

月表地貌起伏形态分异特征及分级标准研究

邓佳音^{1,2}, 程维明^{1,2,3}, 刘樯漪^{1,2}, 焦毅蒙^{1,2}, 刘建忠^{2,3,4}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230052;
4. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵阳 550002)

摘要: 月球地貌是月球表面发生的地质和地貌过程的结果, 月球地貌单元的划分和等级分类体系的构建是月球地貌学研究的基础, 也是月球地貌图制图的基础和关键科学问题。地貌学是研究形态和成因的科学, 高程和起伏度是最基本的地貌指标。本文基于 LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) DEM 数据以及 LOLA 和 SELENE TC (Terrain Camera) 融合的 DEM 数据 (SLDEM2015, 文中简称 SLDEM), 利用均值变点法确定月表起伏度计算的最佳窗口, 并以起伏度 100 m、200 m、300 m、700 m、1500 m 及 2500 m 为阈值将月球表面分为微起伏平原 (< 100 m)、微起伏台地 [100 m, 200 m)、微小起伏丘陵 [200 m, 300 m)、小起伏山地 [300 m, 700 m)、中起伏山地 [700 m, 1500 m)、大起伏山地 [1500 m, 2500 m) 及极大起伏山地 (≥ 2500 m) 地貌 7 个类型。划分结果显示: 微起伏平原主要分布在月海平原区域、部分有玄武岩充填的撞击盆地的盆地区域以及撞击坑坑底区域; 微起伏台地主要分布在月海和月陆区域的交界区域; 微小起伏丘陵主要分布在月溪和皱脊等构造单元区域; 小起伏山地主要分布在撞击坑中央峰及坑底断裂区域; 中起伏山地主要分布在撞击坑坑底和坑壁过渡区域、撞击坑坑壁和坑缘过渡区域、撞击盆地盆底与盆壁过渡区域以及盆壁与盆缘过渡区域; 大起伏和极大起伏山地主要分布在撞击坑坑壁区域及撞击盆地盆壁区域。本文确定的月表起伏度分级标准可以对月表数字地貌分类体系的构建和月球地貌图集的编研提供定量标准和重要参考。

关键词: 月球地貌分类; 形态特征; 起伏度; 分布特征; 分级标准

DOI: 10.11821/dlxb202207015

1 引言

月球作为地球的天然卫星, 是现阶段深空探测的第一站和首要目标。对月球的探测从 16 世纪初开始, 伽利略利用望远镜对月球进行系统观测, 为月球探测提供了最原始的资料。从 19 世纪开始, 人类开始对月球进行轨道探测活动, 并获取了大量的月球科学数据, 为月球的起源与演化、月球地貌的演化过程等研究提供了可能^[1-2]。月球地貌是月球表面发生的地质和地貌过程的结果, 有内、外营力共同作用形成。对月球地貌的研究, 可以了解月球演化至今内外作用营力的空间分布, 了解月球地质构造地貌、岩浆活动以

收稿日期: 2021-12-09; 修订日期: 2022-04-07

基金项目: 中国科学院先导科技专项(XDB41000000); 国家自然科学基金项目(42130110, 41571388); 国家科技基础性工作专项(2015FY210500) [Foundation: Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDB41000000; National Natural Science Foundation of China, No.42130110, No.41571388; Key Projects of National Basic Work of Science and Technology, No.2015FY210500]

作者简介: 邓佳音(1994-), 女, 河南周口人, 博士生, 主要从事数字地貌分析。E-mail: dengjiy.20b@igsnr.ac.cn

通讯作者: 程维明(1973-), 男, 甘肃天水人, 研究员, 博士生导师, 主要从事数字地貌与行星地貌研究。

E-mail: chengwmm@reis.ac.cn

1794-1807 页

及月球表面的矿产分布特征,为月球科学研究与未来月球探测、月球基地选址和建设提供必不可少的基础性资料^[1,3]。此外,对月球数字地貌类型的研究是月球地貌学研究的基础科学问题之一。而月球地貌单元的划分和等级分类体系的构建是月球地貌学研究的基础,也是月球地貌图制图的基础和关键科学问题^[4-5]。

