



月球探测 SELENE 的科学成果

河野宣之^{①*}, 刘庆会^{①*}, 平劲松^{①*}, 陈明^①, VRAD/RSAT 研究小组^②,
LALT 研究小组^②

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

② Oshu, Iwate 023-0861, Japan

*E-mail: kawano@shao.ac.cn, liuqh@shao.ac.cn, pjs@shao.ac.cn

收稿日期: 2010-06-12; 接受日期: 2010-08-11

中国科学院外国专家特聘研究员计划、中国科学院百人计划、国家自然科学基金(批准号: 10973031, 11043004)、国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA12A210)、上海市浦江人才计划(编号: 10PJ1411700)和日本国立天文台 RISE/SELENE 工程资助项目

摘要 日本探月卫星 SELENE (KAGUYA) 携带了 14 种仪器设备用于对月球进行多方面的测量, 其中的 3 种设备用于对月球进行大地测量观测. 这包括两个子卫星和一台激光高度计测量设备. 这些设备所获得的科学成果主要包括: 利用多普勒和同波束 VLBI 测量得到了精度为 10 m 的精密轨道确定结果; 利用四程多普勒测量首次获得了月球背面精确的重力场; 首次获得了纬度高于 86° 区域的月面地形图; 通过使用月球全球地形信息与月球全球重力场信息得到了全球重力异常分布图; 获得了月亮厚度全球分布图以及月球南北极区光照率图. 这些成果的取得进一步加深了人类对于月球的认识.

关键词 SELENE 探月卫星, 重力场, 月球背面, 月面地形, 重力异常, 月亮厚度, 光照率

PACS: 95.55.Pe, 96.20.Jz, 95.10.Eg, 95.55.Jz

日本探月卫星 SELENE 于 2008 年 9 月成功发射, 该卫星同时携带了两颗子卫星同赴月球. SELENE 任务的提出主要是要研究月球的起源及其演化, 通过对月球表面全球特征的测量进而研究得到其内部信息. 为了实现这一目标, SELENE 携带的 14 种仪器设备实现了对月球长达一年的多方面的广泛观测. 这些观测可以分成 5 个领域. 图 1 给出了 SELENE 所能获得的观测、从这些观测所能得到的关于月球的科学知识以及 SELENE 的探月目标(月球起源与演化)之间的关系^[1]. 这 14 种仪器设备中用于月球大地测量的为两个子卫星和一个激光高度计. 这些设备承担的月球大地测量观测在整个 SELENE 任务中所扮演的角色在图 1 中以灰色标出.

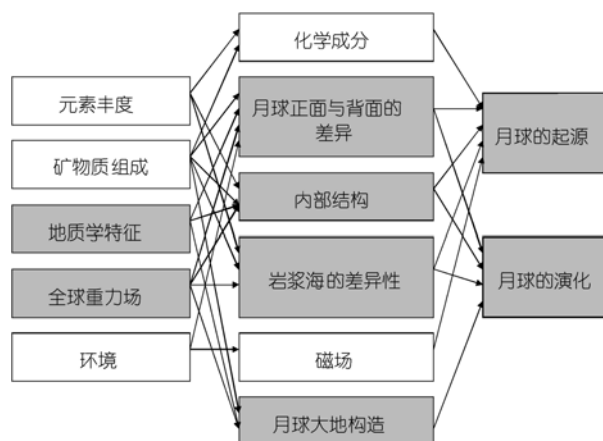


图 1 SELENE 的观测及可获取的科学知识

阴影部分为与月球大地测量相关的部分

1 SELENE 中的月球大地测量观测方案

目前人类已有的用于了解月球或行星内部的方法很有限. 如通过观测月球自转和月震来揭示月球内部结构. 月球重力场使我们能够了解大撞击坑周围月表以下的结构, 月球正面月壳的厚度, 月球全球 LOVE 数等. 对月球磁场与热流的测量有可能揭示出月球内部深层结构及其演化过程. 有些描述月球内部结构的参数, 如月核半径或月核密度, 可由这些观测得到. 然而在大多数情况下, 一种测量方法仅能给出这些参数的一个方面的约束, 因此常常需要采取多种测量方法来确定这些参数. 尽管 SELENE 卫星携带了 14 种探测设备, 但这对于揭示月球内部结构来说仍然是不够的. 迄今为止, 有些有助于分析月球内部结构的高分辨率的测量手段还没有在月球探测中实施. 我们希望嫦娥后续探测任务能够实现这些测量.

