

面向月球极区特殊光照条件的地形可视化

应申^{1,2,3}, 毕杰皓¹, 陈驰⁴

1. 武汉大学 资源与环境科学学院, 武汉 430079;
2. 武汉大学 地理信息系统教育部重点实验室, 武汉 430079;
3. 自然资源部数字制图与国土信息应用重点实验室, 武汉 430079;
4. 武汉大学 测绘遥感信息工程国家重点实验室, 武汉 430079

摘要: 月球极区因其特殊的地理位置与地形特征, 造成太阳高度角较低, 光照不充分, 因此月球极区存在多处长期缺乏直接光照的永久阴影区。由于现有的月球极区影像数据中阴影范围过大, 导致其形貌表现不完全, 表现效果较差。然而, 仅从高程数据出发, 直接表现月球极区形貌, 则会出现色彩与光影效果不自然、缺乏地形细节等问题。为了更好地开展月球极区的科学研究, 需要创建一套全面、高效的月球极区形貌可视化制图方法, 因此, 本文结合高精度激光测高数据, 通过晕渲可视化的方法制作晕渲地图, 力求有效地表现月球极区的撞击坑、坑链、月溪等地貌, 使其具有直观、详细、全面的特点。同时, 在晕渲可视化地图的基础上进一步处理, 如叠加永久阴影区要素, 可得到更为清晰明了的专题地图。本文结果表明采用符合人类地理空间认知的月球极区可视化方法, 将有助于月球极区科学问题的研究交流以及月球极区探测任务的开展。

关键词: 行星制图, 月球探测, 月球极区, 地貌晕渲, 可视化

中图分类号: P283/P2

引用格式: 应申, 毕杰皓, 陈驰. 2025. 面向月球极区特殊光照条件的地形可视化. 遥感学报, 29(2): 566-577

Ying S, Bi J H and Chen C. 2025. Enhanced visualization for the special illumination in the lunar polar region. National Remote Sensing Bulletin, 29(2): 566-577 [DOI: 10.11834/jrs.20233334]

1 引言

月球是地球唯一的天然卫星, 在深空探测领域长期吸引着人们的关注, 是人类迄今为止探测最多的地外天体。自1959年美国、苏联发射月球卫星起, 欧洲、日本、中国、印度等国先后参与月球探测, 截止2024年底, 人类已进行了92次月球探测器发射 (<https://www.lpi.usra.edu/lunar/missions/> [2023-08-14])。中国“嫦娥计划”的登月计划分为探、登、驻三步, 预计将于2030年前实现载人登月 (张智等, 2022); 美国在阿尔忒弥斯计划中也明确提出要“重返月球”, 其计划在国际航天合作的框架下再次实现载人登月 (Creech等, 2022)。印度空间研究组织 (ISRO) 的第三次月球探测项目“月船3号” (Chandrayaan-3) 已于2023年8月23日实现软着陆 (Dhillon, 2023), 其着陆点位于月球

69.37°S的较高纬度地区。随着各国航天事业的不断发展以及民间商业航天的广泛参与 (Heldmann等, 2022), 月球探测的广度、深度还将不断增加。

月球极区因其特殊的地理位置与地形特征, 在撞击坑等区域存在着长期缺少太阳光照的永久阴影区。科学界普遍认为在其中有水冰分布。因此月球极区成为了当前研究与探测的热点 (吴伟仁等, 2020)。其中, 月球南极是嫦娥七号 (CE-7) 预选着陆区范围, 是中国探月工程深化月球探测的焦点。但是。由于月球极区地形复杂且太阳高度角低, 导致遥感影像中的阴影范围很大, 永久阴影区中的地形则长期缺少可见光波段的影像。这些因素导致了月球极区影像所承载的信息量明显小于中低纬度地区, 难以对月球极区的形貌产生符合月球表面环境特征的地理认知, 不利于决

收稿日期: 2023-08-14; 预印本: 2023-10-08

基金项目: 国家重点研发计划 (编号: 2019YFE0123300)

第一作者简介: 应申, 研究方向为地图学、3D GIS与三维地籍、自动驾驶高精地图、行星制图。E-mail: shy@whu.edu.cn

策、教学、科普等活动的开展。使用激光高度计等轨道载荷测得的月球表面数字高程模型 DEM (Digital Elevation Model) 不受自然光照的影响, 在月球极区依然有着较好的数据质量, 但是使用 DEM 直接生成的高程灰度图的色彩、阴影等要素不符合地图使用者对自然地形的认知习惯, 不利于地图使用者形成对月球的空间认知模式。因此, 本文在月球地形地貌的共性及月球极区地形地貌的特性的基础上, 充分考虑月球地形认知的特点, 拟利用激光测高数据覆盖全面的优势, 实现月球极区地形的增强可视化, 弥补遥感影像图阴影处地形细节缺失、高程灰度图不符合空间认知习惯的缺陷, 提高月球极区探测任务的决策能力 (王培元和关欣, 2021)。

2 月球极区的可视化需求

月球极区的光照情况与地球表面及月球中低纬度地区存在较大区别, 主要体现在较低的太阳

高度角、永久阴影区、极昼/极夜、照度较低等方面。为了与地图使用者对月球的地理空间认知意向相适应, 需要具体分析月球表面的可视化需求, 从而在正确传达形貌信息的基础上改善可视化效果。

2.1 月球极区的光照情况

2.1.1 月球地球的空间关系

月球以近圆轨道绕地球公转, 同时地球-月球也在绕太阳公转, 二者共同作用使得地球表面的观测者观察到的月相呈周期性变化。月球轨道平面与地球黄道面的夹角为 $5^{\circ}9'$, 与月球赤道的夹角为 $6^{\circ}41'$, 可认为太阳光对地球与月球的辐射情况具有相似性 (图 1), 从而使得月球在南北方向上的阴影分布规律与地球存在相似性 (欧阳自远, 2005)。同时这 2 个夹角的存在又使得月球两极的光照情况存在较长的周期变化, 出现“极昼”与“极夜”的现象。

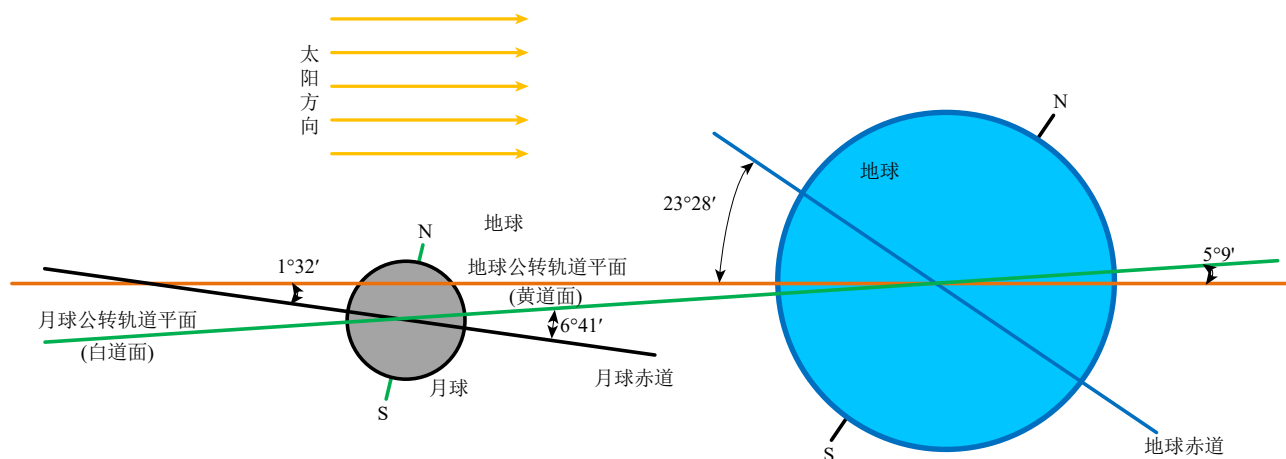


图 1 地球、月球的空间位置与光照关系

Fig. 1 The relationship of spatial positions and illuminations between the Earth and the Moon

