可能的是,冥古宇已经有生物活动,晚期重轰击对这些生物显然是一场浩劫。

近年有关月球灾难的假说日益流行,动力学家力图查明这些现象的可能起因。不过,这个假说仍然颇有争议,因为它的前提假定就有争议。主要的批评意见有:1)撞击年代的“群集”现象可能是所分析的样品属于单一盆地的喷射物;2)尚未找到老于 4.1 Ga 的撞击熔岩。

第一种批评意见涉及撞击熔融岩石的成因。月球样品主要取自阿波罗飞船的三个登陆点。一般认为撞击熔融源自最靠近的盆地。反对者认为,它们实际上不是邻近盆地撞击形成的,而是 Imbrium 盆地的撞击结果^[31]。Imbrium 盆地是在近地球一侧的中心找到的最年青的最大的多环盆地,对它的定量模式研究显示这个事件造成的巨大数量喷出物应当出现在阿波罗飞船的所有登陆点上。另一种类似的设想是近于 3.9 Ga 的撞击熔融年龄简单反映为单一 Imbrium 撞击事件或几个撞击事件的叠加。

第二种批评意见针对缺乏老于 4.1 Ga 的撞击熔岩。他们认为可能存在一种与灾难无关的古老熔岩,但它们的年龄被过去 40 亿年的撞击坑的持续作用所重置。或者可能这些样品被磨成那么小的粒度,使标准的放射性测年方法不能给出年龄。

虽然已经有许多假说用小行星或彗星物质向内太阳系的流动来解释晚期重轰击造成的轰击峰值,但众说纷纭,莫衷一是。近年,天文学家提出了一个比较受欢迎的理论模式——Nice 模式。

2 Nice 模式

这是太阳系行星系统动力学演化的一个模式。它的创新点见于《Nature》上同时发表的三篇论文,4 位作者是 Gomes, Levison, Morbidelli 和 Tsiganis^[32~34],这一模式以他们工作的法国国家科学研究中心天文台 Cote Azur 观测所的地点 Nice 命名。

他们认为,在初始原行星气体星盘消散后很久,太阳系行星系统从初始密集的组构迁移到它们目前的位置。这一理论不同于其他早期的太阳系模式,是用太阳系动力学来模拟行星迁移解释内太阳系的晚期重轰击事件、Oort 云的形成和包括 Kuiper 带、海王星和木星 Trojans 小行星带,以及超海王星物质(trans-Neptunian object, TNO, 与太阳平均轨道距离大于海王星的太阳系物体)等太阳系小星体的集居数,从而成功地再现了太阳系的观测特征。目前它已被广泛接受,成为流行的太阳系早期演化最现实模式,但行星科学家尚未普遍理解。

Nice 模式认为在原始太阳系星盘中的气体和星尘基本消散之后,四个大行星(木星、土星、天王星和海王星)最初约处于 5.5~17 AU 范围的近圆形轨道上,比它们目前的状况更为紧密。围绕这些大行星的是岩石和冰的星子和大的星盘,它们的总质量约有 35 个地球(质量),延伸到大行星之外距太阳约 35 AU 的范围内。

行星系统以下列方式演化:最外侧大行星——海王星通过引力与星盘中海王星外侧星子相互作用,改变了行星和星子的轨道。行星与散射星子交换角动量,向内散射与它发生作用的大多数小星子;而行星在谐振中向外运动,以保存系统的角动量。随后这些星子与第二个行星进行类似的相互作用。这样,使海王星、天王星和土星接连向外运动。尽管每次交换角动量所产生的运动位移是微小的,这些星子位移的累积。就是迁移,使星子和行星轨道有明显的数量变化。这个过程持续地进行,直到星子与最内和质量最大的行星——木星发生相互作用,引力使星子进入高椭圆轨道,并立即把它们从太阳系向外喷射。与之相应,木星轻微向内运动。

轨道引力接触的低速度给出星子从星盘移出的速度,这相应于迁移的速度。在数百个百万年缓慢渐进的迁移之后,木星和土星这两个最内部的大行星进入(cross)它们共有的 1:2 平均谐振运动轨道。谐振提高了它们的轨道偏心率,使整个行星系统变得不稳定。大行星的排布迅速发生引人注目的改变,木星移动土星向外朝向它现在的位置,由于在土星与两个海王星和天王星之间的引力接触使两者再次迁移,使之推动海王星和天王星进入更偏心的轨道。然后,海王星和天王星费力地进入星子星盘,散射上万个星子,把它们从原来的位置向太阳系外部的稳定轨道上迁移。这差不多完全破坏了原始星盘,移出它的 99% 的质量。这个设想解释了目前的密集超海王星物质集居体。其中某些星子被抛入太

