

月球南极艾特肯盆地的地质特征: 探索月球深部的窗口

张 健^{1,2}, 缪秉魁^{1,2}, 廖庆园¹, 荆 元¹, 王 辉¹

1. 桂林理工大学 地球科学学院, 广西 桂林 541004;

2. 桂林理工大学 广西地质工程中心重点实验室, 广西 桂林 541004

摘 要: 月球南极艾特肯盆地(South Pole-Aitken Basin, 简称 SPA 盆地)是月球上规模最大、最古老的撞击盆地,形成于 43~39 亿年前的前酒海纪。巨大的撞击可能挖掘出下月壳甚至月幔的物质,因此,它是探索月球深部物质组成的重要窗口。

本文通过对 SPA 盆地地貌和构造特征、物质组成及其分布特征,以及形成机制等方面的分析,综述了艾特肯盆地的地质特征,探讨了 SPA 盆地对探索早期月球形成演化历史的意义。

关 键 词: SPA 盆地; 撞击坑; 月球

中图分类号: P184.6 文献标识码: A 文章编号: 1007-2802(2011)02-0234-07

The Geological Characteristics of the South Pole-Aitken Basin on the Moon: the Window to Explore the Deep Composition of the Moon

ZHANG Jian^{1,2}, MIAO Bing-kui^{1,2}, LIAO Qing-yuan¹, JING Yuan¹, WANG Hui¹

1. College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004; 2. Key Laboratory of Geological Engineering Center of Guangxi, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China

Abstract: The pre Nectarian south pole-Aitken (SPA) basin, which was formed 43–39 Ma ago, is the largest and the oldest impact basin on the moon. This basin may contain materials excavated from the low crust and even from the mantle of the moon. So SPA basin is an important window for exploring the deep components of the moon. We summarized the general characteristics of SPA on the basis of characteristics analyzing of topography, geological structures, petrological composition, distribution of crust components, and then discussed the significance of SPA in the early formation history of the moon.

Key words: Aitken basin; impact; moon

月球南极艾特肯盆地(south pole Aitken basin, 简称 SPA 盆地)位于月球背面,主体范围从月球的南极延伸到艾特肯月坑(Aitken Crater)(图 1)。与月球上的其他撞击盆地相比,SPA 盆地最显著的特征是年龄非常古老(43~39 亿年前酒海纪)和规模巨大(直径 2000~2600 km)。它最早形成于月球早期一次巨大的撞击事件,但该地区被看成是月球上一个撞击盆地的观点直到近年才得到证实和认可^[1,2]。它这么晚才得到认可的原因是:1)由于

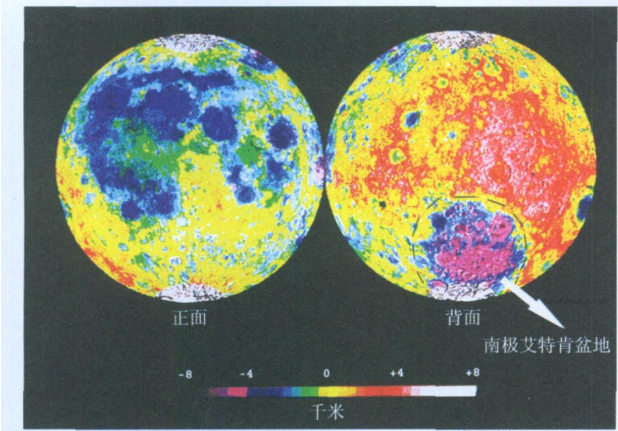
观测技术的限制,到最近人类才能观测它所在的月球背面;2)它形成于月球的早期,在它形成之后,其形貌受到后期大量撞击事件的改造,特别是它的边界难以确定;3)理论上难以解释一般的撞击作用能形成如此规模的大盆地。所以直到 1992 年伽利略飞行器获得它的图片之后,方知月球背面有这样一个富含铁镁物质^[2]的 SPA 盆地。随着研究的深入,也得到愈来愈多有关 SPA 盆地挖掘物质来源和形成模式的证据^[3~5];克莱门汀号返回的可见光、紫外

收稿日期: 2010-07-29 收到, 2011-01-10 改回

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KGCX2-YW-409); 广西研究生教育创新计划资助项目(2010105960709M10)

第一作者简介: 张健(1985—),男,硕士研究生,专业方向: 月质学与地球化学。E-mail: zhangjian850523@163.com

通讯作者: 缪秉魁(1966—),男,教授。E-mail: miaobk@glute.edu.cn



图像来源: [Http://www.Lpi.Usra.Edu/from](http://www.Lpi.Usra.Edu/from)
[Http://www.Lpi.Usra.Edu/](http://www.Lpi.Usra.Edu/)

图 1 全月球地形图

Fig.1 Global Topography of the moon

光、红外光等光谱数据, 为研究它的 Fe、Ti 元素分布奠定了基础。

SPA 盆地之所以成为研究的重点, 得益于如下几个原因: 1) 它是月球上规模最大、最古老的撞击盆地; 对它的研究有可能揭露下月壳甚至上月幔的物质状况, 因此它是研究月球深部物质组成的重要窗口。2) 该盆地地势低(与周围高地高差达 13 km)、月壳较薄, 不论是按照月海玄武岩起源的被动模式还是主动模式, 都应该出现大量的月海玄武岩^[6]。而目前的数据尚不能作为盆地有大量玄武岩的有力证据。而缺乏大量玄武岩的情况可能对月球的热历史演化和早期分异过程具有某种指示意义。3) SPA 盆地中的月坑与月海撞击坑的比较表明, SPA 盆地中的撞击坑退化程度低, 完整性好, 也未见具辐射纹系统的撞击坑^[7]。因此它的形成、演化、地貌和地球化学特征与其他地区都有明显的差异。4) 位于月球南极圈之内的 SPA 盆地中有一些从无阳光照射的阴影区, 从理论上讲, 这些撞击坑可能会保存有水冰^[8]; 这一假设如得到证实, 将有可能在月球上建立供水和制造氧气、氢气的基地。

