

# 月球南北两极研究进展与发展趋势

程安云<sup>1,2</sup>, 王世杰<sup>1</sup>, 李雄耀<sup>1,2</sup>, 李瑞玲<sup>3</sup>

(1. 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;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 中国科学院国家天文台月球中心, 北京 100012)

**摘要** 本文着重对上世纪 90 年代开始的对月探测中关于月球南北两极的一些研究结果进行了综述, 包括地质地貌, 水冰及其光照条件等问题. 笔者认为, 在未来的对月球两极的探测活动中, 获取月球两极更高空间分辨率的地形和地质等数据是非常重要的, 而与此相关的光照, 温度及同月球基地建设相关问题等研究将是主要的研究方向, 且必将随着各国探测进程的发展取得更多和更深刻的认识.

**关键词** 月球探测, 月球两极, 研究进展

**中图分类号** P35

**文献标识码** A

**文章编号** 1004-2903(2007)04-1070-05

## Researches on Lunar Poles: Advances and Trends

CHENG An-yun<sup>1,2</sup>, WANG Shi-jie<sup>1</sup>, LI Xiong-yao<sup>1,2</sup>, LI Rui-ling<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences,

Guiyang 550002, China; 2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China;

3. The National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China)

**Abstract** Reviews on researches of lunar poles, dating from 90s of 20th century were performed, including those findings of geology, geomorphy, water ice and light conditions. The authors suggested that, it is of paramount importance to acquire topographic and geological data with a higher spatial resolution in future prospecting of the lunar poles. Moreover, researches related to their geology, light conditions and problems concerning lunar base, would be main research fields, and more comprehensive understandings of the lunar poles would be achieved in coming world-wide lunar exploration.

**Keywords** lunar exploration, lunar poles, proceedings and development trend

### 0 引言

从上世纪 50 年代开始到 70 年代中期结束的月球探测活动主要集中于月球正面的中低纬度地区, 而对月球的高纬度区域和背面所获取的资料相对很少, 这主要是受当时的技术条件所限制. 在上世纪 90 年代开始的新一轮对月探测活动中, 各国都明显加强了对月球两极地区的研究. 其中, 最重要的探测活动是下面三次:

(1) 美国在 1994 年发射的克莱门汀号(Clementine)月球极地椭圆轨道探测器, 获取了月球表面大量的高分辨率的图像数据和光谱数据以及月球表面中低纬度的激光高程等数据; 另外, 此次探测任务中

进行的双基雷达实验还就月球极区是否存在水冰的问题进行了探测研究. 遗憾的是, 此次探测并未获得月球两极的激光高程等数据.

(2) 美国在 1998 年发射的月球勘探者号(Lunar Prospector)月球极地轨道探测器, 其轨道高度为  $100 \pm 20$  km, 然后不断下降, 并最终撞击在月球南极附近的一个撞击坑里面, 以期利用撞击作用来产生水冰的雾状尘埃以证明水冰的存在, 但最终并未能从地球上观测到预期的现象. 月球勘探者号测量了月球表面多种元素的丰度, 还进行了月球重力场和磁场的测量. 作为一个重要的科学目标, 月球勘探者号还对月球的氢的丰度进行了测量, 借此来探测月球极区的水冰的存在与否<sup>[1]</sup>.

收稿日期 2007-03-10; 修回日期 2007-05-20.

基金项目 国家自然科学基金项目(40473036)资助.

作者简介 程安云, 博士研究生, 主要研究方向为月球与行星科学. (E-mail: chenganyun@mails. gyig. ac. cn)

(3)欧洲空间局在 2003 年发射的欧洲首个月球极地椭圆轨道探测器灵巧 1 号(SMART-1),其科学目标包括利用先进月球成像实验仪器(AMIE)来获取特定区域的图像来研究月球表面的地形和地表构造,利用红外光谱仪(SIR)来研究月球的表面的矿物分布以及对月球南极的小撞击坑进行研究以期寻找到水冰或冰冻的二氧化碳或一氧化碳存在的证据,另外,还将就月球的起源等问题进行相关的研究<sup>[2]</sup>.此探测器已于 2006 年 9 月 3 日成功地撞击于月球正面的卓越湖(Lacus Excellentiae,月球南纬 34.4 度,西经 46.2 度),但其科学结果仍待评估.本文以下部分对月球两极的研究现状进行了综述,并对未来可能的发展趋势提出了一些看法.