2.1.2 月球极区与中低纬度空间认知的相似性

地图使用者对月球表面宏观形貌的在直观认知主要来自于肉眼光学观察、望远镜光学拍摄、轨道飞行器遥感影像。其中, 从地球表面使用肉眼与望远镜进行观测是最普遍的认知方式, 在很大程度上塑造了地图使用者对月球形貌的地理空间认知。对于一个平滑的漫反射球面, 从外部观察其中心亮度应大于边缘亮度, 遵循朗伯辐射定律:

$$I_{\theta} = \frac{I_N d(A \cos \theta)}{dA} = I_N \cos \theta$$

式中, θ 为发射方向与面元法线方向的夹角, A 为球面的面元, I_{θ} 为从该方向观察到的光强, I_N 为面元法线方向的光强 (Oren 和 Nayar, 1995)。朗伯辐射体的亮度越到边缘衰减越明显 (如恒星、白矮星等发光天体), 但地球表面观察到月球表面与边缘亮度区别不大 (图 2)。这说明月球表面并非朗伯辐射体, 原因是月球上普遍存在尺度远大于可见光波长的地形地貌及月壤、石块等覆盖物。因此, 地图使用者对月球两极产生了与中低纬度地区相近的视觉意向, 有利于把握极区与中低纬度地区的共性。

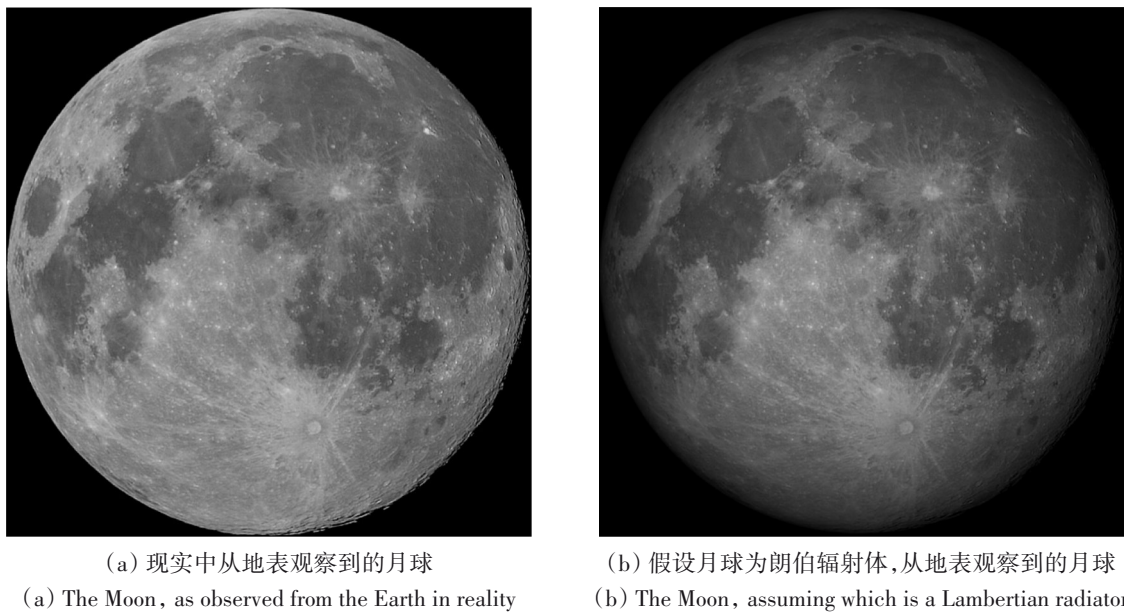


图2 从地表观察到的月球极区亮度影响人们对月球极区的地理空间认知
Fig. 2 Brightness of the lunar polar region observed from the earth affects our geospatial cognition

在长期的相互作用中，地球与月球出现了潮汐锁定，这使得地球上的观测者始终只能看到月球的一个侧面，这一侧面被称为月球正面。观测者长期以来对月球的认知主要是由月球正面塑造的，观测者普遍将反照率较低的低地称为月海、将反照率较高的高地称为月陆。但这一地形认知主要是面向月球中低纬度地区的，月球极区光照明暗关系更复杂，不利于形成清晰明确的地理空间认知。

地图使用者对月球极区与中低纬度地区的视觉意向的相似性，与月球极区光照明暗关系的复杂性，决定了本研究在对极区形貌进行增强可视化时要充分考虑极区光照特点，实现符合月球客观形貌与人类主观地形特征认知的可视化。

2.2 月球极区的地形特点

月球极区南北纬75°以上的区域坑化严重，存在大量的撞击坑，地形起伏大（Araki等，2009），其遥感影像与高程分布如图3、图4所示。

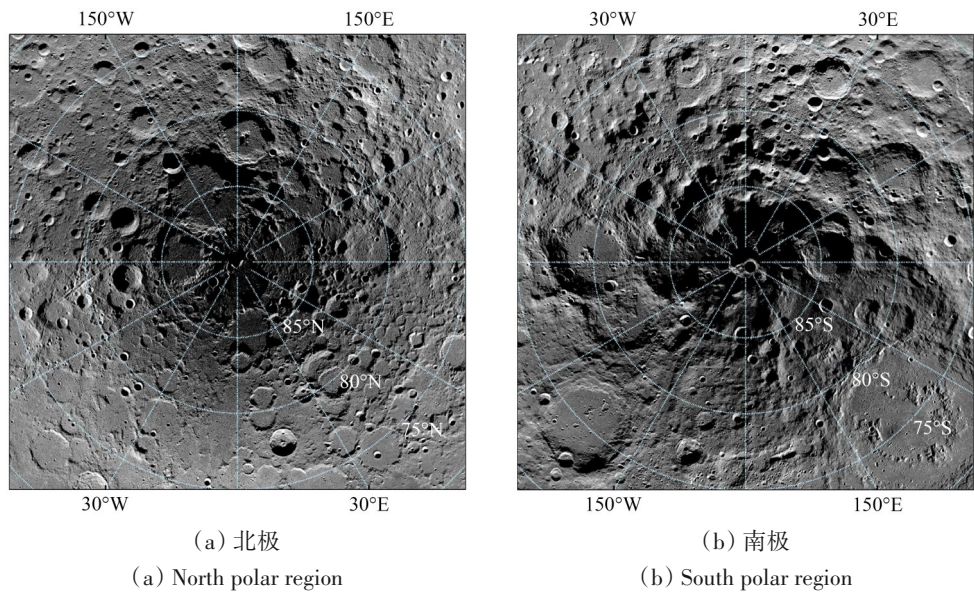


图3 嫦娥二号拍摄的月球极区正射影像
Fig. 3 Orthophoto images of the lunar polar regions by Chang'E-2