月球地貌研究的起步较地球地貌晚。周增坡等利用嫦娥数字高程数据对月球形貌的总体特征进行研究,包括月表极值点高程及分布、平均高程、平均坡度及变化以及地势起伏度分布等^[6]。王娇等基于ISO聚类和非监督分类的方法,利用高程、坡度和起伏度3个地形指标,提出了月表形貌的自动分类方法^[7]。该方法主要基于聚类的相似性原理,可实现月球形貌单元的自动提取,但不同区域的分类结果具有明显差异性,缺乏统一的全月范围内的分类标准与分类体系。程维明等提出了未来月球形貌的研究方向以及基于形态和年代特征的月球形貌类型多级分类方法,对月球地貌分类具有重要的参考价值^[4,8]。该分类体系类比地球地貌“三等九级”分类方案,以形貌特征、地质年代、物质成分等为分类指标,但在形貌特征指标中缺乏高程、起伏度等地形指标的定量标准。

地貌学是研究地貌形态和成因的科学,高程和起伏度是描述地貌形态的最基本的地貌形态指标。地貌学家在开展中国1:100万地貌图研究时,主要采用基于形态、成因、物质和年龄等地貌要素的分类体系,形成了制图规范。中国地势呈阶梯状,考虑到中国地形的三级阶梯特征以及高程表达的地貌营力作用的差异性,将地貌所处的海拔高度按照低海拔、中海拔、高海拔以及极高海拔进行分级,形成高程的四级分类体系,确定了地貌的宏观地貌格局。此外,利用地表的起伏度指标,根据地貌起伏变化将陆地划分为7种基本类型,即平原、台地、丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地以及极大起伏山地。这一基于起伏高度的形态类型划分方案在国内已趋于一致^[9-11]。将海拔分级和起伏度分级进行组合形成陆地地貌的基本形态类型,中国陆地基本地貌形态类型可划分为从低海拔平原、中海拔台地、高海拔丘陵到小起伏低山、中起伏中山、高起伏高山、极大起伏高山等25种^[11]。

地貌形态测量法是用数值来表示地貌特征的定量研究方法,主要的形态测量指标包括高度、坡度以及地面的破坏程度。对于月球而言,其上空不存在复杂大气系统,也不存在液态水及人类活动,因此不存在沉积、搬运、侵蚀等一系列外动力作用形成的地貌类型。外动力撞击作用和内动力热演化作用对月球地貌的塑造作用较大,太阳风和其他高能辐射粒子引起的升华作用、月表温度变化引发物质崩解等对月球表面的地貌退化有一定的作用。因此,在月球地貌形态测量法中不存在针对地球地貌的地面破坏程度的指标。高度指标分为海拔高度和相对高度,即是高程和起伏度。刘檣漪等对月表海拔高度进行定量研究,通过分析月球表面高程的整体特征以及月海、撞击坑、南极艾肯盆地等典型形貌要素局部分布特征,提出以-2500 m、-1500 m、1000 m、3000 m为阈值作为月球形貌分类体系中高程的分类标准,将月球表面划分极低海拔,低海拔,中海拔,高海拔和极高海拔5个地貌类型^[12]。高程的分级结果在一定程度上与月球三大地体(风暴洋克里普地体、长石高地地体与南极艾肯地体)的边界吻合,其中长石高地地体与风暴洋克里普地体的划分主要以1000 m为界限,风暴洋克里普地体与南极艾肯地体的界限划分则主要以1000 m以及-1500 m为主。

起伏度是描述地貌形态的另一个重要指标。在地球上,中国的三级台阶特征一定程度上是由高程的分级确定的,但在不同的高程分区内,即各级地貌台阶上,均存在平原、台地、丘陵等地貌类型,反映了不同地貌台阶上的地势差异。因此,中国基本地貌类型是由海拔高度和起伏高度两个指标决定的。高程分级和起伏分级组合形成的基本地