## 1 月球两极的地形与地质

关于月球两极地区的地理概况,目前的研究主要集中在纬度 85 度以上的区域.其中,南极区域内地形较为复杂,主要的撞击坑有 Cabeus, Amundsen, Shoemaker, Shackleton, de Gerlache 等.对于月球两极的地形,目前尚缺乏详细的地形数据,但就美国地质调查局公布的研究结果来看<sup>[3]</sup>,南极地区较其周围区域地势稍高;有研究表明,南极点附近的最高点高出月球平均半径 3km<sup>[4]</sup>(位于南纬 89.76 度,西经 180 度,此处及以下各处提到月球半径时,是相对于平均半径为 1738km 的月球椭球面而言).此外,距南极极点很近的 Shackleton 撞击坑边缘低于月球平均半径达 3.5 km,但除了其高峰外,其他大部分地球同样很低,因此,其撞击边缘在相当长的时间里受到阳光照射<sup>[5]</sup>.

月球南极点位于其背面的南极—艾肯盆地(South Pole-Aitken Basin,以下简称 SPA)的边缘地带内,因此,南极的研究和对 SPA 的研究是密切相关的.

关于 SPA,有许多关于其成因和地质和地形地貌方面的研究.目前主要的认识有:

(1)SPA 形成于 43~39 亿年的前酒海纪,是迄今为止太阳系内发现的最大(直径 2500 km,中心位于南纬 55 度,东经 180 度)且有可能是最古老的撞击坑(除风暴洋外),其中心和周边地区的相对高差达到 13km<sup>[6,7]</sup>.

(2)该盆地地势较低且月壳较薄,但并未被月海玄武岩所覆盖<sup>[8]</sup>.

(3)盆地内的 FeO 含量较周边高地高出 7~10%;其内部部分地方的 TiO<sub>2</sub> 含量有增强的现象

且显示出较高的 Th 和 K 的值<sup>[9,10]</sup>.

(4)盆地内的 3 种主要岩石为:斜长岩;斜长质苏长岩和玄武岩(仅见于盆地内小的月海区)<sup>[11]</sup>.

(5)月球勘探者号和克莱门汀号的数据分析都表明,盆地内的非月海物质为苏长质的角砾岩,其来源可能是下层月壳或者是被剥除了上层斜长质月壳的月幔物质<sup>[12]</sup>.

(6)盆地具有能够产生太阳系内已知的最薄的磁气圈的磁场<sup>[13,14]</sup>.

(7)根据对 SPA 和月球上其他地区的地貌学对比研究表明,盆地内的撞击坑的退化程度较月海地区为轻,且盆地内的撞击坑的内壁斜坡上的台地的退化程度更低;盆地内没有底部全部被岩浆所覆盖的撞击坑;也没有发现具有辐射纹系统的撞击坑<sup>[14]</sup>.上述这些特点,使得 SPA 在地质地貌和地球化学等方面都明显区别于月球的其他地区,而这些特点也使得 SPA 在月球研究中备受关注.

就南极地区而言,因其和 SPA 的密切联系,在地质地貌和地球化学特征等方面必然受到 SPA 不同程度上的影响.

相对于月球南极的地形而言,北极的地形较为平坦.北极极点处低于月球平均半径 1.4km,极点周围的地势相对平坦,有许多小撞击坑(其半径 300 km 内的高差为  $-0.7 \pm 1.4$  km);但在离开极点 180 km 的 Plaskett 撞击坑的坑壁高差大于 4km.极区内的撞击坑主要有 Peary, Byrd, Hermite, Nansen, Plaskett, Rozhdestvensky 等;此外,还分布有一些地堑<sup>[5]</sup>.就地势而言,北极地区在地势上处于一个从月海到月球高地的过渡地带,其月球正面一侧 70 度以下多是月海,而其对应的月球背面一侧则是连续分布的月球高地<sup>[3]</sup>.关于月球北极的地质情况,尚缺乏专门的研究.但有研究者利用月球勘探者号  $\gamma$  光谱数据对月球的 Fe, Mg, Al 元素的丰度进行定性分析后表明,月球两极的元素组成同其周围区域几乎相同,而此结论否定了 Hodges 认为月球两极的 Ca 的异常可能是导致月球勘探者号的中子流数据在两极地区产生变化的原因的观点,从而为水冰的存在问题又增加了一个证据<sup>[15]</sup>.