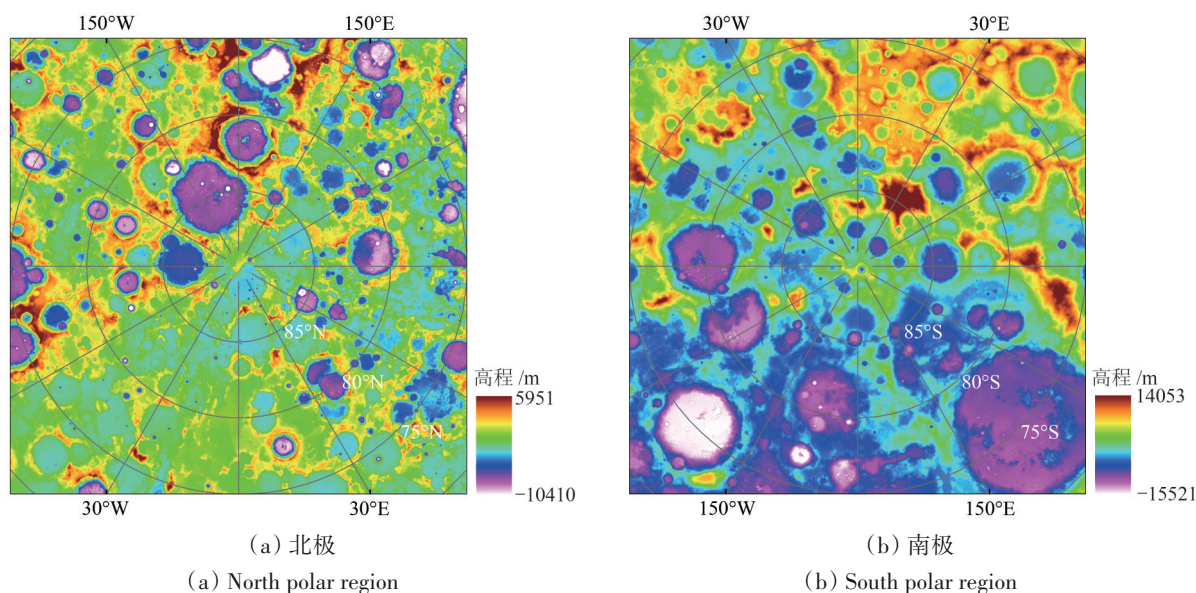


图4 根据MRO LOLA拍摄数字高程模型制作的月球极区高程图

Fig. 4 Elevation map of the lunar polar regions based on the DEM by MRO LOLA

月球北极附近区域撞击坑数量众多、高程起伏比南极附近区域小，总体呈现西半球高、东半球低的态势。除了数量很多的较小撞击坑外，较大撞击坑的深度可以达到km级：其中赫米特撞击坑（Hermite Crater）、罗兹德茨芬斯基撞击坑（Rozhdestvensky Crater）、南森撞击坑（Nansen Crater）等撞击坑内部结构复杂，存在规模较大的次生撞击坑等地貌；普莱斯克特撞击坑（Plaskett Crater）、罗兹德茨芬斯基撞击坑（Rozhdestvensky Crater）等撞击坑内部存在明显的中央峰；以及一些线性负地貌如西尔维斯特坑链（Catena Sylvester）等；此外，还有一些地貌未被命名，但也产生了较大的永久阴影区。

月球南极附近撞击坑数量多、高程起伏大，其在月球正面一侧海拔较高，月球背面一侧位于南极一艾肯盆地南端，背面侧海拔较低且存在尺度较大的撞击坑。在南极区域较大的撞击坑中，艾什布鲁克（Ashbrook Crater）、凯布斯（Cabeus Crater）等撞击坑内部结构复杂，存在较大的地形起伏；德里阿尔斯基撞击坑（Drygalski Crater）、阿蒙森撞击坑（Amundson Crater）等撞击坑内部存在明显的中央峰；以 75.0°S ， 132.4°E 为中心的薛定谔撞击坑（Schrödinger Crater）规模较大，存在一个崎岖的内环结构，内部结构复杂，还发育有月溪等线性负地貌；此外，还有一些地貌未被命名，

但也产生了较大的永久阴影区。

2.3 月球南极特殊的可视化需求

2.3.1 极端的光照和阴影分布

月球极区存在大量坡度较大的地貌（图5），地形起伏较大。极区地貌复杂、地形崎岖，这些以撞击坑为代表的广泛发育的负地貌会遮挡太阳辐射（Li等，2008），导致月球极区负地貌内部出现大面积阴影，不利于对其中的形貌进行观测，存在永久阴影区（Mazarico等，2011）和永久光照区（Bussey等，2005）。月球表面几乎没有大气，缺少大气的散射与折射作用，这进一步减弱了阴影区的亮度，不利于阴影区域的形貌在遥感影像图中的表现。

2.3.2 永久阴影区

在现实中，月球极区太阳高度角极低，极端光照条件与地形地貌的遮挡共同作用导致阴影范围过大，且存在大量永久阴影区。随着纬度越来越高，太阳高度角逐渐降低，月球极区影像图中的阴影区域占比不断增大，永久阴影区的覆盖范围也在不断扩大（Mazarico等，2011）。永久阴影区是局部阴影范围的极小值，在实际拍摄到的遥感影像中，受限于客观条件，影像图中的阴影区范围往往远大于永久阴影区（图6），这对永久阴影区的具体位置与地形要素的表达造成了干扰。