貌类型分类系统较好地显示了中国的地貌结构^[10]。鉴于此,本文对月表起伏度的分级标准进行定量研究,通过均值变点法对全月范围内的数字高程数据进行分析,确定全月范围内最佳起伏度窗口,并计算全月的地形起伏度。研究认为以起伏度 100 m、200 m、300 m、700 m、1500 m 及 2500 m 6 个阈值为划分标准较为合理,6 个阈值将全月起伏度分为微起伏平原、微起伏台地、微小起伏丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地及极大起伏山地 7 个类型。月表地形起伏度特征的分析 and 分级标准的确定为月球数字地貌等级分类体系中基本地貌形态分类方案提供定量参考和分类依据,参考地球地貌的分类方案^[11],起伏高度形态与海拔等级的组合确定了月球表面的基本地貌形态类型。

2 数据基础

迄今为止,用于获取行星地形的直接方法是激光高度计从轨道发送激光脉冲,并定时返回脉冲^[13-15]。月球激光测高探测器(Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA)是搭载在月球轨道探测器(Lunar Reconnaissance Orbiter, LRO)上的一个多波束激光高度计,其发射波长为 1064.4 nm,发射频率为 28 Hz。LOLA 提供了全月 6.5 亿多个月表激光测高点数据,高程精度约 10 cm,准确度约 1 m,具有高精度的全球覆盖,其生成的数字高程模型数据分辨率约为 118 m/像素,垂直方向精度优于 1 m^[14, 16]。研究人员还综合 LOLA 数据和 SELENE TC (Terrain Camera) 数据生成了更高分辨率的 DEM 数据 (SLDEM2015)^[17],这一数据覆盖了月球南北纬 60° 之间的区域,数据分辨率约为 59 m/像素,垂直精度约为 3~4 m。考虑到数据分辨率和后续数据处理的数据量大小等因素,本文利用 LOLA 数据生成的数字高程模型(图 1a)对全月起伏度的分级标准进行研究,数据下载地址为 (https://planetarymaps.usgs.gov/mosaic/Lunar_LRO_LOLA_Global_LDEM_118m_Mar2014.tif),并利用更高分辨率的 SLDEM 数据对确定的最佳起伏度窗口进行验证。由于数据量的限制,本文使用 LQ18 图幅的 SLDEM 数据进行结果的验证, LQ18 位于月海和月陆区域的过渡区域,其位置如图 1 所示。

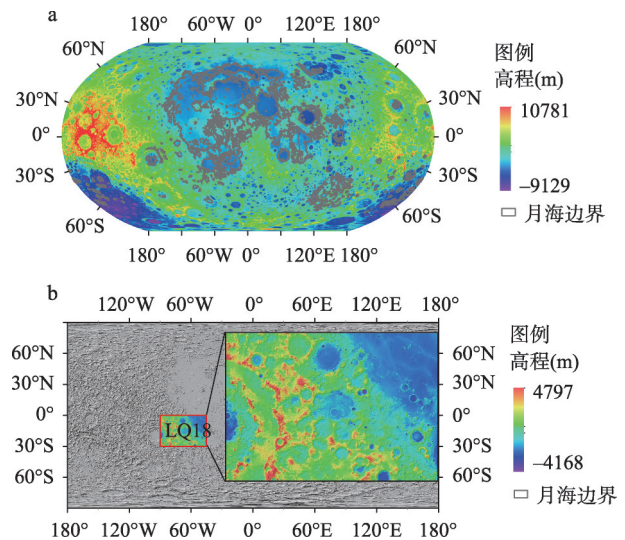


图 1 全月地形图 LOLA DEM 数据和 SLDEM 数据

Fig. 1 Topography map of the lunar surface LOLA DEM data and SLDEM data

3 研究方法

地形起伏度也称为地势起伏度、相对高度。地形起伏度是给定区域单元内高程差值,随着计算窗口的变化,其值在一定范围内改变,具有一定的尺度依赖性。因此,月球地貌起伏度分级的首要工作和关键是计算起伏度的最佳窗口。确定一个合适的分析窗

