0254-6124/2024/44(6)-0965-05 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

WU Ji. Lunar Based Earth Observation and Its Potential Applications (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2024, **44**(6): 965–969. CSTR:32142.14.cjss.2024–0116. DOI:10.11728/cjss2024.06.2024–0116

月基对地观测的特点与应用潜力分析

吴　季

(中国科学院国家空间科学中心　北京　100190)

摘　要　伴随着中国月球探测计划的进展, 特别是载人登月计划的实施, 建设综合性的月球科研基地已成为正在设计和即将实施的国家规划. 为了充分发挥月球科研基地的作用, 针对月基对地观测特点和潜在应用展开分析. 根据月球轨道的独特视角, 从地球系统科学、可持续发展、空间物理和空间环境监测等方面讨论多个相关需求和潜在的研究方向. 这些需求和研究方向能够为无人或载人月球科研基地的设计, 以及制定未来发展规划提供必要参考. 同时, 这些思考和建议也为地球系统科学研究提供了新的研究视角.

关键词　月球基地, 对地观测, 地球系统科学

中图分类号　P184

Lunar Based Earth Observation and Its Potential Applications

WU Ji

(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

Abstract　Along with the progress of the national lunar exploration program of China, in particular of the manned lunar landing mission development, to design and construction a lunar research base will eventually become next step of China's national program. In order to fully explore the utilization of this lunar research base, the characteristics of the lunar based Earth observation from its unique orbit are analyzed. From those characteristics, potential applications in Earth system science and sustainable developments, space physics and space environment monitoring are identified. Those research and application demands would be useful for the design and plan of the future lunar base both for manned and robotic-only. At the same time, it would also be new inputs for Earth system studies.

Key words　Lunar base, Earth observation, Earth system science

0　引言

伴随着嫦娥工程的实施, 中国已经具备了对月球开展全面探测的能力, 包括绕飞遥感探测, 着陆表面的巡视探测, 以及采集月球土壤样品并返回地球的能力. 在未来的规划中, 提出了建立月球科研站的设想, 进入到开发和利用月球资源的新阶段[1].

月球资源主要包括三个方面. 一是月球上本来就

2024-09-12 收到原稿, 2024-10-07 收到修定稿

©The Author(s) 2024. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

具有的物质资源, 例如氧、铁、可能的水冰, 以及各种矿物质和稀有元素如氦 3 等, 其中可以用于能源的氧、水冰、氦 3 等也可以独立称为能源资源. 矿物和月壤部分可成为建筑材料的资源也可称为建筑材料资源等. 但是这些都是月球本身的资源, 国际上统称为月球本身具有的资源 (of the Moon). 二是月球表面自然存在的, 1/6 地球重力的弱重力资源, 几乎绝对真空的环境资源和没有了大气阻隔的丰富的太阳能资源等, 国际上统称为表面环境资源 (on the Moon), 其中太阳能资源也可归类为能源资源的一部分. 三是将月球作为一个观测基地, 利用月球表面无大气, 以及月球背面屏蔽了来自地球的无线电干扰的宁静的电磁环境, 开展对宇宙的全电磁波频段天文观测, 以及对地球开展观测的资源, 国际上统称为观测资源 (from the Moon). 其中第三个方面中的观测资源, 特别是对地观测资源往往被忽视.

在之前的中外月球探测计划中, 无论是轨道器还是着陆器, 都曾经搭载过对地观测设备, 例如中国嫦娥三号着陆器上的极紫外成像仪, 开展了人类首次对地球空间等离子体层的成像探测[2]. 在后续的嫦娥 7 号、嫦娥 8 号任务中也都有考虑搭载对地观测的科学载荷. 这些都表明, 开展对地科学观测已经得到初步重视. 历史上阿波罗 8 号飞船, 在人类第一次飞往月球的时候, 用彩色相机拍摄了一张蓝色的地球在月面上升起的照片, 虽然不是为了科学研究, 但从人类认识自身的哲学层面, 确成为了当时轰动一时的历史事件. 该照片被命名为地出 (Earthrise)[3].