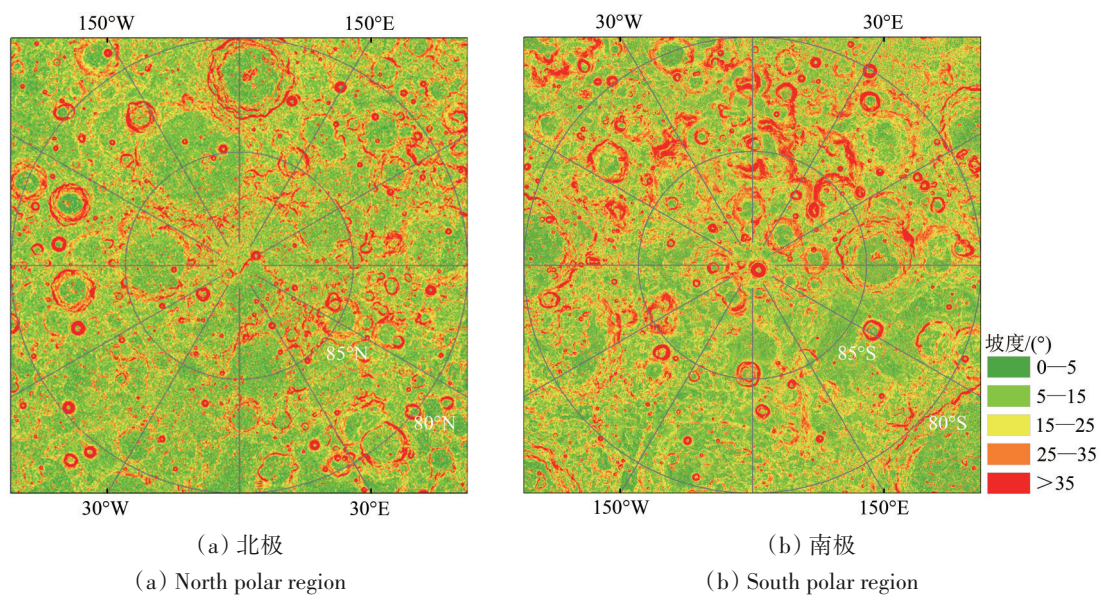


图5 月球极区坡度分布图
Fig. 5 Slope maps of the lunar polar regions

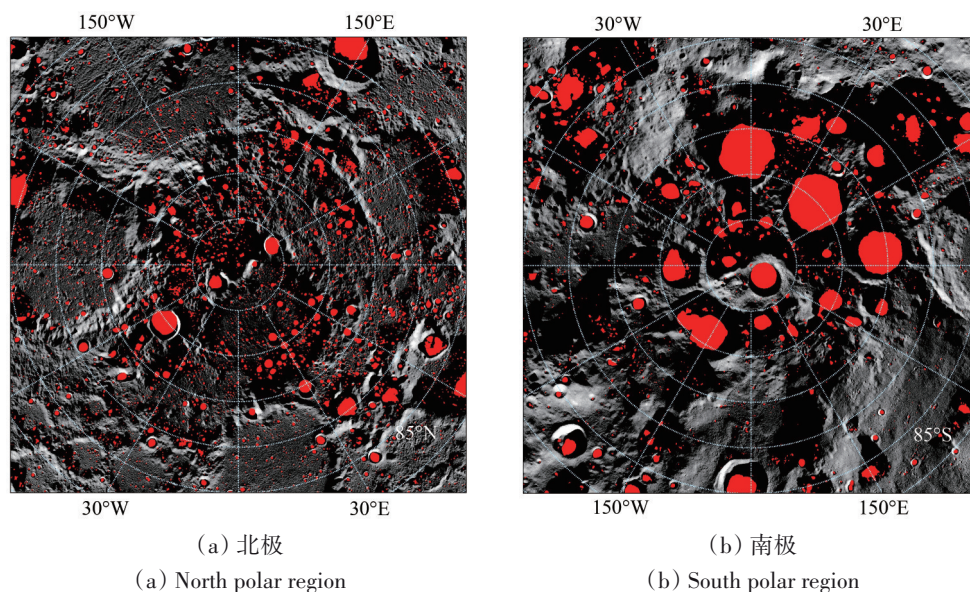


图6 月球极区永久阴影区分布图(红色部分为永久阴影区)
Fig. 6 Distribution maps of the permanently shadowed regions (red) in the lunar polar regions

这些区域大多位于撞击坑壁与撞击坑底部。受撞击坑边缘的遮挡,其内部部分区域无法接收到太阳辐射,导致其表面形貌长期缺乏影像表现。但是极地永久阴影区具有极高的研究价值。这些区域长期缺少光照,表层和次表层温度极低,有利于水冰的长期保存。因此彗星撞击带来的水、月球深层逸出的水、太阳风中的氢离子与月表氧元素结合成的水都可能以固态水的形式凝结并长期存在于永久阴影区中(Feldman等,2001;Fisher等,2017)。因此各个月球探测项目都对使用着陆

器对其进行就位探测展现出强烈的兴趣。此外,永久阴影区不会直接受到太阳辐射和太阳风影响,内部环境稳定,有利于建设永久月球基地并在此基础上展开进一步的深空探测。同时,高纬度地区较少受到空间风化作用影响(Hemingway等,2015),尤其是永久阴影区内部环境稳定,有利于表层、次表层形貌与挥发分的长期保存(Crider和Vondrak,2003),对于研究月球地质演化历程、月球表面地质活动状况具有很高的价值。

对月球极地永久阴影区进行恰当的增强可视化,可以准确、直观地表现出永久阴影区的表面形貌,将有利于开展着陆区选址的评估、就位探测的路径规划、进一步探月项目的规划与选址、从着陆到探测的全流程效果展示等任务。

2.4 月球极区高程数据

星载激光高度计克服了阴影区域的低照度问题,可以填补立体影像测高在极区的漏洞(李春来等, 2018; Wu等, 2014; 邸凯昌等, 2016),最早在阿波罗 15 号(Apollo-15)上投入使用(Sjogren和Wollenhaupt, 1973),实现了月球极区高程测量全覆盖。克莱门汀(Clementine)探测器(Cook等, 2000)、月亮女神(Kaguya)探测器(Bussey等, 2010)、月球勘测轨道飞行器 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter)(Smith等, 2017)、嫦娥一号(CE-1)(王建宇等, 2010)与嫦娥二号(CE-2)(Zhou等, 2017)搭载的激光高度计都有效测量了极区高程。其中, LRO 上搭载的月球轨道飞行器激光测高仪 LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter)形成的 DEM 产品在月球极区的分辨率、精度都较高(Smith等, 2010),可作为增强可视化的数据基础。本研究中将使用 LRO LOLA 拍摄的 DEM 数据,使用增强可视化的方法与 CE-2 CCD 立体相机拍摄的 DOM 数据进行对比。

3 月球可视化方法

3.1 晕渲可视化的原理

月球的自转公转轨道特点使得其在南北方向上有着与地球相似的光照阴影特点,在此基础上借鉴对地球表面形貌的增强可视化方法有利于更好地表现月球表面形貌(应申等, 2023)。在这一过程中,我们需要整体地考虑月球与地球表面形貌的相似性与差异性,基于地球认知转移实现可视化,在地图使用者的思维中塑造符合客观实际的月球地理空间认知。将这一思路应用到月球极区,即以改善极区地形表现效果为出发点,利用激光测高数据全天候、主动测量的优点,使用晕渲可视化方法更好地表现极区低照度区域、多阴影区域、永久阴影区等地形,以符合人类认知的方式,准确、直观、高效地表现月球极区形貌。

地貌的晕渲可视化的基础是 DEM 数据,综合考虑材质、光照要素从而确定地表各点处的灰度值,实现较为真实的显示效果(郭庆胜和王晓延, 2004)。计算机图形学中经典的 Phong 光照模型将光源区分为 3 类(Phong, 1975):漫反射光 kd 、镜面反射光 ks 、环境光 $k\alpha$ 。其中漫反射光具有各向同性,镜面反射光具有各向异性(观察者正对反射光时亮度最高,具体取值与材质有关),环境光是由周围环境反射来的。解算这 3 个参数进行地形晕渲,可以得到较为真实、柔和的光影效果。

3.2 可视化参数设计

对于彩色图像和无彩色图像,晕渲图中的阴影都有利于恰当表现地形地貌信息(Kovesi, 2019)。月球表面没有植被与水体覆盖,整体上呈现灰色,在中低纬度地区表现为高反照率的月陆呈亮灰色、低反照率的月海呈暗灰色,即高程越高,灰度越高。在对极区形貌进行可视化时可以参考月球表面的这一特点,采用灰度随高程升高的高程色系。这样的色系选择既符合月球表面的总体特征,也符合人类对月球的地理认知习惯。

为了在晕渲可视化地图中表现出较强的光照—阴影关系,塑造立体感,可以对高程进行适度夸张,使阴坡、阳坡反差更明显(曹纯贫, 2003)。

4 月球极区的增强可视化

4.1 大范围可视化效果对比

对于纬度高于 85° 的极区,其照度较低,在影像图中表现为整体亮度较低、光比较大、阴影区内地形地貌难以辨认,纬度越高则此效应越明显(图 7(a)、图 8(a))。这些区域撞击坑数量多、高程起伏大、太阳高度角低,形成了大量永久阴影区,显示效果较差。使用 LOLA DEM 数据,模拟光照生成晕渲图,可有效改善显示效果(图 7(b)、图 8(b))。通过恰当选取光照方位角、高度角、高程色系、地形夸张程度(应申等, 2023),在地图中合理表现绝对高程与相对高程关系,具有较强的立体感,可以实现较好的显示效果。这一符合月球表面地貌特征的地图有助于地图使用者快速建立对于月球极区的地理空间认知。