在 SELENE 任务中, 为研究月球内部结构, 采取了如下方案. 关于月球起源有 4 种假说, 其中最可信的一种也许是“大碰撞说”. 按照这一假说, 月球并不存在高质量密度的球形月核; 即便存在月核, 也应该很小. 因此, 对月核质量密度的估算结果便成了证实该假说的最重要的参数之一. 故此, 我们将对月核质量密度的估算作为主要的科学目标之一.

对月球惯量矩的估计除要求平坦度外, 还要求月球重力场的低阶系数, 如 C_{20} , C_{22} 等. 为了导出月核密度, 月球的惯量矩应在假定月幔和月核半径已知的条件下估计得到. 然而, 月壳的惯量矩占了整个月球惯量矩的大部分. 因此, 我们首先从重力异常来估计月壳的厚度. 这需要得到全球分布的重力场和高解析度的月面地形图. 对卫星位置的误差要求为 10 m 或更小. 对卫星高度的误差要求为小于几米, 如相对于月球表面当地高度误差为 5 m. 此外, 还需要观测得到包括月球背面在内的全月球重力场信息. 根据这些需求, 开发了新的测量技术, 如四程多普勒技术, 新的 VLBI 技术和精确激光测高技术等.

2 SELENE 中的无线电观测

四程多普勒测量和 VLBI 测量原理如图 2^[2]. 在四程多普勒测量中, 来自稳定频率源的信号从地球站发送上去, 然后被称为 RSAT 的中继卫星将信号转

发至处于月球背面的主卫星上. 信号从主卫星经中继卫星再返回到地球站. VLBI 观测通过日本国内 VLBI 网 (VERA 网) 并结合国际 VLBI 网实施. 日本国内 VLBI 网由四面口径为 20 m 的天线组成. 国际网则包括了中国的上海站、乌鲁木齐站, 澳大利亚的 Hobart 站以及德国的 Wettzell 站^[3].

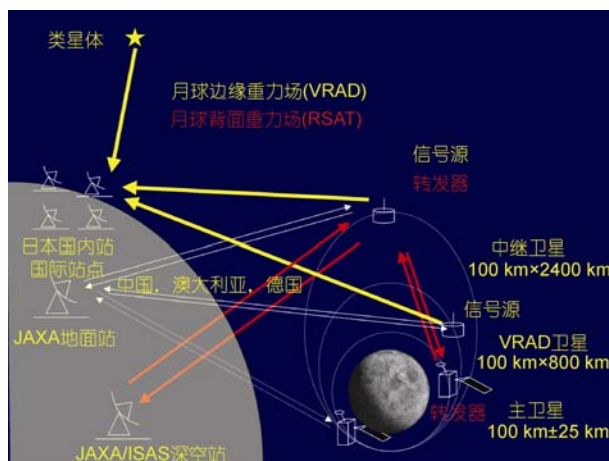


图 2 SELENE 中的无线电观测示意图

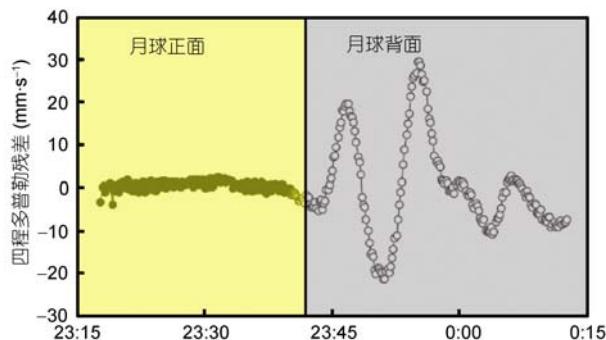


图 3 四程多普勒残差

卫星从月球正面进入月球背面的时刻为 23:40

3 SELENE 中的部分科学成果

这里给出了 SELENE 得到的部分科学成果. SELENE 之前的月球重力场模型在月球背面显示出很大的不确定性, 这是由于月球的自转与绕地球公转同步使得地面站与处于月球背面的航天器间无法建立直接的链接. 图 3 给出了主卫星从处于月球正面飞到处于月球背面的一个弧段的四程多普勒测量残差图. 观测量计算值所依赖的重力场来自于以前月