但是在大部分月球任务中, 并没有将对地观测作为主要科学目标, 其主要原因有三个. 一是因为目前的月球探测还是以研究月球本身为主, 对地观测为次要目标; 二是因为地月之间距离遥远, 月基遥感器获得的地球图像的空间分辨率, 远不如近地轨道卫星, 甚至不如高度在 36000 km 的地球同步轨道卫星上所获得的图像的空间分辨率; 三是因为人们对从月球观测地球的独特性认识不足, 还没有认识到来自月球的对地观测具有极为特殊的视角和作用.

在国家自然科学基金委员会重大基金等项目和中国科学院空间科学先导专项的支持下, Guo 等[4] 对月球对地观测开展了深入研究, 分析了将月球作为对地观测平台的长期性和稳定性特点, 并提出利用多个月基平台开展地球系统科学研究的方向. 本文将在此基础上, 进一步展开对月基平台的独特性质的分析, 以及开展深入的月球独特视角的对地观测需求分析. 最后对相关遥感器 (望远镜) 的工程需求也做了初步的分析.

1 月球轨道的独特视角

月球距离地球约 3×10^5～4×10^5 km, 平均距离约为 3.84×10^5 km, 是近地轨道 (600 km) 的 600 多倍, 是地球同步轨道的 10 倍, 因此在遥感器同样孔径的情况下, 其对地观测的空间分辨率要比地球同步轨道低一个数量级.

月球轨道具有以下几个不可替代的视角特点.

(1) 每 29.5 天, 从不同的地球地理时间视角, 围绕地球环视一圈, 其中包括农历初一前后看到地球被太阳全部照亮的日侧和农历十五前后看到地球全部黑暗的夜侧.

(2) 在每一个地球的地理时刻可以在 24 h 内观测到全球各地.

(3) 以上视角在一年四季中的变化, 例如北半球夏季时可以观测到北极的极昼和南极的极夜, 北半球冬季时可以观测到南极的极昼和北极的极夜.

(4) 观测完整地球的视场为 1.92°, 是从地球观测月球时月球视场的 3.7 倍.

(5) 每 29.5 天中, 大约有 1/10 的时间月球处于到达地球的太阳风上游区域.

(6) 当月球处于地球与太阳之间的日地连线附近时, 观测整个地球磁层 (以磁层顶高度为 10 R_e (地球半径), 晨昏侧为 20 R_e 为例) 的视场约为 40°. 这个视场中包括了内辐射带和外辐射带, 以及南北极的极隙区和极光带. 从地球的晨昏侧观测整个磁层时, 这个视场包括整个磁层顶和磁尾的部分区域. 在月球处于地影侧时, 月球将穿越磁尾区域.

(7) 以上所有视角特征是按地球公转年重复的.

2 月基对地观测的其他特点

2.1 地球在天空中的位置

一旦月球基地的选址确定, 地球在天空中的位置也就确定了, 这是地球对月球潮汐锁定的反观效应. 也就是说, 由于潮汐锁定, 在地球上只能看到月球的

一面, 看不到另一面. 反之, 这个效应在月面上的作用是, 一旦探测器或航天员降落在了月球表面, 地球在天空中将始终在一个位置上. 即使考虑到月球自转的天平动, 地球在天空中的位置也只做 6°～7°的移动, 对月基对地观测没有实质性的影响.

具体来讲, 如果月球基地在月球的北半球东侧 (第一象限), 地球将呈现在基地天空的南天偏西的方向上; 如果月球基地在月球的北半球西侧 (第二象限), 地球将呈现在基地天空的南天偏东的方向上; 如果月球基地在月球的南半球西侧 (第三象限), 地球将呈现在基地天空的北天偏东的方向上; 如果月球基地在月球的南半球东侧 (第四象限), 地球将呈现在基地天空的北天偏西的方向上. 另一个特点是, 如果月球基地在月球北半球, 地球将呈现为上北下南, 例如人们熟悉的地图及地球仪形态. 如果月球基地在月球南半球, 地球将呈现为上南下北, 与熟悉的地图及地球仪形态相反.