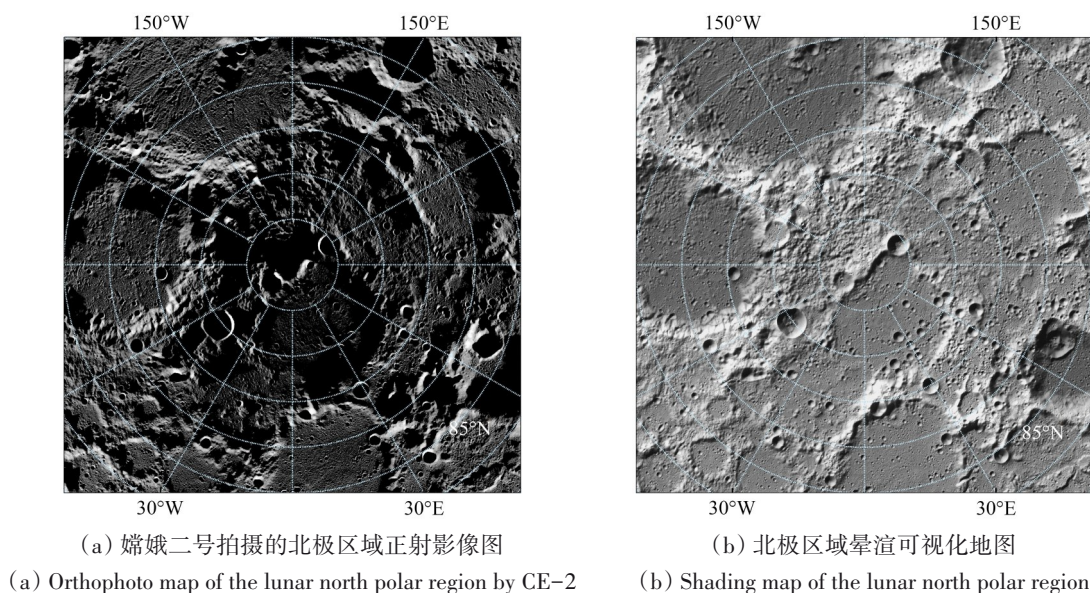


图7 月球北极区域影像图与晕渲可视化地图对比

Fig. 7 Comparison between image map and shading map of the lunar north pole regions

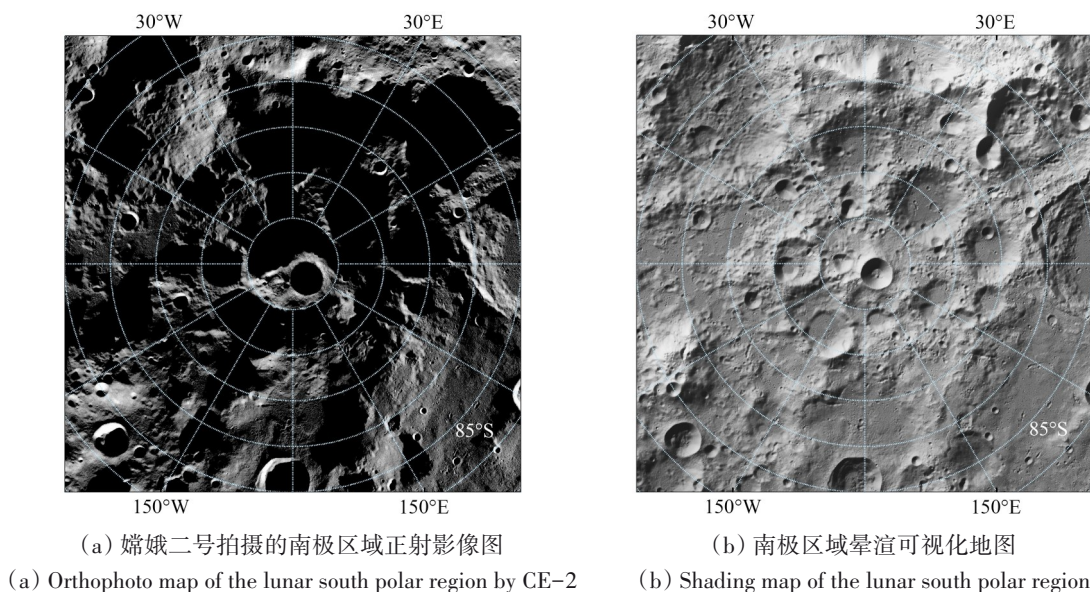


图8 月球南极区域影像图与晕渲可视化地图对比

Fig. 8 Comparison between image map and shading map of the lunar south pole regions

4.2 局部地形细节可视化效果对比

对较广范围内的极区影像图(图9(a)、图10(a)里纬度 75° 以上的区域),可以明显发现随纬度升高,月球表面照度逐渐降低,不利于绝对高程的表现与相对高程的比较。选择晕渲可视化地图可以统一不同位置上的光照条件(图9(b)、图10(b)里纬度 75° 以上的区域),避免极区光照特征引起的理解成本高的问题:以高程色系表现绝对高程(灰度越高则高程越高,灰度越低则高程越低)。

使用晕渲可视化的方法可有效改善地形细节

的表现效果:(1)图9和图10中的红色框区域撞击坑地形对入射光遮挡严重,这两处典型区域大部分区域位于永久阴影区中。在正射影像图中,其光照区域较亮,阴影区域则缺乏正确曝光地形细节、无法正确表现。在晕渲可视化地图中,光线入射角的调整、漫反射光的增强等因素有效减少了撞击坑地形对光线的遮挡,光照-阴影关系简单明确,具有较强的立体感、可以较全面地表达地貌特征。(2)图9中的绿色框区域为西尔韦斯特坑链(Catena Sylvester),是一种典型的线性负地

貌；图 10 中的绿色框区域为阿蒙森撞击坑（Amunson Crater）的局部。这两处典型区域纬度较高，且受地形遮挡，在正射影像图中其内部细节表现不充分。在晕渲可视化地图中，通过设定恰当的光照条件，可以显著改善地形显示效果，完整呈现地貌细节。（3）图 10 中的蓝色框区域为月球南极休梅克撞击坑（Shoemaker Crater），因为

其纬度很高，所以撞击坑壁对太阳光的遮挡十分明显，内部绝大部分区域都位于永久阴影区中，在正射影像图中难以表现内部形貌情况。在晕渲可视化地图中，通过设定恰当的光照条件，可以较好地表现次生撞击坑与坑链的地形地貌细节，通过高程设色的灰度表现其海拔高程。

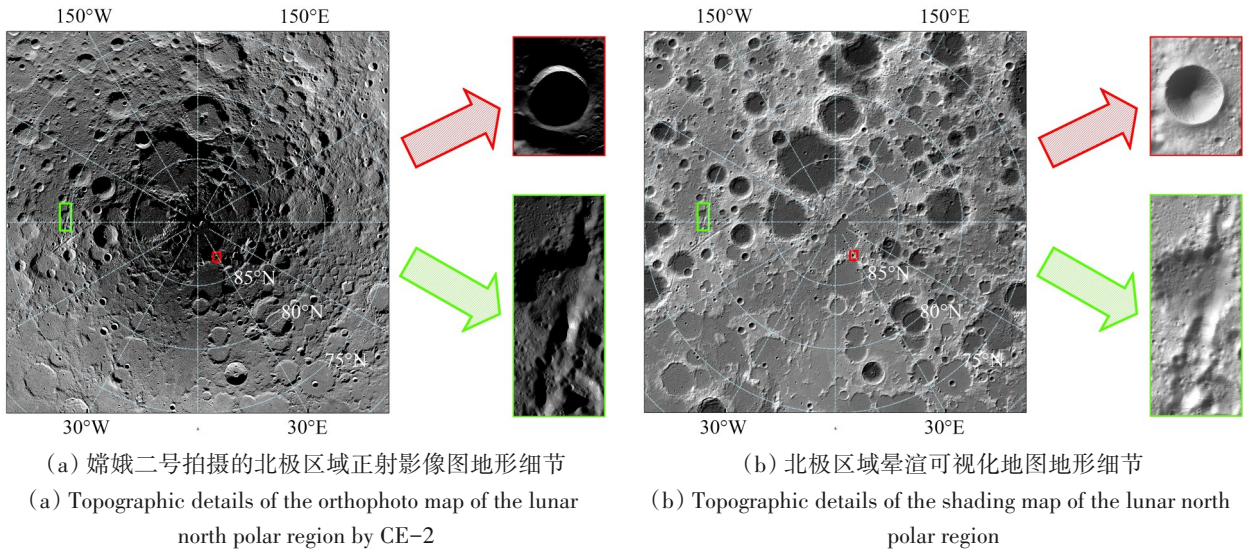


图 9 月球北极区域影像图与晕渲可视化地图地形细节对比
Fig. 9 Comparison of terrain details between image map and shading map of the lunar north pole regions