本文总结了 SPA 盆地的研究成果, 综述了盆地的形貌和构造、物质组成和分布特征, 讨论了它的形成机制及其对月球形成、演化过程的影响。

1 SPA 盆地的地质背景

SPA 盆地形成于 43~ 39 亿年的前酒海纪, 从月球的南极延伸到直径 135 km 的 Aitken 月坑, 是太阳系中规模最大、最古老的撞击盆地^[9] (图 1)。由于后期撞击构造的叠加和破坏, 它的外形轮廓和中心位置一直争论不休。最早有人认为他的直径为

2000 km, 盆地中心位于(50° S, 180° E) 附近^[1]。后来有人认为它是一个巨大的盆地, 并将其划分为内外两个环: 外环直径 2500 km, 中心经纬度为 56° S, 180° E; 内环直径为 1800~ 2000 km^[10]。而另一些人认为盆地的直径应为 2600 km, 中心位于 60° S, 180° E 附近^[11]。根据历年对 SPA 盆地外环直径和中心位置的确认(表 1), 我们发现它的中心纬度应在 40° S ~ 60° S, 中心经度应为 180° 附近, 直径达 2000~ 2600 km。

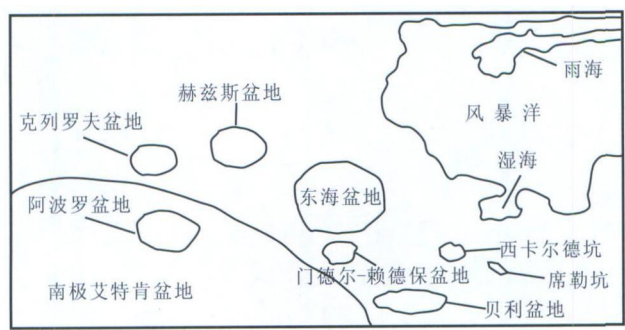
表 1 南极艾特肯盆地直径和中心位置

Table 1 The diameter and the center location of the south pole Aitken basin

外环直径 (km)	外环中心坐标		参考文献
	纬度(°)	经度(°)	
2000	180	50S	[1]
2500	180	56S	[10]
2600	180	60S	[11]
2200	176. 5E	41. 5S	[14]
—	170E	56S	[15]
2400	174W	55S	[16]
3500	180	60S	[17]

从月球照片判断, 月球背面 SPA 盆地附近还有许多盆地。SPA 盆地与附近盆地的相对位置如图 2 所示。SPA 盆地北东方向的阿波罗盆地也有两个主要的环, 外环直径为 505 km, 内环直径为 250 km, 形成于前酒海纪的一次撞击事件^[1]。形成于前酒海纪的 Mendel Ryberg 盆地和 Bailey 盆地位于东海(Orientale)盆地的南部, 盆地中覆盖了后期东海盆地溅射物。Mendel Ryberg 盆地内环直径为 200 km, 由于时代久远外环边界不是很清楚。Bailey 盆地的外环和内环直径分别为 300 km 和 150 km^[10]。Hertzprung 盆地位于东海盆地北西方向, 内环直径为 265 km, 外环直径 570 km^[12]。东海盆地直径在 930 km 左右, 有可能挖掘了月壳深部甚至上月幔物质。在东海盆地内部分布有低铁的斜长岩或斜长苏长岩月壳成分物质, 其溅射物可能来源于月壳上部和月壳中部的物质^[13]。因此, 通过比较发现 SPA 盆地周围的盆地具有直径大、年代老的特点, 他们几乎与 SPA 盆地属于同一年代(前酒海纪), 或者是酒海纪(除东海盆地属雨海纪外)。

SPA 盆地中还有许多后期叠加的撞击坑或盆地。如盆地内部的 Ingenii 月坑、Schrödingner 月坑和 Planck 月坑, 盆地边缘的 Keeler Heaviside 月坑和 Australe 月坑等(图 3)。在这些撞击坑的形成时, 既有各自撞击产生物质的堆积, 又挖掘了 SPA



据文献[18]

from ref. [18]

图2 南极艾特肯盆地的相对位置

Fig. 2 The relative position of the South Pole Aitken Basin

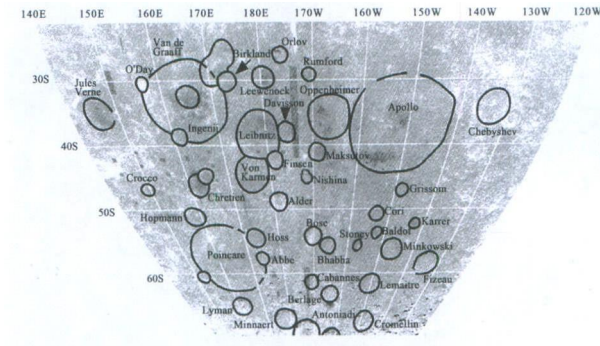
盆地溅射物质的堆积。例如, 酒海纪的 Ingenii 坑 (直径 325 km) 和前酒海纪的阿波罗盆地都有 SPA 盆地的溅射物质新带入的物质。因此, 研究 SPA 盆地中的月坑或盆地有助于了解月球从前酒海纪到雨海纪所经历的一系列撞击事件, 也提供了划分月球地体构造和地质年代的依据。