地球在天空中的高度也会因月球基地的位置不同而不同. 如果基地靠近月球赤道和 0°经度, 也就是从地球看过去的月球正中间区域. 地球将呈现在天顶附近. 如果月球基地在远离这个中心的位置上, 随着其纬度和经度的提高, 地球将呈现为逐渐贴近月平线. 如果基地在南极附近, 地球将呈现在北天区贴近月平线, 并呈上南下北的形态, 南极洲在上面, 其他各大洲都是倒过来的, 与人们心目中熟悉的地球上下颠倒. 可见对于月基对地观测, 人们的需求也许会对月球基地选址提出要求. 例如观测地球空间的需求 (磁层、辐射带、电离层等) 就会对月球基地的纬度提出要求. 如果基地建设在南极, 将无法观测到地球空间 (约 40°视场) 的全部. 当然, 如果月球基地在月球背面, 地球将不会出现在天空中, 也就无法开展月基的对地观测.

2.2　遥感器 (望远镜) 的姿态

月基对地观测遥感器或光学望远镜的姿态也与月球基地的位置密切相关. 同上, 地球在天空中的位置决定了遥感器的指向. 如果遥感器的视场需要覆盖整个地球, 或者地球空间 (整个磁层), 由于地球在天空中的位置相对遥感器 (望远镜) 只做很小的天平动. 因此, 月基对地观测的遥感器是不需要大型转台的. 也就是说只需把遥感器的指向按照月球基地的位置设计好, 然后放置在那里就永远也不需要调整其指向. 这个特点对减少遥感器的造价, 降低成本, 提升运行寿命提供了极大的方便.

当然, 如果光学望远镜的视场小于 7°, 并要对特定的地区实施观测, 则需要自带小型转台. 转台的目的不仅仅是为了调整方向, 根据需求观测不同的目标, 还因为地球在不停地自转, 要想连续观测同一个目标, 需要转台跟踪地球的自转. 但是由于地球转速很慢, 且跟踪范围只需要在 7°以内调整, 这个转台相对需要大方位调整的转台还是要简单和廉价得多.

对于较低频的毫米波及微波遥感器, 由于其视场较宽, 则无需安装转台, 这与地面上的射电天文望远镜完全不同, 成本会大大降低, 从而特别适合于建设很多单元天线的干涉成像射电望远镜阵列.

3　利用月球基地独特视角的应用举例

尽管地月之间的距离有 3.8×10^5 km 之遥, 但是由于其独特的视角, 仍然有很多无法替代的应用.

3.1　地球的辐射收支研究[5]

当月球运行到日地连线之间的时候, 也就是农历初一前后, 地球将呈现出被太阳完全照亮的正午地理时间. 当月球运行到地球阴影中, 也就是农历十五前后, 地球将处于子夜地理时间. 如果在这两个时间段, 对地球的红外辐射进行观测, 就可以得到两个位置时的辐射差值, 设来自太阳的辐射恒定, 这个差值就是地球所吸收到的来自太阳的能量. 当然, 这两个位置的辐射相差 14.75 天, 以及具有轨道倾角的变化, 一次观测的差值具有一定的误差. 因此需要通过长期的观测, 甚至数年的观测数据的积累才能获得比较准确的平均辐射收支的数值.

此外, 在月球运行至除了正午和子夜地理时间两个位置以外, 其他位置仍可以做辐射量的观测, 这些数据也是非常珍贵和稳定的, 通过更复杂的模型, 也许可以补偿相差 14.75 天的正午和子夜的辐射收支量. 为此, 需要开展进一步的研究工作.

由于开展这个观测的红外遥感器并不复杂, 属于小型遥感器, 只需测量辐射流量不需成像, 因此其经费需求并不高. 但是经过长期连续的观测, 其数据对研究全球变化具有很重要的科学意义.