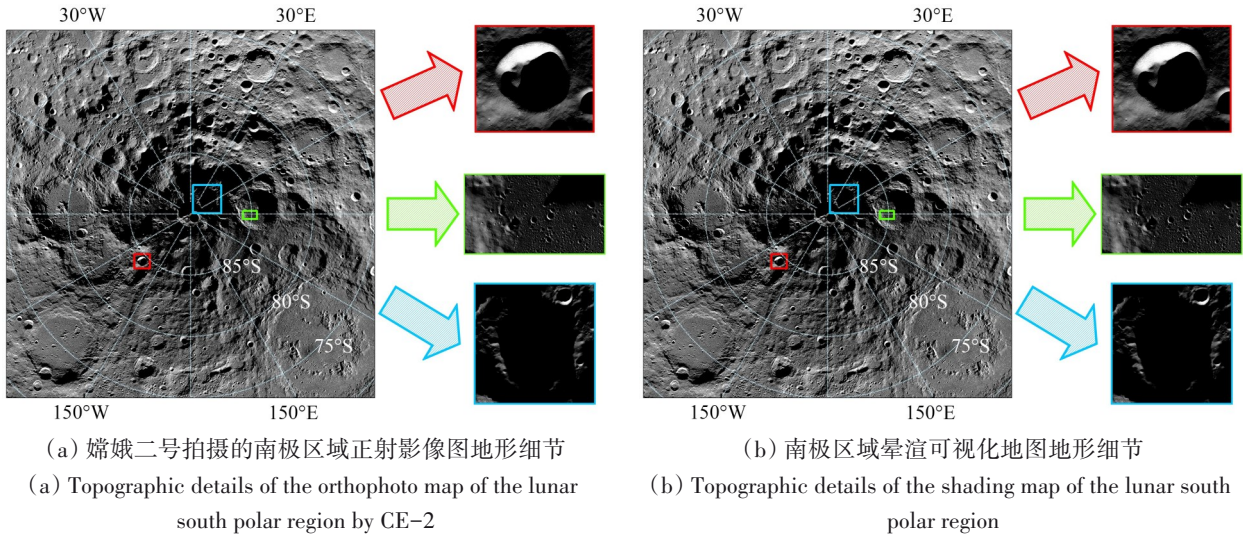


图 10 月球南极区域影像图与晕渲可视化地图对比
Fig. 10 Comparison of terrain details between image map and shading map of the lunar south pole regions

4.3 倾斜视图表现月球表面形貌特征

图 11 展示了月球极区的正射倾斜视图。可见：当从斜上方的视角进行 3D 渲染，使用正射投影得到的倾斜视图也具有较强的立体感，能较好地表达月球极区形貌的空间关系；使用航空、航天摄

影方法拍到的鸟瞰图是透视图，图幅边缘的存在一定的透视变形。在对高程进行灰度设色的基础上，使用 3D 渲染的方法得到正射影像，既还原了真实的地形地貌，也表现出了其高程与相对关系。

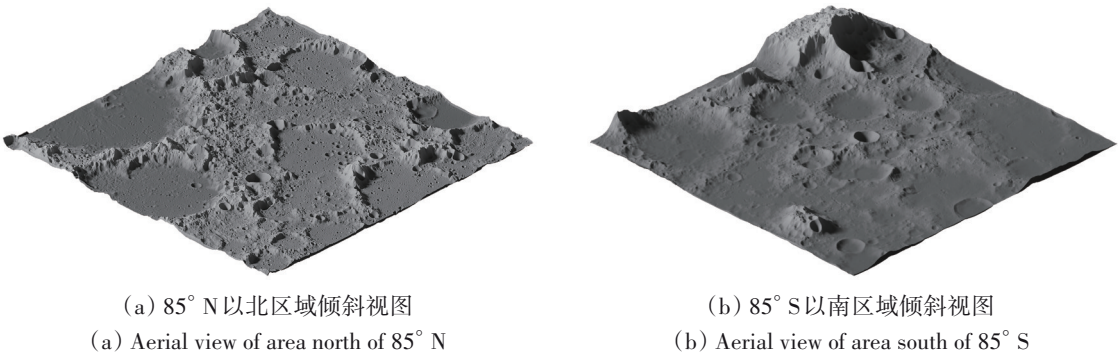


图 11 月球极区三维表面倾斜视图
Fig. 11 3D Surface tilt views of the lunar polar regions

4.4 永久阴影区专题地图制图

由图 12 (a) 可见正射影像图上叠加显示永久阴影区，可以向地图使用者大致呈现永久阴影区的位置。但是由于其附近区域光照也较弱且存在季节性阴影遮挡，因此在影像图中永久阴影区周围也出现了大面积阴影覆盖，不利于向地图使用者准确表现永久阴影区位置，尤其是难以准确表现各个方向的地形遮挡效果。且永久阴影区内部

地形地貌无法得到表现。

由图 12 (b) 可见在晕渲可视化地图上叠加显示永久阴影区，以半透明色块表现永久阴影区面要素。这样可以准确表现永久阴影区的绝对位置与相对位置，永久阴影区内地形地貌也可以得到一定程度的表现。还能通过高程设色与阴影效果表现区域内的绝对高程与相对高程，表现附近地形在永久阴影区形成过程中的遮挡作用。

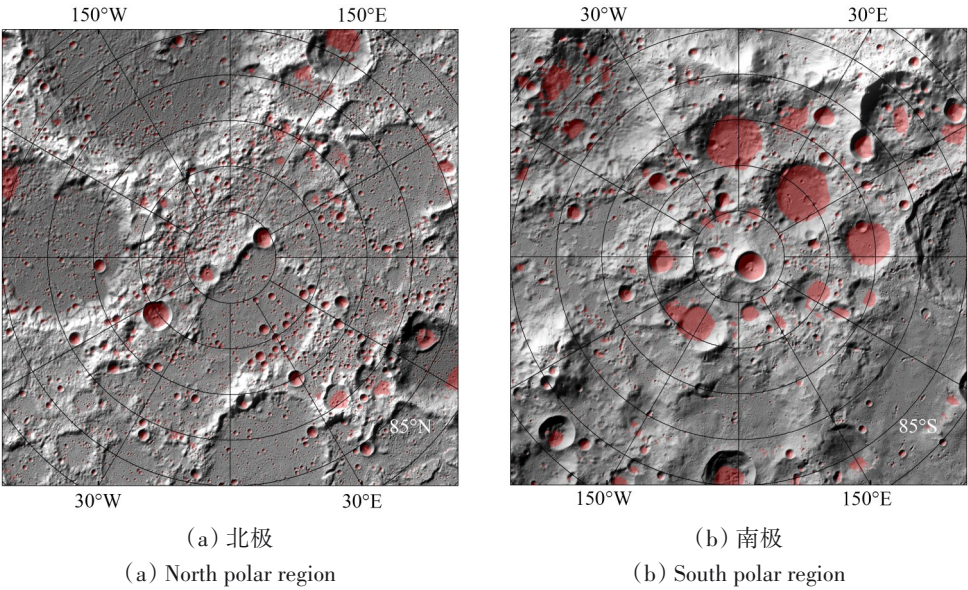


图 12 月球极区晕渲可视化叠加永久阴影区专题地图
Fig. 12 Thematic map of PSR overlaid with shading map of the lunar polar regions