阳系内部,产生了意想不到的类地行星上的撞击流和月球的晚期重轰击。

最终,大行星到达它们目前轨道的半主轴位置,再与残存星子星盘发生动力学摩擦,改变它们的偏心率和再一次构建天王星和海王星的环形轨道。

欲模拟太阳系的长期历史,必须有一个不同初始条件的太阳系连续动力学模式,能在太阳系内产生物体的各种集居数配置。正如模式的初始条件可以允许变化一样,每个集居数都有或多或少的量值和各自的轨道性质。论证太阳系早期演化模式是困难的,因为人类不可能直接观察到演化的进程。然而,任何动力学模式的成功与否,都可用模拟的预测集居数与天文学实际观察到的集居数相比较来判断。以 Nice 设想的初始条件为基础的太阳系计算机模式,能较好的与太阳系的许多观测值相符合。

Nice 模式的要点:(1)木星、土星、天王星和海王星处于 5.5~17 AU 范围的近圆形轨道上,其周围是星子和星盘,星子和星盘的总质量约有 35 个地球质量,延伸距太阳约 35 AU 的范围内。(2)海王星通过引力与海王星外侧星子相互作用,向内散射大多数小星子;而海王星向外运动。(3)天王星与星子相互作用,向内散射大多数小星子;而天王星向外运动。(4)土星与星子相互作用,向内散射大多数小星子;而土星向外运动。(5)木星与星子和土星、天王星和海王星相互作用,向内散射大多数小星子;而木星向外运动。(6)木星和土星进入其共有的 1:2 平均谐振运动轨道。谐振提高了它们的轨道偏心率,使整个行星系统变得不稳定。木星移动土星向外,移动海王星和天王星向外,推动大部分星子向外,某些星子向内,产生了类地行星上的撞击流和月球的晚期重轰击。(7)木星、土星、天王星和海王星到达它们目前轨道位置,再一次构建它们的环形轨道。

参考文献 (References):

- [1] Norman M D. The Lunar Cataclysm: Reality or "Mythconception"? [J]. *Elements*, 2009, 5: 23—28.
- [2] Tera F, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. A lunar cataclysm at ~3.95 AE and the structure of the luna crust [J]. *Lunar Planet. Sci. Conf.*, 1973, 4: 723—725.
- [3] Tera F, Papanastassiou D A, Wasserburg G J. Isotopic evidence for a terminal lunar cataclysm [J]. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1974. 22: 1—21.
- [4] Turner G, Cadogan P H, Yonge C J. Argon selenochronology [J]. *Proc. 4th Lunar Sci. Conf.*, 1973, 4: 1889—1914.
- [5] Ryder G. Lunar samples, lunar accretion and the early bom-