2 SPA 盆地的地球化学特征

各类月球探测器的探测数据表明, SPA 盆地具有独特的地球化学特征。图 4、图 5 是它的 Fe、Ti 和 Th 的分布图。从图 4 中可以看出, SPA 盆地是月球背面 FeO 和 TiO₂ 异常区域, 且 FeO 的含量从盆地中央到盆地边缘逐渐降低。总的来说 SPA 盆地含有较高的 Fe、Th、Ti 元素, 盆地内的 FeO 含量较周边高地高出 7%; 其内部有些地方的 TiO₂ 含量有增强的现象且显示出较高的 Th 和 K 值^[20, 21]。

根据不同月球岩石类型的 FeO 和 TiO₂ 关系分析(图 6) 发现, SPA 盆地的 FeO 平均含量约 10 wt%, TiO₂ 平均含量约 0.5 wt%。FeO 含量最高的是(图中红色)月海玄武岩(15 wt% ~ 25 wt%), 它是由熔岩溢出月表所致, 主要分布在月球正面的月海地区; (图中蓝色)月球高地火成岩的 TiO₂ 含量非常低, FeO 含量最高达 10 wt%; SPA 盆地岩石平均成分在图 6 中的投点在月球正面岩石样品的下方, 在月球高地火成岩和模拟月幔岩石样品的上方。根据上述 SPA 盆地 Fe、Ti 含量的关系, 有人认为 SPA 盆地的物质成分既不属于月球的主要岩石类型, 也不是月幔物质, 将 SPA 盆地中高 FeO 含量解释为月幔物质的加入, 并认为盆地底部物质是由月壳下部和上月幔物质混合组成的^[22]。

然而, 上述观点遭到了众多同行的质疑。譬如有人假设上述观点成立, 然后通过各种方法手段希



据文献[19]

from ref. [19]

图3 南极艾特肯盆地中主要月坑和盆地

Fig. 3 The main craters and basins in the South Pole Aitken Basin

望能在盆地之间找到月幔物质(如橄榄石之类的矿物^[24]), 但是没有成功。还有人提出质疑: SPA 盆地中的一些物质只是深部物质的分异产物, 不能代表盆地的整体平均成分^[25]。此外, 盆地 FeO 丰度的研究表明有些物质可能来自月幔上部, 而从 Th 的丰度角度看它们又可能来自月壳的下部^[25]。

3 SPA 盆地中的岩石分布

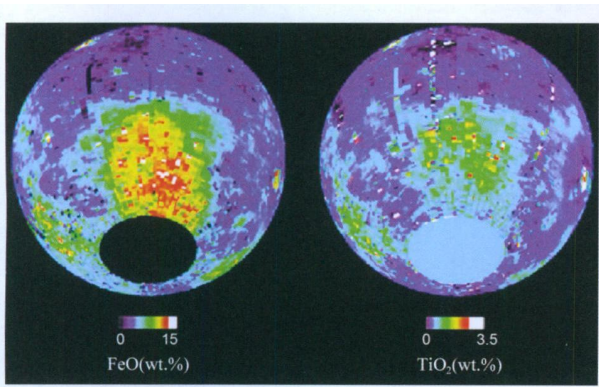
SPA 盆地中的岩石以斜长岩和斜长质苏长岩为主, 玄武岩和橄长岩很少^[19]。

图 7 是利用克莱门汀 415 nm、450 nm、950 nm 波段数据所做的比值波段假彩色合成图。分析图中的岩石分布情况得知, 斜长岩物质集中分布在 SPA 盆地中的阿波罗、Ingenii 和 Poincare 盆地。盆地东部未见有斜长岩。苏长岩是 SPA 盆地中最重要的铁-镁物质, 其中的低钙辉石(图 8 中的红色部分), 并不是分布在一两个月坑中, 而是遍布整个 SPA 盆地中。苏长岩是研究盆地中物质来源的主要依据。

尽管 SPA 盆地地势较低、地壳较薄, 但并没有被月海玄武岩覆盖, 仅在某些撞击坑中有月海物质^[26]。如阿波罗盆地南部地区(中心 41.8°S, 154°W)有少量含 Ti 高的月海玄武岩, 盆地西北部的 Chr tien 月坑(中心 45.9°S, 162.9°E)中有 Ti 的丰度介于高钛玄武岩和低钛玄武岩之间的月海玄武岩(未曾获取过这种类型的样品), SPA 盆地中央 Antoniadis 月坑(中心 69.7°S, 172.0°W)中有最年轻的月海物质^[1]; 此外, Oppenheimer 月坑和 Schr L-dinger 盆地中发现有 FeO、TiO₂ 丰度很高的物质, 很可能是年轻火山碎屑沉积物的覆盖区。

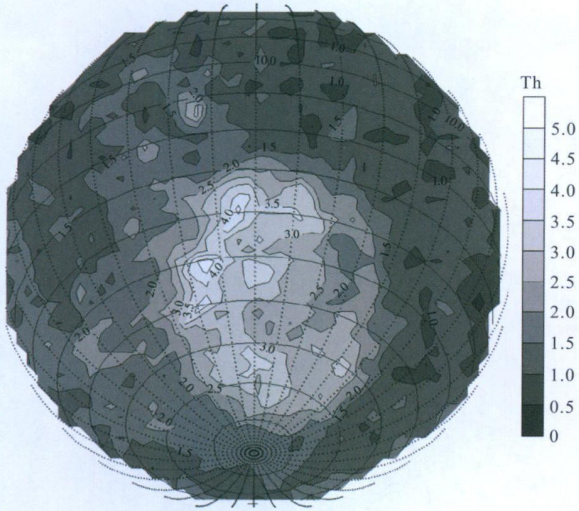
4 SPA 盆地的构造

有人认为 SPA 盆地是圆环形的, 有人则认为是



据文献[22]
from ref. [22]