球正面观测数据计算得到的重力场。图中可以看出, 在月球正面, 残差很小, 但当主卫星到达月球背面后, 残差迅速增加。月球背面显示出的较大的残差是由于所使用的重力场模型造成的, 解算该模型所使用的测量数据不包含月球背面的测量数据。该图表明, 重力场中月球背面的信息不够精确, 同时也表明月球背面的重力场信息对于精密轨道确定是十分重要的。这样, 四程多普勒测量给我们提供了第一个精细的月球全球重力场模型。

表 1 给出了轨道确定结果^[4-6]。当仅使用多普勒和测距数据进行定轨时, 轨道误差为几十米。而当增加日本国内 VLBI 网测量数据后, 轨道误差降至约 10 m。而当进一步增加国际 VLBI 网测量数据后, 轨道误差进一步降低至 10 几米的水平。应该注意到, 轨道误差仍然包含了月球重力场模型误差。如果使用解算后精度更高的重力场模型, 则轨道误差会进一步变小。

表 1 3 种类型数据定轨结果比较

卫星/数据源	沿迹方向误差 (rms)	横向误差 (rms)
Rstar & V star/Doppler	(±70.11) m	(±50.86) m
R & V/Dop.+日本国内 VLBI	(±18.99) m	(±10.75) m
R & V/Dop.+国内国际 VLBI	(±11.11) m	(±7.62) m

现在我们将重力场解算结果与以往的结果进行比较, 如图 4 所示。虚线代表 NASA 的 LP 探测器得到的重力场模型系数的误差阶方差, 白色圆圈代表 SELENE 的结果。黑色圆点代表 LP 重力场模型球协函数系数阶方差, 细线代表 SELENE 的结果^[7]。很明显, 四程多普勒与 VLBI 测量能够改进重力场的估算精度, 并且精度的提高使得我们能够研究月球内部结构, 这一点与地球情况类似。我们相信月球测地学, 我们称之为测月学, 才刚刚开始。

图 5 给出了月球背面重力场比较图^[7]。SGM 代表 SELENE 的重力场模型, 而 LP 代表月球勘探者的重力场模型。在 SGM 图中, 可以看到撞击坑周围清晰的轮廓^[8]。

图 6~8 给出了 SELENE 的激光高度计测量数据处理结果^[9], 这些图为高度分布图。激光高度计(称为 LALT)能够得到主卫星到月球表面的距离, 测量分辨率可达 5 m。另一方面, 主卫星相对于月球质心的距离可以被确定下来。因此, 月面高, 从月球质心到