## 2 月球的水冰

月球水冰的问题,自从 Watson 等人在上世纪 60 年代提出此假设时就备受关注.如果月球上存在水冰,则有可能成为未来的月球基地可以就地利用的一种宝贵的资源.水冰可以开采出来用于生命支

持系统或者在利用相关技术将之分离为氢和氧后用作燃料,这对于人类以后在月球上拟建立月球基地的意义是非常重大的.因此,自从开始对利用探测器对月球进行探测活动以来,人们就月球水冰的问题提出的各种假设进行了详细的研究.这些研究主要集中在冰的来源,存在的地点和形式,迁移到月球两极的方式,冰散失的途径和在月球上的保存时间等方面.在上世纪 60 年代的探月活动中,并未能对月球水冰的问题进行相应的专门研究.但在上世纪 90 年代开始的探测活动中,则对这个问题予以高度重视并进行了专门的研究,其中包括克莱门汀号对月球两极进行双基雷达实验以寻找支持月球水冰存在的证据;月球勘探者号则利用  $\gamma$  光谱仪对月球表面的氢的丰度进行了探测以确定水冰的存在范围和含量.此外,在地球上针对月球两极利用雷达来搜寻水冰存在证据的实验也进行了多次<sup>[16,17]</sup>.

就研究手段而言,现阶段人们对月球水冰的探测主要是利用雷达数据, $\gamma$  光谱仪数据和对月球极区地形进行分析来进行的.但是,通过结合关于月球水冰的最近的研究成果来看,不同的或者相同的探测手段对相同的区域以及对相同的数据的解释之间都互相存在不一致的地方.其中包括:不同探测手段对月球两极永久阴影区的面积估计存在较大差异<sup>[17,18]</sup>;对相同地区的进行的雷达观测得到的结论不一致<sup>[17,19]</sup>;对相同的克里门汀号的雷达数据的解释不一致<sup>[19,20]</sup>;而且根据克莱门汀号和月球勘探者号的数据进行研究后都认为月球可能存在水冰的情况下,对月球水冰的含量的估计也不一致<sup>[21]</sup>;还有一点值得注意的是无论是 Margot 等人利用雷达得到的面积或者是 Nozette 等人利用克莱门汀号数据得出的月球极区永久阴影区面积,都是北极的永久阴影区面积要小于南极的,但是 Feldman 等人根据月球勘探者号的  $\gamma$  光谱仪数据得到的月球表面的氢信号是北极强于南极,而对于这种不一致,仍然没有圆满的解释.

就现阶段月球水冰的探测和研究结果而言,尚无令人信服的确凿的结论.但多数人认为,月球水冰的存在与否,存在形式等诸多问题都需要进一步更深入的研究和探测<sup>[22,23]</sup>.值得期待的是,美国国家航空航天局(NASA)拟于 2008 年 10 发射的月球撞击坑观测与遥感卫星(Lunar Crater Observation and Sensing Satellite, LCROSS)将通过利用废火箭推进器和完成任务的卫星本身撞击到月球南极极点旁边的 Shackleton 撞击坑的永久阴影区中的方式

来验证其中是否有水冰存在,以期对这个长期悬而未决的问题给出一个答案<sup>[24]</sup>.