图4 南极艾特肯盆地的FeO和TiO₂丰度图
Fig. 4 Image of FeO and TiO₂ abundances
of the south pole Aitken basin



据文献[17]
from ref. [17]

图5 艾特肯盆地的Th元素丰度图
Fig. 5 Image of Th abundance of
the south pole Aitken basin

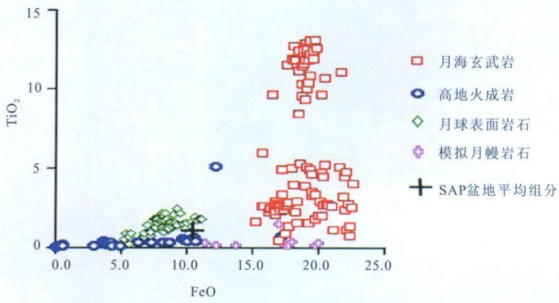
椭圆形的。

文献[16]和[27]的作者将整个盆地划分为从外到中心的三个建造层或环形台阶^[16](图8): 1环是最外面的一环, 直径约2400 km, 与高地有3~4 km的落差。2环的直径约2100 km, 与1环的高差为2~3 km, 这个环中的一部分被后来的阿波罗撞击盆地所覆盖。3环包围了SPA盆地最深的部位, 高程比2环和3环之间的区域低2~3 km。

文献[23]的作者和其他一些科学家坚持SPA盆地外形是椭圆形的观点。他们圈定了盆地的地形界线和Fe、Th含量界线(图9), 认为SPA盆地和其中月坑的形状都有相同的方位角和几乎相同的中心(方位), 以及相似的偏心率(表2), 长短轴分别是

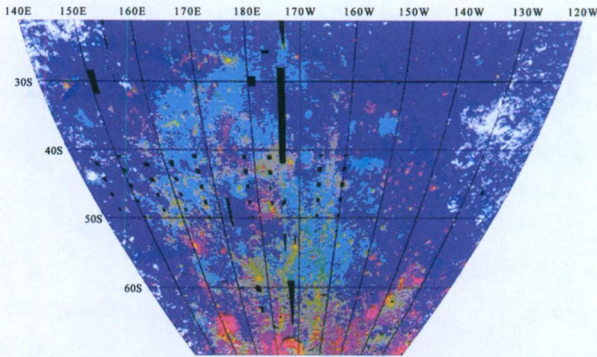
2400 km与2050 km^[23, 28]。

文献[17]的作者将SPA盆地分为四个环(图10): 0环是盆地的外环, 几乎呈圆形, 直径为3500 km。1环呈椭圆型, 中心较外环偏南, 长轴半径约970 km, Fe的丰度为4.0%~5.5%, 与阿波罗-16采回的角砾岩(Fe 3.88%)和月球-20(Fe 5.81%)登陆点的月岩样品Fe的丰度相近。Th的丰度为 $(1.5 \sim 2.0) \times 10^{-6}$ 。这一区域的主要物质成分被认为是月壳的上部成分。2环呈椭圆形, 长轴半径640 km, 中心较外环更加偏南。它的Fe和Th的丰度超过5.5%和 2.5×10^{-6} ; 被认为是月壳中部和下部的物质成分。3环的形状接近于圆形, 半径约210 km, 中心偏离外环中心以南730 km。



据文献[23]
from ref. [23]

图6 不同月岩中FeO和TiO₂关系对比图
Fig. 6 Correlation between the values of FeO
and TiO₂ in the different lunar rocks



蓝色为成熟月壤或斜长岩物质, 红色或橘红色为苏长岩物质, 黄色或绿色为辉长岩或橄辉石物质, 黑色为数据空白区; 据文献[19]

Blue represents maturity or anorthosite regolith material;
Red or orange represents norite; Yellow or green
represents olivine or gabbro material; Black
represents areas of data gaps; from ref. [19]

图7 SPA盆地中岩石矿物分布图
Fig. 7 The distribution image of rocks and
minerals in the SPA basin