口半径或分析区域,使得在宏观范围内的起伏度能够准确反映月表的起伏形态。窗口分析的原理是通过计算输入像元周围指定邻域内的值的统计数据,其分析窗口主要有矩形窗口、圆形窗口、环形窗口、扇形窗口等。考虑到月球上最多的地貌类型是撞击坑,因此考虑使用圆形窗口而非矩形窗口对月表起伏度最佳窗口进行确定。

均值变点分析法是统计学中常用的变点分析方法,也是地貌分类研究中确定起伏度计算最佳窗口的常用方法^[18-19]。均值变点分析法的基本原理是认为变点的存在会增大原始样本的统计量 X 及样本分段后统计量 S_i 之间的差距。本文以均值变点分析法来确定月表起伏度的最佳计算窗口。首先计算分析窗口下单位面积上的平均地形起伏度 RA , 对其取对数构建样本序列 RAS ; 然后将样本分为两段 $RAS_1, RAS_2, \dots, RAS_i$ 和 $RAS_{i+1}, RAS_{i+2}, \dots, RAS_N$, 计算每段样本的算数平均值 \bar{X}_{i1} 和 \bar{X}_{i2} 及原始样本的方差 S 和分段后的方差统计量 S_i , 求得使该两者统计量之间差值最大的变点 i , 即为起伏度的最佳窗口, 具体的计算过程如下:

① 首先计算不同分析窗口 i 下的地形起伏度 RA_i 和单位面积上的平均地形起伏度, 并取对数记为 RAS_i , RAS_{ij} 即为构建的样本序列值 ($j=1, 2, \dots, N$)。

$$RAS_i = \ln(RA_i / \pi i^2) \quad (1)$$

$$RAS = \{RAS_{ij}, j=1, 2, 3, \dots, N\} \quad (2)$$

② 计算样本序列的平均值 \overline{RAS}_i 和方差 S , 计算公式如下:

$$\overline{RAS}_i = \frac{\sum_{j=1}^N RAS_{ij}}{N} \quad (3)$$

$$S = \sum_{j=1}^N (RAS_{ij} - \overline{RAS}_i)^2 \quad (4)$$

③ 在窗口 i 下, 将样本 X 分为两段, $RAS_{i1}, RAS_{i2}, \dots, RAS_{it}$ 和 $RAS_{it+1}, RAS_{it+2}, \dots, RAS_{iN}$, 分别计算两段样本的平均值 \overline{RAS}_{i1} 和 \overline{RAS}_{i2} , 以及两段样本的离差平方和的差 S_i 。

$$\overline{RAS}_{i1} = \frac{\sum_{j=1}^t RAS_{ij}}{t} \quad (5)$$

$$\overline{RAS}_{i2} = \frac{\sum_{j=t+1}^N RAS_{ij}}{N-t} \quad (6)$$

$$S_i = \sum_{j=1}^t (RAS_{ij} - \overline{RAS}_{i1})^2 - \sum_{j=t+1}^N (RAS_{ij} - \overline{RAS}_{i2})^2 \quad (7)$$

④ 计算原始样本的方差 S 和分段后的方差统计量 S_i 之间的差值 S_o , 求使得 S_o 值最大的窗口 i , 即为全月起伏度计算的最佳窗口。

$$S_o = S - S_i \quad (8)$$

圆形窗口的计算以栅格像元为基本单位, 由于月球表面起伏较大, 且全月计算的数据量较大, 为了准确确定起伏度的最佳计算窗口, 本文采用两次均值变点分析方法来计算。第一次应用均值变点分析法预估最佳起伏度的可能窗口, 起始窗口为半径为 5 个像元的圆形窗口, 步长为 5, 计算至 500 个像元内的平均起伏度以及对应的统计量, 得到最佳起伏度窗口对应的像元数。第二次利用均值变点分析法进行最佳起伏度窗口的精确分

析,起始窗口为1个像元,步长为1,计算至预分析中得到的最佳起伏度窗口像元数量的两倍,得到最佳起伏度窗口对应的像元数的精确值。

4 结果分析

4.1 月表起伏度的最佳计算窗口

本文采用两次均值变点分析法对月表起伏度计算的最佳窗口进行研究,图2为基于全月DEM数据利用均值变点法预分析结果及精确分析结果。起伏度最佳计算窗口的预分析结果表明,月表起伏度计算的最佳窗口为直径为125个像元的圆形区域。在精确分析中,以半径为1个像元的圆形窗口为起始窗口,步长 $p = 1$,依次计算248个像元大小,得到最佳起伏度窗口对应半径的精确值为62个像元大小,因此,本文以半径为62个像元的圆形窗口来计算整个月表的地形起伏度。