- bardment of the Moon [J]. *EOS Trans. AGU*, 1990, 71 (313): 322—323.
- [6] Dalrymple G B, Ryder G. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age spectra of Apollo 15 impact melt rocks by laser step-heating and their bearing on the history of lunar basin formation[J]. *J. Geophys. Res.*, 1993, 98: 13085—13095.
- [7] Dalrymple G B, Ryder G. Argon-40/Argon-39 age spectra of Apollo 17 highlands breccia samples by laser step heating and the age of the Serenitatis basin[J]. *J. Geophys. Res.*, 1996, 101: 26069—26084.
- [8] Stofler D, Ryder G, Ivanov B A, Artemieva N A, Cintala M J. Cratering History and Lunar Chronology [A]. In: *New views of the Moon*. Ed. Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, Neal C R. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry* [C]. 2006, 60: 519—596.
- [9] Cohen B A. Lunar Meteorites and the Lunar Cataclysm[Z]. 2001, <http://www.psr.d.hawaii.edu/PSRDabout.html>
- [10] Cohen B A, Swindle T D, Kring D A. Support for the Lunar Cataclysm Hypothesis from Lunar Meteorite Impact Melt Ages[J]. *Science*, 2000, 290: 1754—1755.
- [11] Daubar I J, Kring D A, Swindle T D, Jull A J T. Northwest Africa 482: A crystalline impact melt breccia from the lunar highlands[J]. *Meteoritics Planet. Sci.*, 2002, 37: 1797—1813.
- [12] Hartmann W K, Quantin C, Mangold N. Possible long-term decline in impact rates; 2. Lunar impact-melt data regarding impact history[J]. *Icarus*, 2007, 186: 11—23.
- [13] Kring D A, Cohen B A. Cataclysmic bombardment throughout the inner solar system 3.9—4.0 Ga[J]. *J. Geophys. Res.*, 2002, E107: 5009, 10.1029/2001JE001529.
- [14] Strom R G. Mercury: A post-Mariner 10 assessment[J]. *Space Science Reviews*, 1979, 24 (1): 3—70.
- [15] Turner G, Knott S F, Ash R D, Gilmour J D. Ar-Ar chronology of the Martian meteorite ALH84001: Evidence for the timing of the early bombardment of Mars[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1997, 61: 3835—3850.
- [16] Borg L E, Connelly J N, Nyquist L E, Shih Chi-Y, Wiesmann H, Reese Y. The Age of the Carbonates in Martian Meteorite ALH84001[J]. *Science*, 1999, 286: 90—94.
- [17] Strom R G, Malhotra R, Ito T, Yoshida F, Kring D A. The Origin of Planetary Impactors in the Inner Solar System[J]. *Science*, 2005, 309: 1847—1850.
- [18] Schoenberg R, Kamber B S, Collerson K D, Moorbath S. Tungsten isotope evidence from 3.8 Gyr metamorphosed sediments for early meteorite bombardment of the Earth[J]. *Nature*, 2002, 418: 403—405.
- [19] Frei R, Rosing M T. Search for traces of the late heavy bombardment on Earth—Results from high precision chromium isotopes[J]. *Earth and Planetary Sci. Letters*, 2005, 236: 28—40.
- [20] Amelin Y, Lee D C, Halliday A N, Pidgeon R T. Nature of the Earth's earliest crust from hafnium isotopes in single detrital zircons[J]. *Nature*, 1999, 399: 252—255.
- [21] Wilde S A, Valley J W, Peck W H, Graham C M. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago[J]. *Nature*, 2001, 409: 175—178.
- [22] Peck W H, Valley J W, Wilde S A, Graham C M. Oxygen isotope ratio and rare elements in 3.3 to 4.4 Ga zircons: ion microprobe evidence for high- ^{18}O continental crust and oceans in the Earth Archean [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2001, 65: 4215—4229.
- [23] Mojzsis S J, Harrison T M, Pidgeon R T. Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago[J]. *Nature*, 2001, 409: 178—181.
- [24] Maas R, Kinny P D, Williams I S, Froude D O, Compston W. The Earth's oldest known crust: A geochemical and geochronological study of 3940—4200 Ma old detrital zircons from Mt. Narryer and Jack Hills, Western Australia[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1992, 56: 1281—1300.
- [25] O'Neil J, Carlson R W, Francis D, Stevenson R K. Neodymium-142 Evidence for Hadean Mafic Crust[J]. *Science*, 2008, 321: 1828—1831.
- [26] Schidlowski M, Appel P W U, Eichmann R, Junge C E. Carbon isotope geochemistry of the 3.7×10^9 yr-old Isua sediments, West Greenland: implications for the Archean carbon and oxygen cycles [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1979, 43: 189—199.
- [27] Schidlowski M. Carbon isotopes as biogeochemical recorders of life over 3.8 Ga of Earth history: evolution of a concept [J]. *Precambrian Research*, 2001, 106: 117—134.
- [28] Menneken M, Nemchin A A, Geisler T, Pidgeon R T, Wilde S A. Hadean diamonds in zircon from Jack Hills, Western Australia[J]. *Nature*, 2007, 448: 917—921.
- [29] Trail D, Mojzsis S J, Harrison T M. Thermal events documented in Hadean zircons by ion microprobe depth profiles [J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2007, 71: 4044—4065.
- [30] Abramov O, Mojzsis S J. Microbial habitability of the Hadean Earth during the late heavy bombardment[J]. *Nature*, 2009, 459: 419—422.
- [31] Haskin L A, Korotev R L, Rockow R L, Jolliff B L. The case for an Imbrium origin of the Apollo thorium-rich impact-melt breccias[J]. *Meteorit. Planet. Sci.*, 1998, 33: 959—979.
- [32] Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, Morbidelli A. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets[J]. *Nature*, 2005, 435: 466—469.
- [33] Tsiganis K, Gomes R, Morbidelli A, Levison H F. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System[J]. *Nature*, 2005, 435: 459—461.
- [34] Morbidelli A, Levison H F, Tsiganis K, Gomes R. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System [J]. *Nature*, 2005, 435: 462—465.