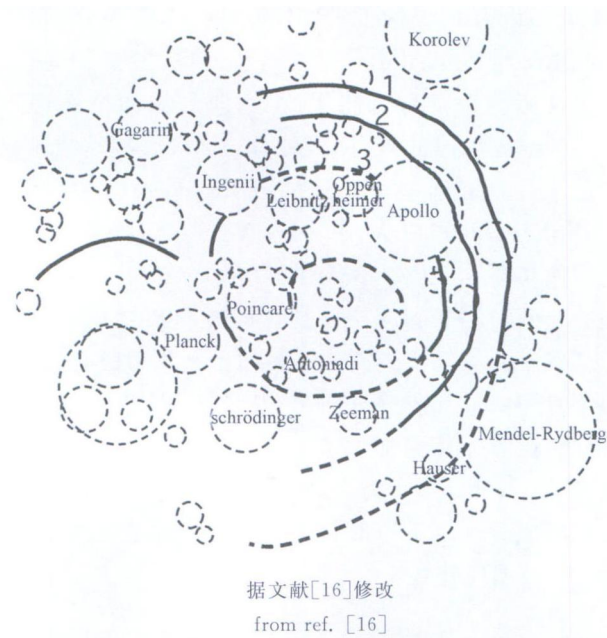


图 8 艾特肯盆地的圆形建造草图

Fig. 8 Sketch map of ring construction
in the south pole Aitken basin

5 SPA 盆地的成因

大多数学者认为 SPA 盆地的规则圆形结构^[9, 16, 18]是巨大天体高速撞击月表而成^[37]; 如果是按这种模式所形成的话, 那么形成过程中至少挖掘到了月表 150 km 的深处, 挖掘出的物质体积为 $103 \times 10^6 \text{ km}^3$ 。假设月壳的平均厚度为 100 km^[29], 那么这次挖掘出的物质中有 $95 \times 10^6 \text{ km}^3$ 来自月壳 (95% 是抛射物), $8 \times 10^6 \text{ km}^3$ 体积的物质来自月幔^[30]。研究表明, 月球背面月壳的平均厚度是 68 km, 而 SPA 盆地中月壳厚度只有 20 km^[29], 据此推测, 巨大的撞击应该穿透了整个月壳, 甚至达到上月幔^[31]。

而文献[32]和[33]的作者假设一个直径为 250 km 的天体以 20 km/s 的速度撞击月球, 那么将挖掘出 $180 \times 10^6 \text{ km}^3$ 体积的物质, 几乎是文献[31]作者提到的体积的两倍。在撞击挖掘月球物质的质量多少上存在着很大的歧义, 因此便引起了科研工作者对 SPA 盆地成因的重视。此外, 有人根据喷射物质中 FeO 丰度的不对称分布, 推测外来天体是以倾斜的低角度撞击而成^[34]。

研究表明, SPA 盆地的形成与其他盆地在成因上有所不同, 可能是由一个密度极低 (小于 2 g/cm³) 的天体以低速度 (低于 5 km/s) 倾斜撞击月表所致^[34]。与其他大型撞击盆地不同的是, 它的深度与直径比率异常小, 从图 11 中明显看出它在图上的

投点没有在一般盆地的“直径-深度”趋势线上; 据此, 有人认为 SPA 盆地是前酒海期彗星撞击的结果^[17]。

6 讨 论

(1) SPA 盆地的地质特征: 了解 SPA 盆地的地质特征有重要的意义。

首先是关于它的形貌特征, 上面曾提到盆地从内到外有三个圆环建造层或环形台阶^[16], 从探月影像数据或照片上很难分出它们的界限, 尤其是盆地西部有大量的撞击坑叠加, 几乎看不出三个建造层的界线, 仅能从剖面是看到高差, 这似乎说明三个圆环建造层的划分欠妥当, 应该尽可能提供盆地的剖面上高差的可信度。看来, 根据高程和 Fe、Ti 分布范围确定盆地为椭圆形的观点^[23]受到愈来愈多人

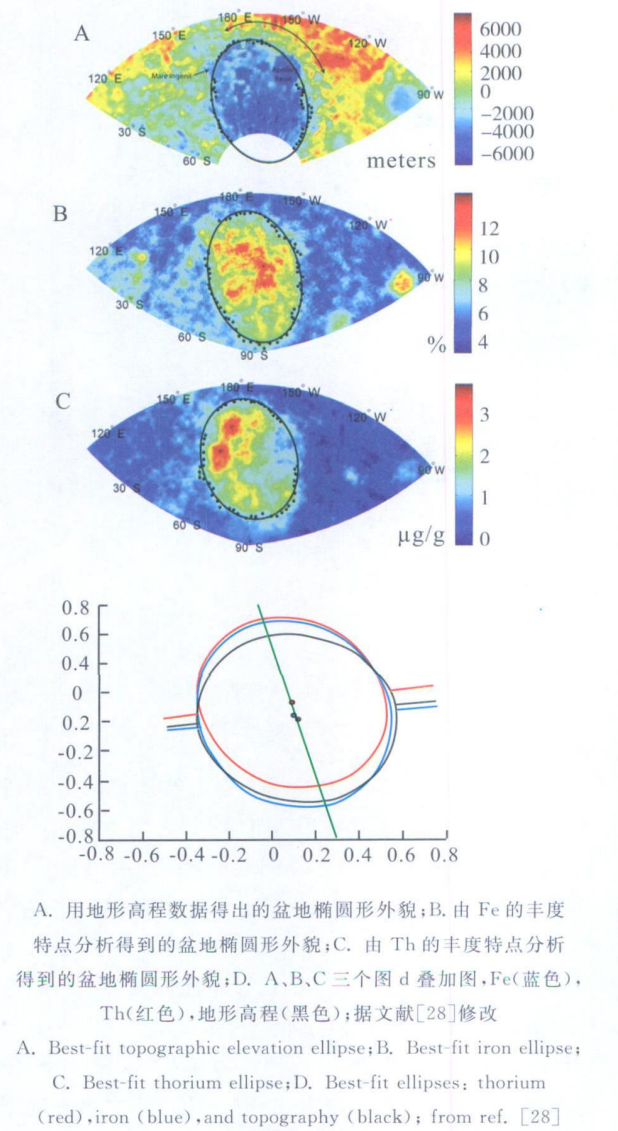
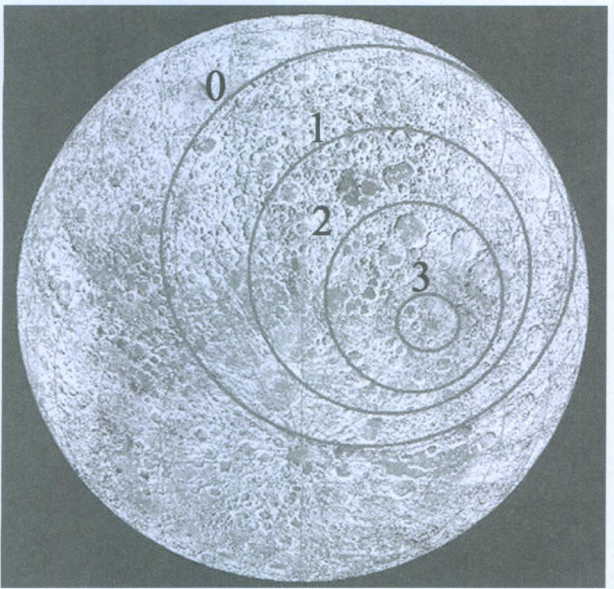