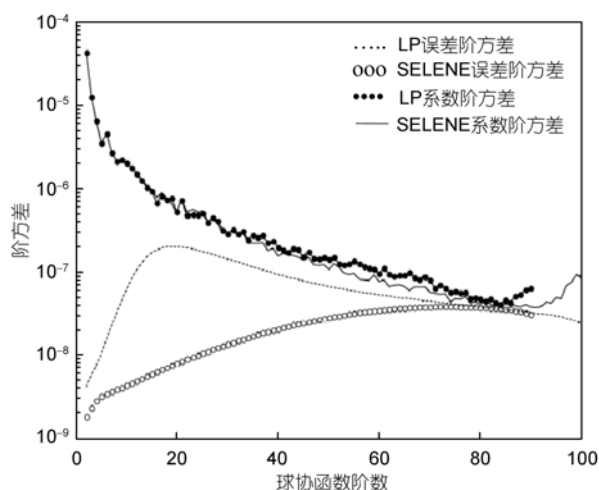


图 4 重力场系数阶方差及误差阶方差比较

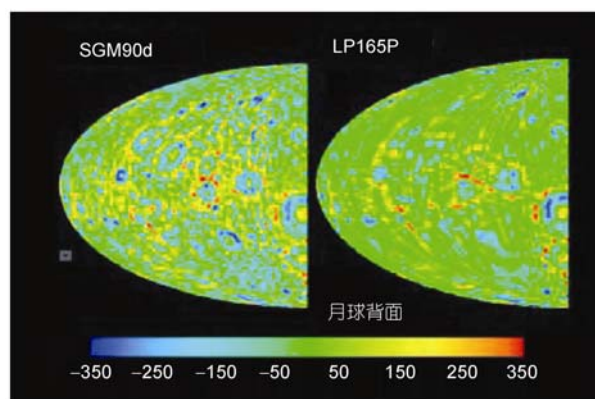


图 5 月球背面重力场比较

SGM90d 来自 SELENE, LP165P 来自 LP

月球表面沿径向的距离, 可由上述参数导出。正因如此, 所导出的月面地形的精度不仅依赖于激光高度计的测量精度, 而且依赖于轨道精度。激光高度计每秒获取一个测量数据, 测量持续了约一年半的时间。在 SELENE 之前, 超过 86° 的高纬度地区没有高度测量数据, 因此该结果为首次获取的月球极区的精细月面地形信息。

这里将 SELENE 得到的月面地形球协函数振幅与以前公布的 ULCN2005 的结果进行比较, 如图 9 所示。对于低阶的情况, 频谱特征是类似的。然而对于超过 30 阶(相应于月球表面 180 km 的尺度)的情况, SELENE 给出的结果与之前的结果相比, 月面地形显得更加高低不平。总的来说, 行星地形球协函数频谱在对数坐标中表现为线性。地形的这一特征是尚待