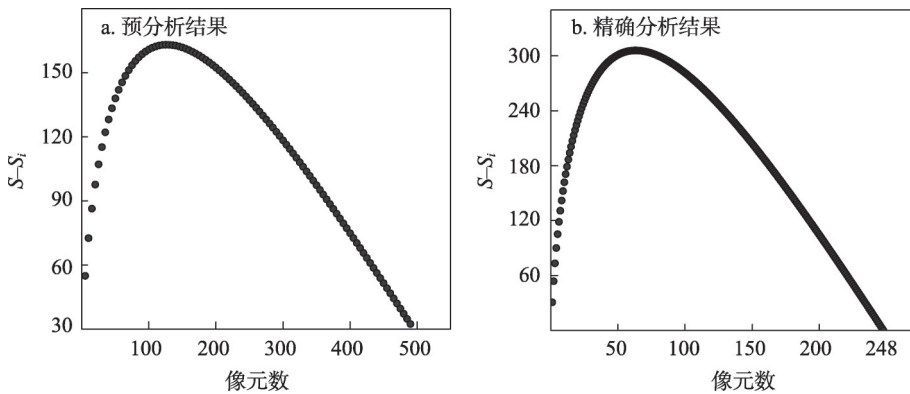


图2 基于LOLA高程数据利用均值变点法计月表起伏度最佳窗口的预分析和精确分析
Fig. 2 The pre-analysis results and accurate analysis results of he best window for calculating the relief amplitude of lunar surface by the change-point in the mean based on LOLA data

4.2 月表起伏度的分布特征

4.2.1 全月整体特征 本文基于LOLA数据生成的数字高程模型,利用均值变点分析方法,以62个像元为半径的圆形区域为统计单元,对月表地形起伏度进行计算并进行统计分析。图3是对全月地形起伏度数据进行频数分布统计得到的直方图,从直方图中可以看出,月表地形起伏度的最小值为21 m,最大值为10999 m,而当起伏度大于6000 m时,栅格像元频数较小,逐渐趋近于零值线,因此对起伏度数据的异常高值进行分析。

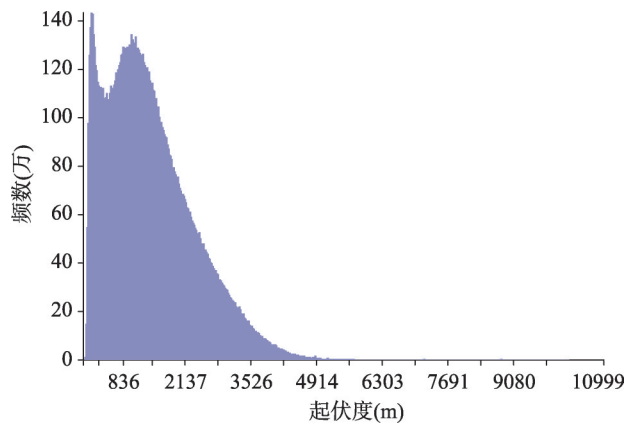


图3 月球表面地形起伏度频数分布直方图
Fig. 3 Frequency distribution histogram of the lunar surface relief amplitude