### 3 月球两极的永久阴影区和持续光照区

对月球永久阴影区的研究目的,主要是通过对其地形和光照以及温度等条件的研究来确定其中是否存在人们猜测的水冰或者是被冷冻的而保存下来的挥发分.而对于持续光照区的研究目的,则是为了对月球两极的光照条件和温度条件等进行详细了解,以期对未来的月球基地的选址提供参考.从某种意义上说,月球极区的永久阴影区和持续光照区是同一个问题的两个方面,即在一定时间段内照射到该区域的太阳光线被地形遮挡产生阴影区,或者是高于周围地区的地形被太阳光线照射的时间因为未受遮挡而持续时间较长.就该问题的实质而言,如果具有月球极区的准确的地形数据,就可以根据月球的地形数据及其天文运行轨道参数来利用计算机模拟计算出其准确的光照情况;或者在获得月球两极的全年的光照图像的情况下,也可以直接利用图像来进行判断.在研究的方法上,主要是两种,一种是以一些已知的月球地形和天文运行轨道参数等为条件,通过建立数学模型来模拟月球的表面光照状况,从而推断出其光照区及永久阴影区的范围,得出可能的水冰的存在条件及范围等<sup>[25~27]</sup>;另外一种则是根据探测器和地基雷达所获得的月球极区的数据来建立数字高程模型(DEM)或数字地形模型(DTM),同已知的相关月球运行轨道参数等相结合,直接或间接判断月球两极的永久阴影区和持续光照区.在这些研究中,对于月球极区持续光照区的范围和位置的观点比较一致;对于永久阴影区的范围认识较为一致,但对其面积的估计差别很大<sup>[16,19,28~31]</sup>.

在对月球两极的研究中,最主要的影像数据来源是克莱门汀号的数据和月球轨道号(Lunar Orbiter)的数据.关于北极光照情况的研究,据最近的利用克莱门汀号 UVVIS 数据研究成果表明,在月球北极的夏天里面,在极点附近的 PEARY 撞击坑的边缘上有 4 个地方在一个月球日内(708 小时)都被太阳光所照射,且这些地方是月球上最有可能的永久光照区;同时,在其附近还存一些永久阴影区<sup>[29]</sup>.另外,根据伽利略号 SSI 数据的研究表明,在离开北极点 50 km 和 100 km 的 3 个地方,即 Hermite 撞击坑边缘,Peary 撞击坑和 Rozhdestvensky 撞击坑之间的山峰上以及 Peary 撞击坑和 Byrd 撞

击坑之间的山脊上,也受到阳光照射<sup>[29]</sup>。

关于月球南极的光照情况,根据对克莱门汀号 UVVIS 数据的定量分析表明,有几个地方在一个月球日内超过 70%(495 小时)的时间受到阳光照射;在 Shackleton 撞击坑的边缘相隔 10 km 的两个地方有 98%(694 小时)的时间受到太阳光照<sup>[32]</sup>。

但是,在对月球两极的光照环境的上述研究中,并未考虑地照(EARTH SHINE)的影响因素。有研究表明,地球的全球平均反照率(0.39)比月球的(0.09)大得多且地球的盘面比月球也大得多,在月球上看见的全地球球面的光照强度是从地球上看见的满月的亮度的 58 倍。但在月球上所受到的地照影响与月球上面具体的地点有关;月球正面受到地照影响并且同样具有盈亏和亮度强弱的变化,而月球背面则不会受到地照影响<sup>[33]</sup>。地照对月球极区光照环境的影响如何变化,对其光照环境的影响程度如何,都需要做更详细的研究。

#### 4 月球两极的温度

月球两极表面温度的研究对于月球基地和水冰的研究都是很重要的。良好的光照和温度条件是月球两极成为建立月球基地的理想地点的基本条件之一,且两极地区永久阴影区内的温度条件还直接决定了水冰能否存在。就对其温度的研究方法而言,主要是进行模型的模拟计算。

有研究表明,月球两极地区受阳光持续照射的地方表面温度为  $-50 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$  (即  $223 \pm 10\text{K}$ )<sup>[34]</sup>, 而通过模型计算的一些永久阴影区内的温度则表明,这些阴影区内的温度都低于 120K 或者更低,从而使水冰有可能保存下来<sup>[25,27,35~37]</sup>。但因缺乏高精度的两极地形资料和月表及月壤物理性质等的详细了解,对地形和太阳辐照常数以及月壤热物理性质等这些影响月表温度的关键因素进行了近似计算,这些结果只能是一个粗略的估计。更准确的温度模拟计算需要对上述这些影响因素进行详细的了解,尤其是对两极地形条件的了解。