与其类似的其他计划有中国科学院先导专项支

持的拉格朗日地文台预先研究项目, 也就是发射两颗卫星, 分别放置于拉格朗日 L1 和 L2 点, 实时监测地球的辐射收支. 这个计划获取的数据应该比从月球基地获取的数据更为准确, 甚至能得到当日的辐射收支. 但是由于卫星本身经费及为了定点 L1 和 L2 点所需的运载经费很大, 再加上卫星运行寿命和风险等限制, 最终成本和效益并不一定比月基辐射收支观测来得更经济和可靠.

3.2 地球系统圈层的研究

地球系统包括岩石圈、水圈、大气圈、生物圈. 与全球变化密切相关的还有新的提法, 例如更为综合性的能量圈以及与人类活动关系密切的碳圈.

从近地轨道 (LEO) 上观测地球圈层, 无法获得全景图像. 从地球同步轨道观测, 轨位和频率都让位于通信和气象观测卫星. 如果轨道与地球不同步, 很难形成具有一定周期性和规律性的稳定观测数据.

由于观测地球系统圈层的变化, 特别是长周期的变化, 无需很高的地面分辨率, 百千米级即可, 月球轨道视角则成为最合适的选择. 其主要优势如下.

(1) 如第 1 节所述, 其观测视角极具规律性, 且覆盖全球地理位置和每个地理位置的地理时间, 同时具有 29.5 天、季节和周年可重复性, 适合研究长期变化.

(2) 各圈层信息需要的各个频段的遥感器 (望远镜), 这些设备可以同时放置在月球基地, 例如观测水、冰的微波遥感器, 观测大气的毫米波遥感器和红外遥感器, 观测陆地和植被的可见光望远镜等. 这么多的仪器放置在同一个基地内, 没有像卫星平台那样的载荷重量和安装位置的限制, 是非常难得的. 这些设备不但可以提供多频段、共视角、同时相的数据, 便于数据融合, 综合处理, 还可以为气象预报、海洋预报提供应用数据支持.

3.3 可持续发展研究

利用第 1 节中的独特视角 (2), 可以开展人类可持续发展研究. 例如, 利用微光相机, 可以在夜侧研究不同城市和国家灯光及其发展变化, 反映人类活动和能耗需求. 也可以在晨昏侧用红外相机, 观测二氧化碳排放变化, 研究不同国家和城市人类出行活动规律和污染排放. 这类研究需要的空间分辨率稍高, 但 10 km 级即可覆盖中小城市. 这项工作目前在中国科学院可持续发展卫星上已经完成试验并开始了初步的应用[6].

3.4 空间碎片研究与近地小行星碰撞预警

在月球轨道的距离上, 可以利用地冕仪 (遮挡地球) 观测地球周围的空间碎片. 不同的月球轨道位置, 有利于全面掌握地球周围空间碎片的分布和发展. 特别是对一旦发生碰撞后的碎片演化开展研究.

地面上的碎片观测望远镜在观测近地目标时, 只能在地影天光的晨昏时刻观测. 而在月球基地, 利用地冕仪在地球上的各个地理时刻都可以观测到近地目标, 与地面监测望远镜形成互补, 并对可能发生的近地小天体对地球的撞击实施预警.

3.5 地球磁层整体行为及空间环境研究与监测

在月球轨道距离上观测地球磁层 (约 40°视场), 是远近适中的距离. 因此, 月基的地球空间环境研究与监测是非常重要的应用需求. 其观测设备包括 X 射线成像仪, 极紫外成像仪、紫外成像仪, 中性原子成像仪等. 这些都是中小型设备, 但可以开展对磁层顶、等离子体层、环电流、辐射带和极光的成像观测. 研究其对太阳爆发的响应, 并为地球空间天气预报提供不可替代的数据.

关于月球在日侧处于太阳风上游和在夜侧处于磁尾中的轨道特点, 由于月球是一个很大的天然物体, 在太阳风和磁尾中行走时必然会对周边的空间环境带来影响, 改变其磁场和粒子的分布, 因此在月面开展就地探测, 只能观测到月球表面的环境状态, 不能反映周边整体空间环境的状态.