Tukey等提出箱式图对数据进行可视化表达,包括上四分位数、中位数、下四分位数、最大值和最小值,可以更好的关注数据的分布状态和关键特征,更好的判断数据的

偏态和离散程度，更好的识别数据的极端值和可能异常值^[20]。四分位距(IQR)为上四分位数(Q3)与下四分位数(Q1)的差值，数据极端值或者异常值的阈值为(OF)，计算公式为公式(10)。分位数方法的异常值处理并不严格要求数据服从正太分布^[20-21]，从图3中可以看出，月球表面地形起伏度频数分布呈现明显的偏态分布，因此本文利用分位数对栅格数据的异常值进行处理，表1是对月球表面地形起伏度进行统计的结果，月表地形起伏度的下四分位数为687 m，中位数为1240 m，上四分位数为1939 m，根据分位数方法计算得到地形起伏度的外阈值为5695 m。全月地形起伏度小于5695 m的累计频率为99.97%，为使得全月地形起伏度结果更精确，剔除月球两极区域的噪声点，本文考虑使用累计频率为99.99%对应的起伏度值7200 m作为异常值阈值对全月起伏度数据进行预处理。

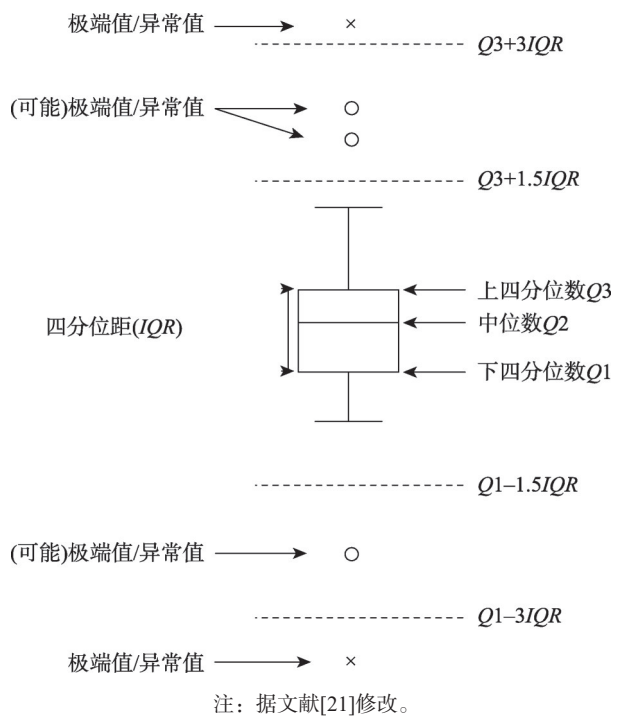


图4 四分位数箱线图

Fig. 4 A box and whisker plot

表1 月表地形起伏度统计表

Tab. 1 Quantile statistics of lunar surface relief amplitude

统计值	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	内限阈值	外限阈值	平均值
起伏度(m)	1	687	1240	1939	3817	5695	1393.6

注：表中数据由DEM栅格像素数统计得到,存在一定误差。

$$IQR = Q3 - Q1 \tag{9}$$

$$OF = Q3 + 3IQR \tag{10}$$

从月球表面地形起伏度频数分布直方图来看，月球表面随着起伏度的增大，像元频数呈现递减趋势。月表起伏度整体上主要集中分布在1~7200 m之间，起伏度较大的区域在月球上分布较少(图3)。本文对全月起伏度累计频率进行分析，全月近10%区域的地形起伏度值在299 m以下，近30%区域的地形起伏度值在803 m以下，近50%区域的地形起伏度值在1240 m以下，近90%区域的地形起伏度值在2600 m以下(表2)。月表地形起伏度总体分布图(图5)中表明，月表地形起伏度的最小值为1 m，最大值为7200 m，起伏度较高的区域主要分布在撞击坑的坑壁和撞击盆地的盆壁位置，起伏度较低的区域主要分布在月海区域、撞击坑坑底及撞击盆地盆底区域。

4.2.2 月海和月陆单元起伏度特征 月球探测方兴未艾，在重返月球的国际大背景下，探测器获取了海量高分辨率数据，其中最受关注的是月球的“二分性”特征，即月球正面与背面的地形地貌、物质组成、地质构造、月亮厚度等具有明显的差异。月球主要包括两种地理单元，影像特征较暗的月海区域和影像特征较亮的高地区域^[3]。月海是黑色玄武

表2 全月起伏度累计频率百分位数

Tab. 2 Percentile of accumulated frequency of lunar surface relief amplitude

累计频率(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
起伏度(m)	299	562	803	1022	1240	1481	1767	2140	2688