图 9 SPA 盆地的椭圆形外貌

Fig. 9 Best-fit topography ellipse

的认可。但这也只是一个粗略的成果, 因此建造层的进一步划分是今后工作的重点。

其次是构造特征, 它表现为盆地内部叠加了大量不同年代、不同形态的撞击坑或撞击盆地, 这有助于揭示或曝露月球更深层的构造和成分。因为撞击坑或盆地的形态与撞击点的月壤厚度、岩性以及撞击形成年代直接有关, 能提供月球早期历史的证据。另外, 很少见到有关 SPA 盆地中性线性构造的相关文献, 这固然与盆地本身线性构造本来就很少, 也可能是探月影像或照片分辨率低的缘故。今后需要分辨率较高的影像数据, 详细解译线性构造, 进行分类和方位统计, 进一步分析其成因, 了解区域性构造特征与应力状态, 有可能提取到某些重要的地质信息。



据文献[17]
from ref. [17]

图 10 SPA 盆地的多环构造

Fig. 10 The multi-ring structure of the SPA basin

表 2 南极艾特肯盆地椭圆构造基本参数

Table 2 The basic structural parameters of elliptical of the south pole Aitken basin

参 数	Th	Fe	地形
中心(南纬)	48.3	52.8	54.2
中心(西经)	172.1	170.5	168.7
倾斜角(°)	10.2	7.9	7.5
偏心率	0.7	0.75	0.69

注: 参数来源于文献[28]

第三是岩石、矿物的化学成分特征。关于盆地是否挖掘出了月幔物质或者只是下月壳物质的争议相当激烈^[21, 22, 23]。克莱门汀探测器的光谱分析发

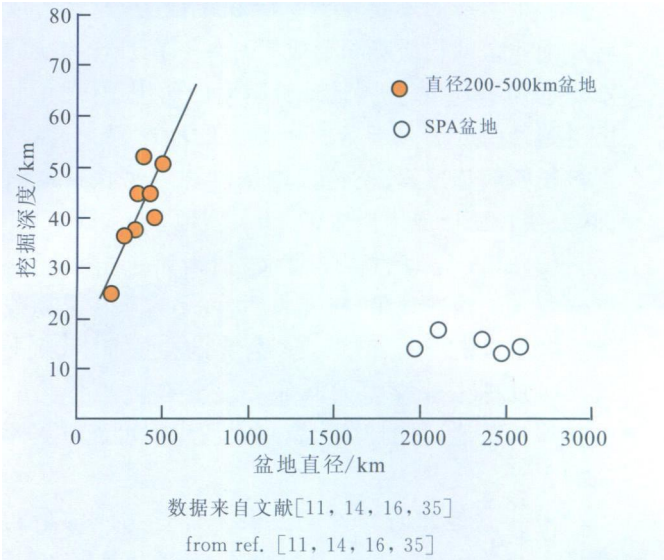


图 11 撞击盆地深度与直径关系图

Fig. 11 Correlation between the depth and the diameter of impact basins on the moon

现, 盆地内矿物 FeO 含量比周围高地高出 7% ~ 10%; 主要岩石为斜长岩和苏长岩, 个别地区有月海玄武岩。据 Lucey 观点^[30], 盆地中的物质是由月壳下部和月幔上部物质混合组成的, 假如这个观点正确, 那么就应该找到月幔物质的证据——大量的橄榄岩, 但是很多科学家, 如 Pieters^[19] 通过各种方法并没有发现 SPA 盆地中的大量橄榄岩分布区域。现阶段, 虽然无法证明 SPA 盆地是否有月幔物质, 但是研究表明盆地中的物质是高铁物质, 是由月壳深部的岩石碎片、角砾、熔融的岩石与月表物质混合而成。因此, 解决该问题的关键是从该盆地采集样品, 对返回的样品测定岩石矿物成分。不管测定的结果怎样, 从 SPA 盆地获取的样品, 将是月球最深部的物质样品, 是探索月球深部的窗口。

(2) 关于 SPA 盆地的成因和形成机制问题, 主要有三种看法: 1) 由巨大的天体高速撞击月表而成; 2) 由一个密度极低的天体(小于 2 g/cm^3) 以低速度(低于 5 km/s) 倾斜撞击月表而成; 3) 可能由彗星在前酒海期的撞击而成。目前这些推断都还缺乏直接的证据。但值得一提的是, 盆地中并没有大量月海玄武岩。按照月海玄武岩起源的被动模式, 作为一个直径为 $2000 \sim 2600 \text{ km}$ 、深达 13 km 的盆地, 撞击事件应该在月球内部仍然很热的时候。那么玄武岩岩浆就会优先侵入到月球背面最深的盆地中。主动模式认为, 巨大的撞击作用使底部发生强烈的部分熔融, 熔融物质溢流进入盆地。实际上, 只在盆地的某些撞击坑中有月海物质的迹象。据此, 笔者认为 SPA 盆地可能并非是撞击的产物, 而是月球在形