4 月基对地观测的工程需求

尽管月基对地观测有许多独特的需求, 仍需考虑如何将这些科学仪器运至月球, 安装在基地上, 并使其正常运行. 因此需要对其提出的工程需求加以分析.

在运载方面, 仅对较大的望远镜 (例如超过 1 m 孔径), 需要考虑单独的运输, 其他中小载荷无需单独运输, 随基地建设的运输带到月面即可. 此外, 如果考虑微波阵列天线, 由于数量大, 也需要考虑单独运输.

在安装方面, 如果是无人基地, 则需要考虑机器人自动安装. 可以用基地的通用机器人, 对其做特殊的培训, 并注入安装程序. 然而无论是光学望远镜, 还是微波天线都需要硬化的稳定的安装平台. 这个可以与基地建设一并考虑. 如前所述, 无论是光学望远镜

还是微波天线, 都无需大型转台, 一次安装到位即可. 如果是有人基地, 可以对登月航天员进行简单的安装培训, 由航天员将设备安装到位.

设备的能源由基地统一提供. 设备的电子系统由设备自带, 包括温控和防尘. 数据和控制指令由基地统一提供, 通过电缆或无线 (激光) 与基地控制中心链接. 观测设备需要传回地面的科学数据也需要由基地统一传回地面.

由于月基对地观测在月夜期间不能停止工作, 甚至很多重要的观测要在月夜期间进行, 因此, 开展月基对地观测需要在月球基地解决了月夜期间的能源问题之后才能开始全面的布局和实施. 但是在此之前, 可以布局少量在月日使用的设备, 开展试验性质的观测.

总之, 由于对地观测设备无需姿态控制, 具有很大的自主性, 因此非常便于安装和运行. 在基地其他科学和应用需求的基础上, 对地观测设备并不会给基地提出更多的额外的工程需求, 但其科学回报, 如上所述, 是不可替代和显著的.

5　结论

月基对地观测是继近地轨道卫星和同步轨道卫星之后又一个独特的对地观测平台. 随着综合性的月球科研站的设计和建设工作的展开, 月基对地观测也必将成为其主要的科研和应用领域之一, 因此分析月基对地观测优越的独特性和可能展开的研究和应用方向既是必要的也是紧迫的.

本文从月球轨道的特点出发, 详细分析了开展月基对地观测的优势并提出了多个不可替代的应用例子. 这些分析既为月球科研站建设总体设计需求提供了新的研究视角, 也可以作为对地观测和地球系统科学研究的思考起点, 引导充分利用月球基地的优势和特点, 开展创新研究与应用.

参考文献

[1] PEI Zhaoyu, LIU Jizhong, WANG Qian, *et al*. Overview of lunar exploration and International Lunar Research Station [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, **65**(24): 2577-2586 (裴照宇, 刘继忠, 王倩, 等. 月球探测进展与国际月球科研站 [J]. 科学通报, 2020, **65**(24): 2577-2586)

[2] HE H, SHEN C, WANG H N, *et al*. Response of plasmaspheric configuration to substorms revealed by Chang'e 3[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 32362

[3] POOLE R. Earthrise: A Short History of the Whole Earth [M]. 2nd ed. Manchester: 1957 Books, 2023

[4] GUO Huadong, DING Yixing, LIU Guang. Research status and prospect of moon-based Earth observation: a review[J]. *Journal of Deep Space Exploration*, 2022, **9**(3): 250-260 ((郭华东, 丁翼星, 刘广. 月基对地观测研究现状与展望 [J]. 深空探测学报 (中英文), 2022, **9**(3): 250-260)

[5] GUO H D, LIU G, DING Y X. Moon-based Earth observation: scientific concept and potential applications[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, **11**(6): 546-557.

[6] 中国科学院. 可持续发展科学卫星 1 号首批影像发布 [EB/OL]. https://www.cas.cn/yw/202112/t20211220_4818807.shtml

作者简介



吴　季　男, 1958 年 4 月生于北京市, 现为中国科学院国家空间科学中心研究员, 主要研究方向为空间科学探测与微波遥感技术.

E-mail: wuji@nssc.ac.cn