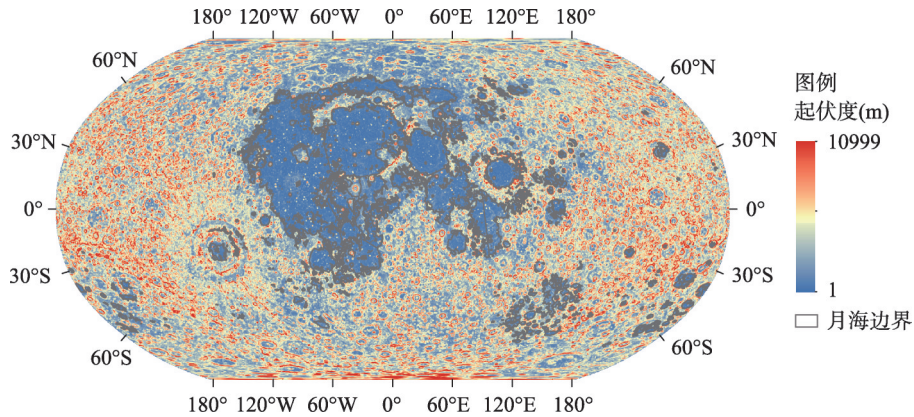


图5 月表地形起伏度总体分布图

Fig. 5 Distribution characteristics of lunar surface relief amplitude, with mare labelled by grey lines

岩填充的火山平原，主要成分是铁镁质，从雨海纪开始形成，年代较年轻，没有被大型撞击事件改造，而高地的岩石类型主要是斜长石，根据对月球形成演化过程的研究^[22-23]，高地的主要成分可能是原始月亮。在月海和高地地理单元内，最明显的地貌单元是月表由陨石撞击形成的撞击坑和撞击盆地。撞击坑是月表最多最显著的地貌单元，全月大于1 km以上的撞击坑多达130多万个^[24]，撞击盆地的数量较撞击坑而言非常少，但撞击盆地的直径较大且其形成具有重要的时间标志，因此将撞击坑和撞击盆地作为单独的地貌类型进行研究，另外，将高地上除了撞击坑和撞击盆地之外的地貌单元定义为月陆地貌单元，基于基本的形态和成因的月貌基本地貌单元主要分为撞击坑、撞击盆地、月海和月陆。本文参考中国最新编研的月球1:250万地质图系列图集^[25]对月球基本地貌单元进行提取融合(图6)，将全月分成撞击坑、撞击盆地、月海和月陆4种基础地貌单元，并对撞击坑、撞击盆地、月海和月陆地貌单元的起伏度特征进行统计分析(表3)。

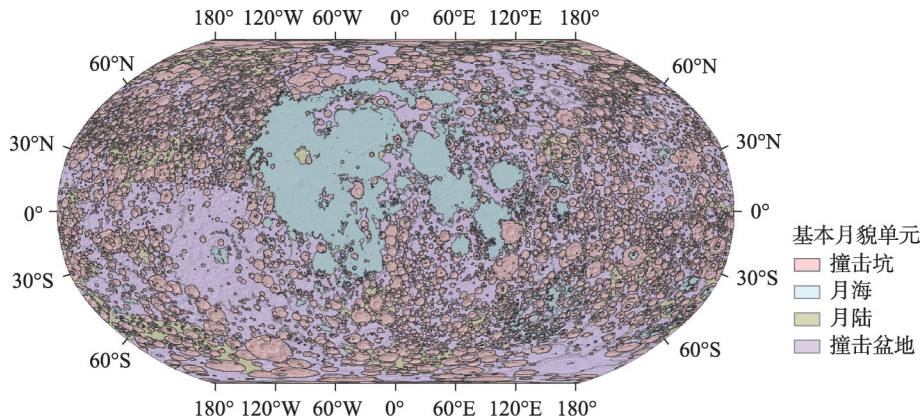


图6 月表地貌基本单元

Fig. 6 The basic geomorphic landforms of lunar surface

表3 月表基本地貌单元内地形起伏度统计

Tab. 3 Quantile statistics of lunar surface relief amplitude in lunar basic geomorphic landforms