5 结 论

为客观、高效、无歧义地向地图使用者表现月球极区表面形貌并增强极端光照条件下的地理要素可视化效果，本研究综合了地理空间认知理论和晕渲可视化方法，实现了面向月球极区特殊

光照条件的地形可视化。在客观真实地表达月球表面形貌的基础上，依照符合人类思维的空间认知意向，引导地图使用者建立正确的地理空间认知，对于大范围的地形地貌可视化和小范围的地形细节可视化都能实现较好的显示效果。

主要结论如下：

(1) 使用灰色色系、合理夸张形貌高程，建立晕渲可视化地图，有利于完整、高效地表达月球极区地形地貌；

(2) 在晕渲可视化地图上叠加月球极区永久阴影区，可以在明确永久阴影区空间位置的同时适当表现其内部结构；

(3) 将晕渲可视化地图与高程图叠加显示，可以在充分表达绝对高程信息的同时，适当表现地形细节；

(4) 在渲染的3D表面上拍摄倾斜视角的正射影像图，也能较好的表现月球极区地形地貌。

参考文献(References)

- Araki H, Tazawa S, Noda H, Ishihara Y, Goossens S. 2009. Lunar Global Shape and Polar Topography Derived from Kaguya-LALT Laser Altimetry. *Science*, 323(5916): 897-900 [DOI: 10.1126/science.1164146]
- Bussey D B J, Fristad K E, Shenk P M, Robinson M S and Spudis P D. 2005. Constant illumination at the lunar north pole. *Nature*, 434(7035): 842 [DOI: 10.1038/434842a]
- Bussey D B J, McGovern J A, Spudis P D, Neish C D, Noda H, Ishihara Y and Sørensen S A. 2010. Illumination conditions of the south pole of the Moon derived using Kaguya topography. *Icarus*, 208(2): 558-564 [DOI: 10.1016/j.icarus.2010.03.028]
- Cao C P. 2023. The parameters setting up in the digital wast-drawing. *Bulletin of Surveying and Mapping*, (5): 17-19, 37 (曹纯贫). 2003. 数字地貌晕渲中若干参数的设置. *测绘通报*, (5): 17-19, 37 [DOI: 10.3969/j.issn.0494-0911.2003.05.005]
- Cook A C, Watters T R, Robinson M S, Spudis P D and Bussey D B J. 2000. Lunar polar topography derived from Clementine stereoimages. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 105(E5): 12023-12033 [DOI: 10.1029/1999JE001083]
- Creech S, Guidi J and Elburn D. 2022. Artemis: an overview of NASA's activities to return humans to the moon//Proceedings of 2022 IEEE Aerospace Conference (AERO). Big Sky: IEEE: 1-7 [DOI: 10.1109/AERO53065.2022.9843277]
- Crider D H and Vondrak R R. 2003. Space weathering effects on lunar cold trap deposits. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 108(E7): 5079. [DOI: 10.1029/2002JE002030]
- Dhillon A. 2023. India lands spacecraft near south pole of moon in historic first[EB/OL]. *The Guardian*. [2023-09-08]. <https://amp.theguardian.com/science/2023/aug/23/india-chandrayaan-3-moon-landing-mission>
- Di K C, Liu B, Liu Z Q and Zou Y L. 2016. Review and prospect of lunar mapping using remote sensing data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 20(5): 1230-1242 (邸凯昌, 刘斌, 刘召芹, 邹永廖). 2016. 月球遥感制图回顾与展望. *遥感学报*, 20(5): 1230-1242 [DOI: 10.11834/jrs20166158]
- Feldman W C, Maurice S, Lawrence D J, Little R C, Lawson S L, Gannault O, Wiens R C, Barraclough B L, Elphic R C, Prettyman T H, Steinberg J T and Binder A B. 2001. Evidence for water ice near the lunar poles. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E10): 23231-23252 [DOI: 10.1029/2000JE001444]
- Fisher E A, Lucey P G, Lemelin M, Greenhagen B T, Siegler M A, Mazarico E, Aharonson O, Williams J P, Hayne P O, Neumann G A, Paige D A, Smith D E and Zuber M T. 2017. Evidence for surface water ice in the lunar polar regions using reflectance measurements from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and temperature measurements from the Diviner Lunar Radiometer Experiment. *Icarus*, 292: 74-85 [DOI: 10.1016/j.icarus.2017.03.023]
- Guo Q S and Wang X Y. 2004. Study on light direction and color in hill-shading. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 29(1): 20-23, 33. (郭庆胜, 王晓延). 2004. 地貌晕渲中光源使用方法与用色规则的研究. *武汉大学学报(信息科学版)*, 29(1): 20-23, 33 [DOI: 10.3969/j.issn.1671-8860.2004.01.004]
- Heldmann J L, Margarita M M, Lim D S S, Wilson D, Carrato P, Kennedy K, Esbeck A, Colaprete T A, Elphic R C, Captain J, Zacny K, Stolov L, Mellerowicz B, Palmowski J, Bramson A M, Putzig N, Morgan G, Sizemore H and Cohan J. 2022. Mission architecture using the spacex starship vehicle to enable a sustained human presence on mars. *New Space*, 10(3): 259-273 [DOI: 10.1089/space.2020.0058]
- Hemingway D J, Garrick-Bethell I and Kreslavsky MA. 2015. Latitudinal variation in spectral properties of the lunar maria and implications for space weathering. *Icarus*, 261: 66-79 [DOI: 10.1016/j.icarus.2015.08.004]
- Kovesi P. 2019. Colour amplifies relief shading. *ASEG Extended Abstracts*, 2019(1): 1-3 [DOI: 10.1080/22020586.2019.12073048]
- Li C L, Liu J J, Ren X, Yan W, Zuo W, Mu L L, Zhang H B, Su Y, Wen W B, Tan X, Zhang X X, Wang W R, Fu Q, Geng L, Zhang G L, Zhao B C, Yang J F and Ouyang Z Y. 2018. Lunar global high-precision terrain reconstruction based on Chang'e-2 stereo images. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(4): 485-495 (李春来, 刘建军, 任鑫, 严伟, 左维, 牟伶俐, 张洪波, 苏彦, 温卫斌, 谭旭, 张晓霞, 王文睿, 付强, 耿良, 张广良, 赵葆常, 杨建峰, 欧阳自远). 2018. 基于嫦娥二号立体影像的全月高精度地形重建. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(4): 485-495 [DOI: 10.13203/j.whugis20170400]
- Li X Y, Wang S J, Zheng Y C and Cheng A Y. 2008. Estimation of solar illumination on the Moon: a theoretical model. *Planetary and Space Science*, 56(7): 947-950 [DOI: 10.1016/j.pss.2008.02.008]
- Mazarico E, Neumann G A, Smith D E, Zuber M T and Torrence M H. 2011. Illumination conditions of the lunar polar regions using LOLA topography. *Icarus*, 211: 1066-1081 [DOI: 10.1016/j.icarus.2010.10.030]
- Oren M and Nayar S K. 1995. Generalization of the Lambertian model and implications for machine vision. *International Journal of Computer Vision*, 14(3): 227-251 [DOI: 10.1007/BF01679684]
- Ouyang Z Y. 2005. Introduction to Lunar Science. Beijing: China Astronautical Publishing House (欧阳自远). 2005. 月球科学概论. 北