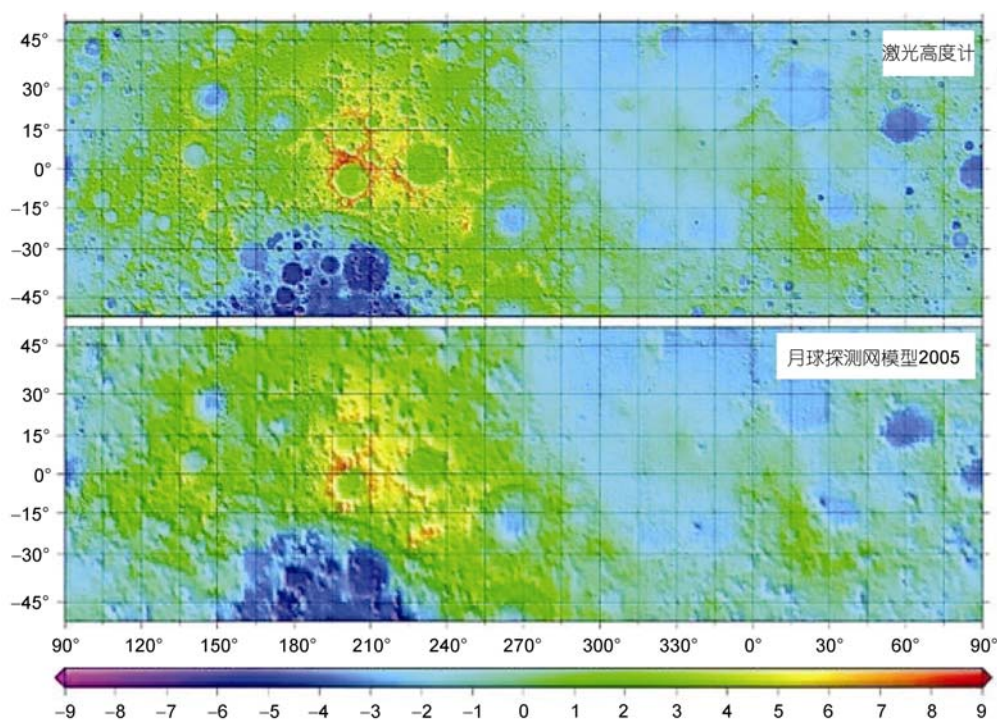


图 6 SELENE 的 LALT 月面地形图与之前的 ULCN2005 地形图的比较

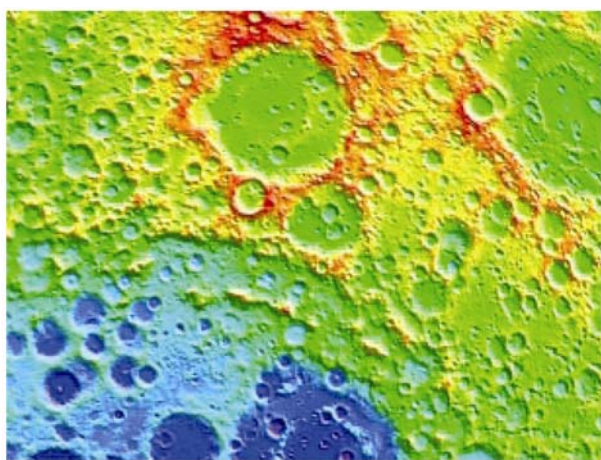


图 7 SELENE 月面地形图局部放大图

解决的问题之一.

存在两种重力异常, 一是自由空间重力异常, 一是布格重力异常. 正的自由空间重力异常代表该处月壳隆起, 高于周围的环境. 另一方面, 正的布格重力异常代表该处地表以下质量较大.

SELENE 给出的布格重力异常与自由空间重力异常如图 10. 我们来关注一下月球正面的 3 个大的撞击坑, 这些撞击坑的自由空间重力异常与布格重

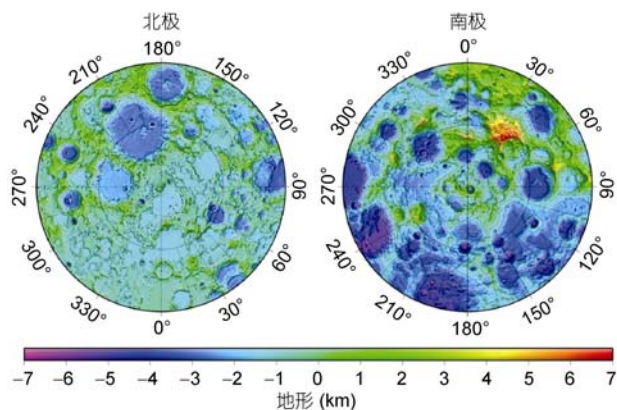
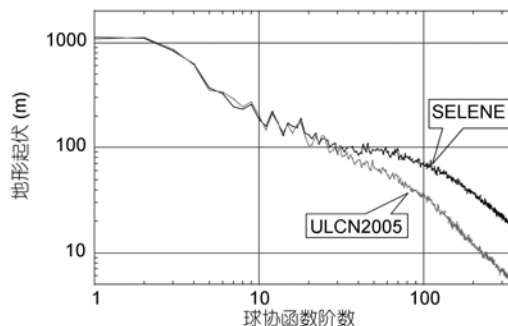


图 8 月球两极地区月面地形图

图 9 基于球协函数展开的月面地形起伏比较
黑线为 SELENE 结果, 灰线为 ULCN2005 结果

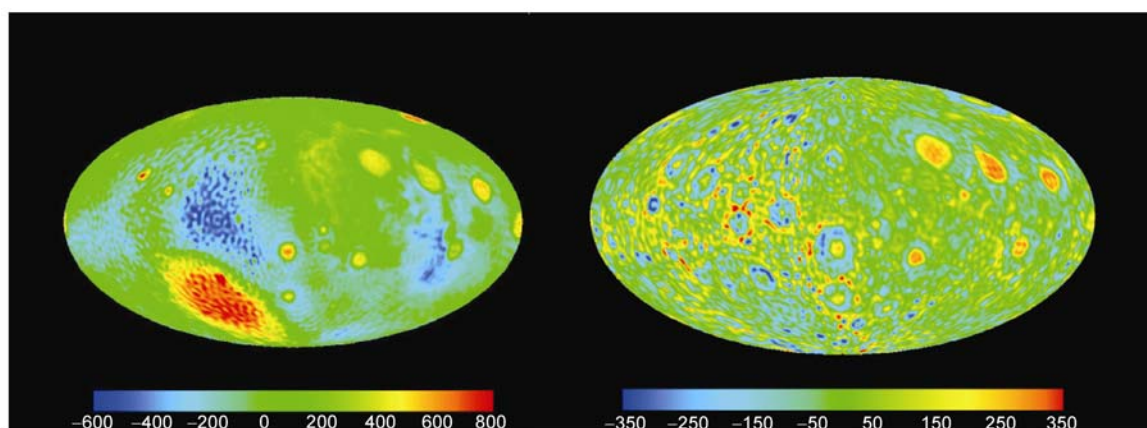


图 10 布格重力异常(左)与自由空间重力异常(右)