成过程中本身的不足所致。吸积说认为, 地球形成后周围残余的物质吸积形成了月球。在月球物质的堆积过程中, 一直受到地球吸引力的作用, 月球正面所受到的引力远大于背面所受到的地球引力, 经历了漫长的演化过程, 便造成物质堆积容易在月球正面, 而使背面形成了巨大的 SPA 盆地。

(3) SPA 盆地的科学意义: 撞击是宇宙星际间普遍存在的构造现象; 研究表明, 许多行星在早期曾遭受过大量的陨石、彗星或小行星的猛烈撞击, 撞击记录在月球上保存得尤其完好。SPA 盆地作为一个特殊的盆地, 它的发生、发展和演化很可能有更深刻的含义。

SPA 盆地的研究可能提供了月球物质的最初分异方面的信息。由于盆地形成年代久远, 经历了各个时期撞击事件的叠加, 因此几乎记录了整个月球的撞击历史过程。巨大的撞击挖掘出的大量物质、巨大的热量, 以及撞击坑底部的融化, 可能对月表物质进行了重新分配, 改造了早期月表的岩石、矿物组分。如果能在 SPA 盆地中找到富钾、富硅、富铝的撞击玻璃, 将为阐明月球发育早期提供很重要的信息。

盆地的研究可提供岩浆活动的信息。目前比较统一的观点认为, 这个盆地是由一个质量较大的小行星撞击而成。这么巨大的撞击很可能诱发月球内部的岩浆活动, 甚至可能发生第二次大规模的岩浆活动, 引起月海泛滥(剧烈的月海玄武岩喷发事件); 关于这次月海泛滥事件, 尽管许多学者认为其动力来自月球本身, 但也有人认为形成 SPA 盆地的撞击是一个不容忽视的因素: 巨大的撞击可能影响到月壳深处甚至月幔, 导致岩石圈物质或月幔物质上涌, 并有火山喷发。虽然目前的研究尚不足以证实上述假说, 但通过对 SPA 盆地的研究, 可能为之提供一定的依据。

SPA 盆地的年龄研究证实了 39 亿年巨大撞击事件的存在^[8]。SPA 盆地的形成年龄不同学者得出的大致范围是 41~ 39 亿年^[15, 36], 也有人认为可能更古老(大约 43~ 45 亿年^[20])。如果是 39 亿年的话, 则能在很大程度上证实 39 亿年前巨大撞击事件的存在; 月表也很可能保存了大量原始太阳系的早期物质。因此, 从 SPA 盆地样品的同位素定年对于证实 39 亿年巨大撞击事件的存在与否有着重要的意义。

参考文献 (References):

the moon, Scale 1: 5000000 [J]. U. S. Geol. Surv., Map, 1978, 1—1047.

[2] Belton M J S, Head J W, Pieters C M, Greeley R, McEwen A S, Neukum G K, Klaasen P, Anger C D, Carr M H, Chapman C R. Lunar impact basins and crustal heterogeneity — New western limb and far side data from galileo [J]. Science, 1992, 255: 570—576.

[3] Lucey P G, Holtzmann J, Blewett D T, Taylor G J, Hawke B R. Topographie-compositional relationships within the south pole aitken basin [J]. New Views of the Moon 2: Understanding the Moon Through the Integration of Diverse Datasets, 1999, 41—42.

[4] Blewett D T, Taylor G J, Lucey P G, Hawke B R, Gillis J. High resolution, quantitative remote sensing of south pole-aitken basin [C]. Lunar and Planetary Science, 1999, 30: 1438—1439.

[5] Borst A M, Bexkens F, Foing B H. Geological and geochemical study of south pole-aitken basin and future sample return missions [C]. LPI Contributions, 2008, 1446: 26.

[6] Jolliff B L, Gillis F J J, Haskin L A, Korotev R L, Wiczorek M A. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins [J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (2): 4197—4216.

[7] Rodionova Z F, Kozlova E A. Morphological analysis of the cratering of the south pole-aitken basin on the moon [J]. Solar System Research, 2000, 34 (5): 390—397.

[8] 林杨挺. 月球形成和演化的关键科学问题 [J]. 地球化学, 2010, 39 (1): 1—10.

Lin Yangting. Key issues of the formation and evolution of the Moon [J]. Geoch. China, 2010, 39 (1): 1—10. (in Chinese with English abstract)

[9] Spudis P D, Reisse R A, Gillis J J. Ancient multiring basins on the moon revealed by clementine laser altimetry [J]. Science, 1994, 266: 1848—1851.

[10] Wilhelms D E K A H, Wilshi H G. Geologic map of the south side of the moon, Scale 1: 5000000 [J]. U. S. Geol. Surv., Map, 1979, 1—1162.

[11] Wood C A, Gifford A W. Evidence for the lunar big back side basin [C]. LPI Contributions, 1980, 414: 121—123. .

[12] Head J W, Murchie S, Mustard J F, Pieters C M, Neukum G, McEwen A, Greeley R, Nagel E, Belton M J S. Lunar impact basins: New data for the western limb and far side (Orientale and South Pole-Aitken basins) from the first Galileo flyby [J]. J. Geoph. Res. h, 1993, 98: 17149—17182.

[13] Hawke B R, Bell J F. Remote sensing studies of lunar dark-halo impact craters—Preliminary results and implications for early volcanism [R]. In: Lunar and Planetary Science Conference Proceedings. 1982: 665—678.