- 京: 中国宇航出版社)
- Phong B T. 1975. Illumination for computer generated pictures. *Communications of the ACM*, 18(6): 311-317 [DOI: 10.1145/360825.360839]
- Sjogren W L and Wollenhaupt W R. 1973. Lunar shape via the Apollo laser altimeter. *Science*, 179(4070): 275-278 [DOI: 10.1126/science.179.4070.275]
- Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, Lemoine F G, Mazarico E, Torrence M H, McGarry J F, Rowlands D D, Head J W, Duxbury T H, Aharonson O, Lucey P G, Robinson M S, Barnouin O S, Cavanaugh J F, Sun X L, Liiva P, Mao D D, Smith J C and Bartels A E. 2010. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophysical Research Letters*, 37(18): L18204 [DOI: 10.1029/2010GL043751]
- Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, Mazarico E, Lemoine F G, Head III J W, Lucey P G, Aharonson O, Robinson M S, Sun X L, Torrence M H, Barker M K, Oberst J, Duxbury T C, Mao D D, Barnouin O S, Jha K, Rowlands D D, Goossens S, Baker D, Bauer S, Gläser P, Lemelin M, Rosenburg M, Sori M M, Whitten J and Mcclanahan T. 2017. Summary of the results from the lunar orbiter laser altimeter after seven years in lunar orbit. *Icarus*, 283: 70-91 [DOI: 10.1016/j.icarus.2016.06.006]
- Wang J Y, Shu R, Chen W B, Jia J J, Wang B Y, Huang G H, Wang B Y and Hou X. 2010. Laser altimeter of CE-1 payloads system. *Science China Physics, Mechanics and Astronomy*, 53(10): 1914-1920 [DOI: 10.1007/s11433-010-4085-z] (王建宇, 舒嵘, 陈卫标, 贾建军, 黄庚华, 王斌永, 侯霞. 2010. 嫦娥一号卫星激光高度计. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 40(8): 1063-1070) [DOI: 10.1360/2010-40-8-1063]
- Wang P Y and Guan X. 2021. Hybrid enhanced visual cognition framework and its key technologies. *Journal of Image and Graphics*, 26(11): 2619-2629 (王培元, 关欣. 2021. 混合增强视觉认知架构及其关键技术进展. *中国图象图形学报*, 26(11): 2619-2629) [DOI: 10.11834/jig.200446]
- Wu B, Hu H and Guo J. 2014. Integration of Chang'E-2 imagery and LRO laser altimeter data with a combined block adjustment for precision lunar topographic modeling. *Earth and Planetary Science Letters*, 391: 1-15 [DOI: 10.1016/j.epsl.2014.01.023]
- Wu W R, Yu D Y, Wang C, Liu J Z, Tang Y H, Zhang H, Zou Y L, Ma J N, Zhou G D, Zhang Z and Lu L L. 2020. Research on the main scientific and technological issues on lunar polar exploration. *Journal of Deep Space Exploration*, 7(3): 223-231, 240 (吴伟仁, 于登云, 王赤, 刘继忠, 唐玉华, 张焯, 邹永廖, 马继楠, 周国栋, 张哲, 卢亮亮. 2020. 月球极区探测的主要科学与技术问题研究. *深空探测学报(中英文)*, 7(3): 223-231, 240) [DOI: 10.15982/j.issn.2095-7777.2020.20200113001]
- Ying S, Dou X Y, Bi J H and Chen C. 2023. Cognition and enhanced visualization of lunar topographic features. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 48(3): 453-462 (应申, 窦小影, 毕杰皓, 陈驰. 2023. 月球地形特征认识及增强可视化. *武汉大学学报(信息科学版)*, 48(3): 453-462) [DOI: 10.13203/j.whugis.20220069]
- Zhang Z, Xu H P, Deng X Y and He Z W. 2022. Overall scheme and key technologies of new generation lunar manned launch vehicle. *Manned Spaceflight*, 28(4): 427-432 (张智, 徐洪平, 邓新宇, 何兆伟. 2022. 新一代载人登月运载火箭总体方案和关键技术. *载人航天*, 28(4): 427-432) [DOI: 10.16329/j.cnki.zrht.2022.04.001]
- Zhou H, Chen Y W, Hyypä J and Li S. 2017. An overview of the laser ranging method of space laser altimeter. *Infrared Physics and Technology*, 86: 147-158 [DOI: 10.1016/j.infrared.2017.09.011]

Enhanced visualization for the special illumination in the lunar polar region

YING Shen^{1,2,3}, BI Jiehao¹, CHEN Chi⁴

1. School of Resource and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

2. Key Lab of Geographic Information System, Educational Ministry, Wuhan University, Wuhan 430079, China;

3. Key Laboratory of Digital Mapping and Land Information Application, Ministry of Natural Resources, Wuhan 430079, China;

4. The State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Abstract: Due to its special geographic location and topographic features, the lunar polar regions have low solar altitude angles and insufficient illuminations, and numerous Permanently Shadowed Regions (PSR) lack direct solar illumination all the time. Therefore, these sites may contain enormous amounts of water ice and are of scientific importance and utilization. Visible-band imagery is often used to visualize the topography of the lunar mid- and low-latitude regions, but this method is poorly effective in the lunar polar regions. The shadow range of the existing image data is huge, which leads to incomplete topographic representation and poor human understanding. If the planetary topography of the lunar polar region is directly represented from the elevation data, problems such as unnatural color and light effects and lack of topographic details will occur. Human's intuitive perceptions of the lunar surface mainly come from naked-eye optical observation, telescope optical photography, and remote sensing images from orbiting satellites, which largely shape the geospatial knowledge of the lunar landscape. Migrating these mature geospatial cognitions of the moon to the lunar polar regions can effectively reduce

the cost of understanding the lunar morphology. Therefore, to improve the scientific exploration of the lunar polar regions, a set of comprehensive, efficient, and human-cognitive-habit-suitable visualization mapping methods of the lunar polar regions is needed. In this paper, high-precision laser altimetry data are combined with the shading visualization method to create illumination maps, which effectively represent the impact craters, crater chains, rilles, and other landforms in the lunar polar regions, and have the characteristics of intuition, detail, and comprehensiveness. When visualization operation is performed, the undulation of complex planetary landforms such as impact craters is comprehensively considered, and the topography is appropriately exaggerated so that the absolute and relative elevations of the terrain can be reasonably expressed in the shading map. Such a planetary topographic map has a powerful sense of three-dimensionality in the visual sense with a clear light-shadow relationship and the elevation expression has a better display effect even in the polar regions, without losing the details of the terrain, which can realize a more satisfactory effect of displaying the terrain features. The large-scale topographic maps and local topographic details of the lunar polar regions are created by this method and compared with the corresponding remote sensing images. Moreover, further processes overlaying the PSRs on the corresponding shading map can obtain a clearer thematic map. Orthorectified aerial view maps based on the grayscale coloring of the elevation not only restore the real planetary topography but also express the relationship between its absolute elevations and its relative height. Enhanced visualization of the lunar polar region aligns with human geospatial cognitions and can depict the topography of the lunar surface objectively and realistically. This enhances visualization and strengthens the suitable geospatial planetary cognition of map users following human intentions and minds, improving the display effects of large-scale topography and small-scale terrain details. The topographic shading maps provide support for landing site selection, rover path planning, and results display in the lunar polar regions.

Key words: planetary cartography, lunar exploration, lunar polar region, shading map, visualization

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2019YFE0123300)