椭圆的左半边代表月球背面, 右半边代表月球正面

力异常均为正值, 这表明所有撞击坑均有质量瘤存在. 然而在月球背面, 我们发现情况有所不同. 在某些撞击坑的中央, 自由空间重力异常为负值. 对每一个撞击坑进行这些研究后, 我们可以对月球表面具有重力异常现象的撞击盆地进行分类. 表 2 列出了这一分

类的部分结果^[8]. 当然, 不同类型的海盆或撞击坑具有不同的演化历史. 关于这些问题的研究刚刚开始.

为了研究月核存在与否, 月球大地测量观测的目标之一就是得到月亮厚度的全球分布. 图 11 给出了月亮厚度的全球分布^[10]. 图 11 中可以看出月球正

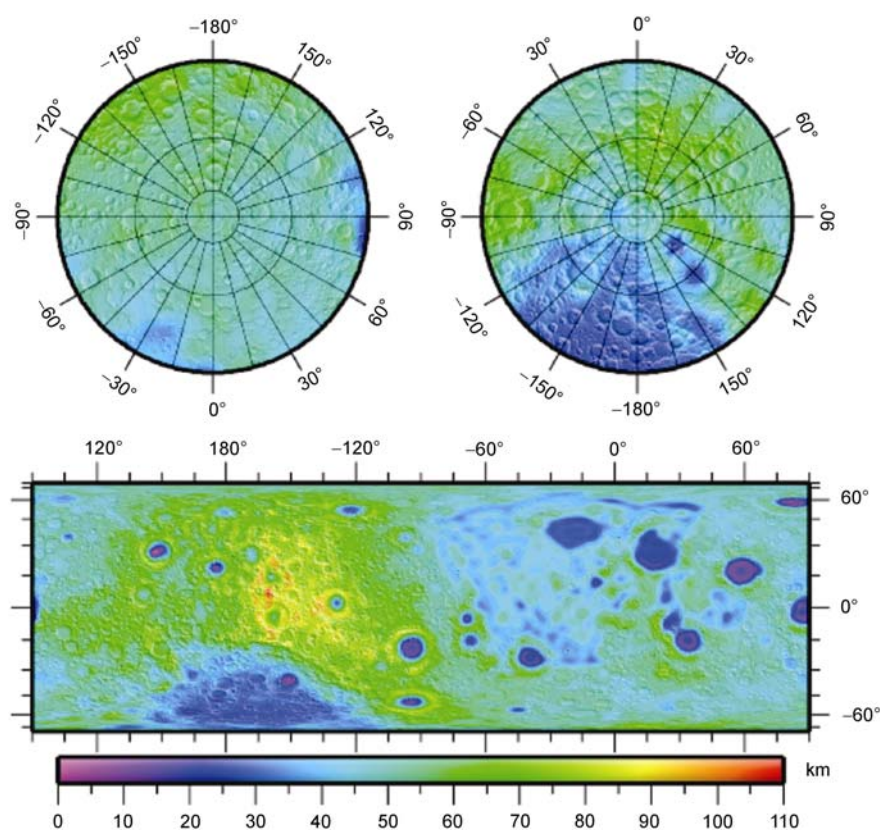


图 11 月亮厚度分布图

表 2 月面撞击盆地分类(Namiki 等)^{a)}

盆地名称	类型	月海火山	直径 (km)	盆地中央位置
Kolorev	I		810, 590, 440, 220	4.5S, 147W
Mendeleev	I		365, 140	6N, 141E
Planck	I	Y	325, 160	57.5S, 135.5E
Lorentz	I		365, 170	34N, 97W
Dirichlet-Jackson	I		470	14N, 158W
Schiller-Zucchi	I		335, 175	56S, 45W
Hertzprung	II		570, 380, 255, 150	1.5N, 128.5W
Apollo	II	Y	720, 480, 240	36S, 151W
Moscovience	II	Y	630, 420, 300, 220, 140	26N, 148E
Crisium	PM	Y	1600, 1080, 740, 540, 360	175.N, 58.5E
Nectaris	PM	Y	1320, 860, 620, 400, 240	16S, 34E