[14] Leikin G A, Sanovich A N. Origin of the southern basin on the far side of the moon [J]. Astronomicheskii Vestnik, 1985, 19: 113—119.

[1] Stuart-Alexander D E, Geologic map of the central far side of

明[J],2002,1(创刊号):278—283.

Zhu Binqun, Chang Xiangyang, A review on “Discovery of high radiogenic lead in the Shang Bronzes” [J]. Ancient Civilization, 2002, 1: 278—283. (in Chinese)

[3] 朱炳泉. 化学省与地球化学急变带[M], 北京: 科学出版社, 2001.

Zhu Binqun Geochemical provinces and geochemical boundaries[M]. Beijing: Science Press, 2001. (in Chinese)

[4] 孙华, 苏荣誉. 神秘的王国[M], 成都: 巴蜀书社, 2003.

Sun Hua, Su Rongyu A mysterious kingdom[M]. Chengdu: The Ba-shu Press, 2003. (in Chinese)

[5] Dodson J, Li X, Ji M, Zhao K, Zhou X, Levchenko V. Early bronze in two Holocene archaeological sites in Gansu, NW China [J]. Quaternary Research, 2009, 72: 09—314.

(上接第240页)

[15] Petro N E, Pieters C M. Reconstructing the stratigraphy of the ancient south pole aiken basin interior[C]. Lunar Science and Exploration, 2002: 47.

[16] Hiesinger H, Head J W. Lunar South Pole-Aitken Impact Basin: Topography and Mineralogy[J]. in Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts. 2004, 35: 1164.

[17] Shevchenko V V, Chikmachov V I, Pugacheva S G. Structure of the south pole-aiken lunar basin[J]. Solar System Research, 2007, 41: 447—462.

[18] Petro N E, Pieters C M. Surviving the heavy bombardment: Ancient material at the surface of south pole-aiken basin[J]. J. Geoph. Res. (Planets). 2004, 109: 1—13.

[19] Pieters C M, Gaddis L, Jolliff B, Duke M. Rock types of south pole-aiken basin and extent of basaltic volcanism[J]. J. Geoph. Res., 2001, 106: 28001—28022.

[20] Peterson B R H C A, Blewett D T, Bussey D B J, Lucey P G, Taylor G J, Spudis P D. Geochemical units on the moon: The role of south pole-aiken basin[C]. Lunar and Planetary Science XXXIII, 2002: 46—47.

[21] Peterson C A, Hawke B R, Lucey P G, Taylor G J, Blewett D T, Spudis P D. Anorthosite on the lunar farside and its relationship to south pole-aiken basin[C]. Lunar and Planetary Science XXXI, 2000: 1680—1681.

[22] Lucey P G., Taylor G J, Hawke B R, Spudis P D. FeO and TiO₂ concentrations in the south pole-Aitken basin: implications for mantle composition and basin formation[J]. J. Geoph. Res., 1998, 103: 3701—3708.

[23] Garrick-Bethell I, Zuber M T. Elliptical structure of the lunar south pole-aiken basin[J]. Icarus, 2009, 204: 399—408.

[24] Pieters C M, Tompkins S, Head J W, Hess P C. Mineralogy of the mafic anomaly in the south pole-aiken basin: Implications for excavation of the lunar mantle[J]. Geoph. Res. Lett., 1997, 24: 1903—1906.

[25] Morrison D A. Did a thick south pole-aiken basin melt sheet differentiate to form cumulates[C]. Lunar and Planetary Science XXIX, 1998, 29: 1657.

[26] Ennis M E, Fagan A L, Pogue J. N, Porter S, Snape J F, Kring D A. Lunar farside volcanism: Potential sampling localities within south pole-aiken basin[C]. Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, 2010, 41: 2512—2513.

[27] Spudis P D, Plescia J B, Bussey D B J, Jossel J L, Beauvivre S. The geology of the south pole of the moon and age of shackleton crater[C]. Lunar and Planetary Science XXIX, 2008: 1626—1627.

[28] Garrick-Bethell I. Ellipses of the south pole-aiken basin: Implications for basin formation[C]. Lunar and Planetary Science XXXV, 2004: 1515—1516.

[29] Zuber M T, Smith D E, Lemoine F G, Neumann G A. The shape and internal structure of the moon from the clementine mission[J]. Science, 1994, 266: 1839—1843.

[30] Lucey P G, Taylor G J, Hawke B R, Spudis P. D. Iron and titanium concentrations in south pole-aiken basin: Implications for lunar mantle composition and basin formation[C]. Lunar and Planetary Science XXVII, 1996: 783—784.

[31] Spudis P D. The geology of multi-ring impact basins[M]. Cambridge University Press, 8: 1993.

[32] Grieve R, Spudis P D. The geology of multi-ring impact basins[J]. Cambridge university press, Earth Science Reviews, 1994, 36: 256—257.

[33] Holsapple K A. The scaling of impact processes in planetary sciences[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1993, 21: 333—373.

[34] Schultz P H. Forming the south pole aiken basin—the extreme games[J]. Lunar and Planetary Science XXVIII, 1997, 28: 259—260.

[35] Wieczorek M A, Phillips R J. Lunar multiring basins and the cratering process[J]. Icarus, 1999, 139: 246—259.

[36] Jolliff B L, Haskin L A, Korotev R L, Papike J J, Shearer C K, Pieters C M, Cohen B A. Scientific expectations from a sample of regolith and rock fragments from the interior of the lunar south pole aiken basin[J]. Lunar and Planetary Science XXVIII, 2003: 1989-1990.