#### 5 月球极区的研究展望

在对一个地外行星进行研究的时候,通常都先通过光谱学及摄影等遥感手段对其进行基本的地质地貌及地球物理和地球化学等方面的研究,对月球也不例外。尽管对月球的探测研究已经开展了半个多世纪,但是,人类对于月球的了解,从总体上说,还是很少的,甚至是肤浅的。<sup>[8,38]</sup>

就目前的研究状况来看,对南极地质地貌和地球物理和化学等方面的研究多结合 SPA 的研究来进行。此外,还有对于南极的光照条件,地形条件,同水冰存在问题等相关的永久阴影区,以及在南极进行探测器着陆采样和建立月球基地等方面展开的诸多方面的研究<sup>[10,39~42]</sup>。综合相关文献来看,对月球南极的研究主要关注于南极的地形,光照和地质方面。在南极接近极点的位置存在可能的持续光照区域和永久阴影区;此外,由于该区域处于 SPA 的边缘,能采集到来自 SPA 内的可能是月壳下层或者是月幔的样品。这些特点,都将是今后月球南极探测和研究的重点和热点。

对于月球北极的研究,主要是联系到月球的水冰和月球基地的研究来进行的,从而主要关注于其地形和光照条件。相信随着中国、美国和印度等国家绕月极地探测进程的发展,必将极大地增加我们对于月球南北两极的认识和理解。

总的来说,现阶段对于月球正面的认识较多,而关于月球背面和两极的认识则较为缺乏。在对月球全球的地质等方面的知识,多来源于遥感解译手段,但这些知识就精确度和准确度方面而言,对于详细了解月球的地质全貌还是不够的;而对于月球极区了解则更少。在月球极区研究中,地形数据的重要性是显而易见的,而这对于准确了解月球极区的光照及温度条件,水冰研究和未来在月球极区建立月球基地的选址等问题都是极为重要的。

可以预见,在未来的对月球两极的探测活动中,主要是获取其更高空间分辨率的地形和地质等数据;而在研究方面,对其地质,光照,温度,地质等以及同月球基地相关的问题等研究将是主要的研究方向,且必将随着各国探测进程发展取得更多和更深刻的认识。

#### 参 考 文 献 (References):

- [1] [http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/viewMissionProfile.jsp?mission\\_name=lunar%20prospector](http://starbrite.jpl.nasa.gov/pds/viewMissionProfile.jsp?mission_name=lunar%20prospector)
- [2] <http://sci.esa.int/science-e/www/object/index.cfm?fobjectid=31413>
- [3] <http://geopubs.wr.usgs.gov/i-map/i2769/>
- [4] Wählisch M, et al. High resolution mosaic and digital terrain model in the lunar south pole region derived from Clementine data[M]. Lunar and Planetary Science, XXX, 1999.
- [5] Cook, et al. The topography of the lunar poles from digital stereo analysis[M]. Lunar and Planetary Science, XXX, 1999.
- [6] Spudis P D, et al. Ancient multiring basins on the moon re-