a) PM 为主要的质量瘤

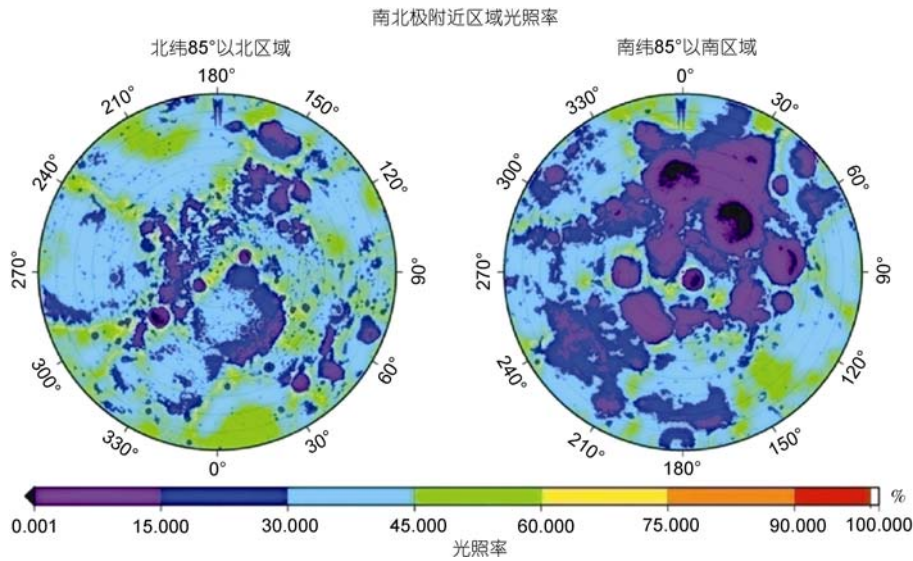


图 12 月球极区光照率分布图(Noda 等人^[11])

颜色尺度相应于光照率从 0.01%~99%. 0.00%为纯黑, 100%为纯白. 0.01%相应于 20 年中的一天

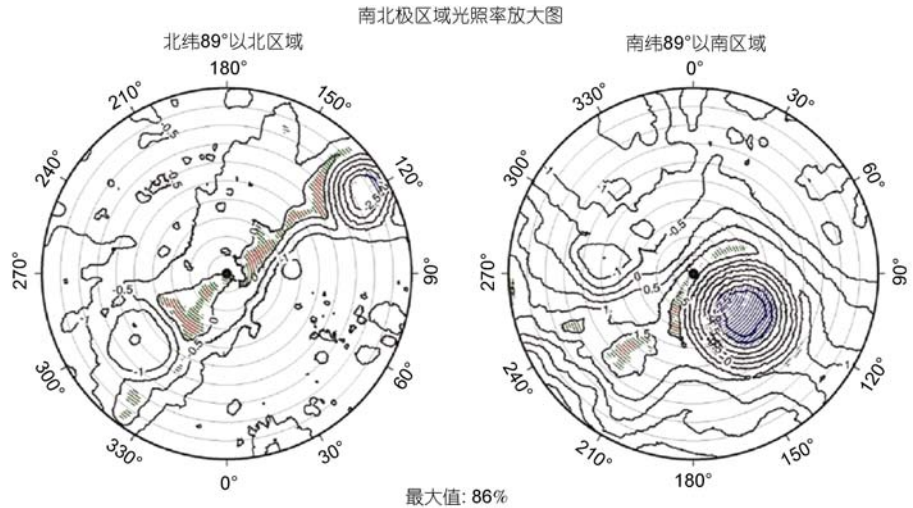


图 13 月球极区光照率放大图

仅给出光照率超过 80%的区域(红色), 光照率为 70%~80%的区域(绿色)及光照率为 0 的区域(蓝色)图中给出等高线, 等高线间距为 0.5 km, 高度标注在等高线上

面与月球背面月壳厚度的清晰对比, 月球背面月壳较厚而正面则较薄. 然而在月球背面存在一些大的撞击坑, 其月壳厚度较薄. 对这些撞击坑的月球物理分析, 如对月壳均衡的研究等, 可以给我们提供关于月壳温度演化的信息.

SELENE 的另一个重要的科学成果是得到了月球极区的光照率详细分布图 12 和 13. 在不久的将来, 人类的活动将延伸到月球, 并将建造月球基地. 从这个角度来说, 极区将是人类建造月球基地的备选区, 因为这里容易获得全天候的太阳能. 过去的研究成果表明在月表存在光照率接近 100% 的区域, 但不幸的是, SELENE 获得的详细的地形图表明在月球表面的任何区域光照率不会超过 86%.

4 结论

月球探测卫星 SELENE 取得了许多新的科学成果, 不仅包括这里提到的月球大地测量成果, 而且还有来自其他 11 种测量设备的成果. 中国的月球探测卫星“嫦娥一号”也已获得了许多辉煌的成果^[12], 印度的月球探测卫星“月船一号”也是如此. 关于月球科学与月球探测的新时代正在来临, 包括美国及欧洲在内的许多国家和组织也参与其中. 中国后续的月球探测计划目前也正在实施之中. 当然, 其他国家或组织的月球探测计划也在实施之中, 如 NASA, ESA 和日本等. 我们希望这些国家或组织在月球探测领域能够加强相互间的合作.

参考文献

- 1 SELENE Project Team. Scientific Research in SELENE mission. printed by JAXA, 2000
- 2 Iwata T, Minamino H, Sasaki T, et al. Mission outline of selenodesy by KAGUYA (SELENE) and development and on-orbit properties of sub-satellite: OKINA and OUNA (Rstar and Vstar). *J Geodetic Soc Jpn*, 2009, 55(2): 135—150
- 3 Hanada H, Iwata T, Kikuchi F, et al. Differential VLBI observations of two sub-satellites of SELENE (KAGUYA), OKINA and OUNA for lunar gravimetry. *J Geodetic Soc Jpn*, 2009, 55(2): 203—221
- 4 Kikuchi F, Liu Q, Hanada H, et al. Picosecond accuracy VLBI of the two sub-satellites of SELENE(KAGUYA) using multi-frequency and same beam methods. *Radio Sci*, 2009, 44: 1—7
- 5 Liu Q H, Kikuchi F, Matsumoto K, et al. Same-beam VLBI observations of SELENE for improving lunar gravity field model. *Radio Sci*, 2010, 45, RS2004, doi: 10.1029/2009RS004203
- 6 Goossens S, Matsumoto K, Ishihara Y, et al. Results for orbit determination of the three satellites of Kaguya. *J Geodetic Soc Jpn*, 2009, 55(2): 255—268
- 7 Matsumoto K, Goossens S, Ishihara Y, et al. An improved lunar gravity field model from SELENE and historical tracking data: Revealing the farside gravity features. *J Geophys Res*, 2010, 115: E06007, doi:10.1029/2009JE003499
- 8 Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside gravity field of the Moon from four-way Doppler measurements of SELENE (Kaguya). *Science*, 2009, 323: 900—905
- 9 Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimeter. *Science*, 2009, 323: 897—900
- 10 Ishihara Y, Goossens S, Matsumoto K, et al. Crustal thickness of the Moon: Implications for farside basin structures. *Geophys Res Lett*, 2009, 36: L19202, doi:10.1029/2009GL039708
- 11 Noda H, Araki H, Goossens S, et al. Illumination conditions at the lunar polar regions by KAGUYA (SELENE) laser altimeter. *Geophys Res Lett*, 2008, 35: L24203
- 12 Special topic: Chang'E-1 has blazed a new trail for the Chinese deep space sciences. *Sci China Ser G-Phys Mech Astron*, 2009, 52(12): 1813—2058