- vealed by Clementine laser altimetry[J]. *Science*, 1994, 266: 1848~1851
- [7] Blewett D T, *et al.* High-resolution, quantitative remote sensing of south pole-Aitken basin[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXX, 1999
- [8] 欧阳自远,等.月球科学概论[M].北京,2005,中国宇航出版社.
- [9] Peterson C A, *et al.* Anorthosite On The lunar farside and its relationship to south pole-Aitken basin[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXI, 2000.
- [10] Peterson C A, *et al.* Geochemical units on the moon: the role of south pole-Aitken basin[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXIII, 2002.
- [11] Pieters C M, *et al.* Mineralogy of the mafic anomaly at south pole-Aitken and implications for mantle excavation[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXVIII, 1997.
- [12] Lawrence D J, *et al.* Regional elemental abundances within south pole-Aitken basin as measured with lunar prospector gamma-ray spectrometer data[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXIV, 2003.
- [13] Binder A B. Lunar Prospector: Overview[J]. *Science*, 1998, 281:1475~1476.
- [14] Rodionova Zh 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.
- [15] Berezhnoy A A. Petrologic mapping of the Moon using Fe, Mg, and Al abundances[M]. *Advances in Space Research*, xxx. 2006.
- [16] Stacy N J, Campbell D B, Ford P G. Radar mapping of the lunar poles: A search for ice deposits[J]. *Science*, 1997, 276:1527~1530.
- [17] Margot J L, *et al.* Topography of the lunar poles from radar interferometry: A survey of cold trap locations[J]. *Science*, 1999, 284: 1658~1660.
- [18] Feldman W C, *et al.* Fluxes of fast and epithermal neutrons from lunar prospector: evidence for water ice at the lunar poles[J]. *Science*, 1998, 281: 1496~1500.
- [19] Nozette S, *et al.* The Clementine bistatic radar experiment [J]. *Science*, 1996, 274:1495~1498.
- [20] Simpson R A, Tyler G L. Reanalysis of Clementine bistatic radar data from the lunar South Pole. *J. Geoph. Res.*, 1999, 104(No. E2), 3845~3862.
- [21] SEIFE C. Moon's 'Abundant Resources' Largely an Unknown Quantity[J]. *SCIENCE*, 2004, 303:1603.
- [22] Duke M B. Lunar polar ice deposits: scientific and utilization objectives of the lunar ice discovery mission proposal[J]. *Acta Astronautica*, 2002. 50(6): 379~383.
- [23] Campbell B A, Campbell D B. Regolith properties in the south polar region of the Moon from 70-cm radar polarimetry [J]. *Icarus*, 2006, 180: 1~7.
- [24] News in brief. NASA reveals striking plan to find water on the Moon[J]. *Nature*, 2006,440:858.
- [25] Salvail J R, Fanale F P. Near-surface ice on Mercury and the Moon: A topographic thermal model[J]. *Icarus*, 1994, 111, 441~455.
- [26] Zuber M T, Smith D E. Topography of the lunar south polar region for the size and location of permanently shaded areas [J]. *Geophysical Research Letters*, 1997, 24:2183~2186.
- [27] Vasavada A R, Paige D A, Wood S E. Near surface temperatures on mercury and the moon and the stability of polar ice deposits[J]. *Icarus*, 1999, 141: 179~193.
- [28] Bussey D B J, *et al.* Determination of permanently shadowed terrain in the lunar polar regions[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXIII, 2002.
- [29] Bussey D B J, *et al.* Constant illumination at the lunar north pole[J]. *Nature*, 2005, 434:842~842.
- [30] Elphic R C, *et al.* Using models of permanent shadow to constrain lunar polar water ice abundances[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXVI, 2005.
- [31] Garrick-Bethell I, *et al.* Areas of favorable illumination at the lunar poles calculated from topography[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXVI, 2005.
- [32] Bussey D B J, Robinson M S, Fristad K, Spudis P D. Permanent sunlight at the lunar north pole[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXV, 2004.
- [33] Eckart P. The Lunar Base Handbook[J]. The McGraw-Hill companies, 1999, 142~143.
- [34] Heiken G, Vaniman D, French B M. Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon[M]. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 1991.
- [35] Ingersoll A P, Svitek T, Murray B C. Stability of polar frosts in spherical bowl-shaped craters on the Moon, Mercury, and Mars[J]. *Icarus*, 1992, 100:40~47.
- [36] Mukai T, *et al.* Temperature variations across craters in the polar regions of the Moon and Mercury. *Adv. Space Res.*, 1997, 19(10):1497~1506.
- [37] Carruba V, Coradini A. Lunar cold traps: effects of double shielding[J]. *Icarus*, 1999, 142:402~413.
- [38] Lawler A, Moon maintains its mysteries[J]. *Science*, 2003, 300:727.
- [39] Stooke P J. Exploration Strategies and Landing sites at the lunar south pole[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXIV, 2003.
- [40] Bussey D B J, Robinson M S, Spudis P D. Clementine high resolution imaging of the lunar south pole[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXX, 1999.
- [41] Bussey D B J, Schenk P M. Galileo's view of the lunar north pole[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXXVI, 2005.
- [42] Duke M B. Challenges for sample return from the lunar south pole - Aitken basin[M]. *Lunar and Planetary Science*, XXX-IV, 2003.