基本地貌单元	起伏度统计值(m)					
	最小值	下四分位数	中位数	上四分位数	最大值	平均值
月海	23	159	253	445	4772	380.27
月陆	1	735	1082	1583	5396	1231.69
撞击坑	71	1132	1721	2455	7200	1842.39
撞击盆地	1	794	1197	1716	7200	1330.97

本文以月海、月陆、撞击坑及撞击盆地为统计单元,计算区域内的地形起伏度,结果表明,月海区域的最低起伏度为23 m,最高起伏度为4772 m,平均起伏度为380.27 m,月海起伏度主要集中在132 m附近(图7),约有70%区域的地形起伏度在23~445 m之间(表3)。月海区域的主要成分是玄武岩,主要分布在月球正面的撞击盆地底部,其成因是由于月表大型撞击事件导致玄武岩质岩浆上涌冷凝后形成^[26]。月球阿波罗样品揭示月球火山活动主要发生在30亿~38亿年前,嫦娥五号的玄武岩样品年龄经测定为19.6亿年,揭示了月球火山活动持续到20亿年前左右^[27]。撞击坑频率直径分布方法也揭示月球火山活动从约40亿年前开始,在约12亿年前停止^[28],大部分玄武岩形成于晚雨海纪时期,大约36亿~38亿年之间,在爱拉托逊纪时期玄武岩喷发量显著减少,哥白尼纪的玄武岩仅发生在风暴洋区域^[28]。月海玄武岩形成时期,外动力撞击一直存在,导致月海区域有年轻的小型撞击坑,使得月海区域中撞击坑处的地形起伏度变化较大。

皱脊和月溪是分布在月海中的主要构造地貌类型^[29-31],皱脊是一种延伸较长海拔较低的正地形线性构造,月溪是形态蜿蜒的负地形线性构造,二者起伏度大于月海平原区域,构建月表起伏度分级标准时需要考虑月海内的皱脊和月溪的地形起伏度特点,以达到在一定程度上区分月海平原区域和皱脊及月溪。本文利用月球1:250万月球地质图中的皱脊和月溪数据,构建构造区域的50000个随机点并提取构造上随机点的起伏度数据,对全月皱脊和月溪的起伏度分布情况进行分析。月海皱脊和月溪的起伏度集中分布在242 m和308 m附近(图8),又由于月海50%区域范围内的地形起伏度小于253 m(表4),因此以起伏度200 m和300 m为界分别区分月海与月陆过渡区域以及月海区域与月海中的皱脊和月溪。月海起伏度集中分布在132 m左右,因此以100 m为界区分微起伏台地和月海微起伏平原。

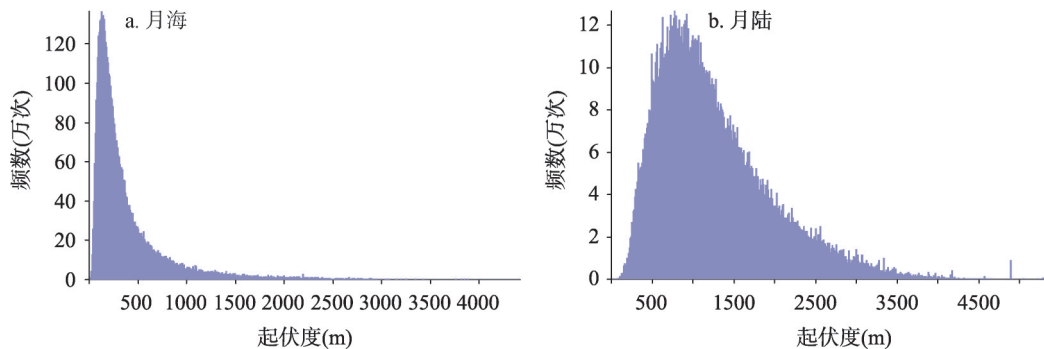


图7 月表月海和月陆区域地形起伏度频数分布直方图

Fig. 7 Frequency distribution histogram of lunar mare and highland

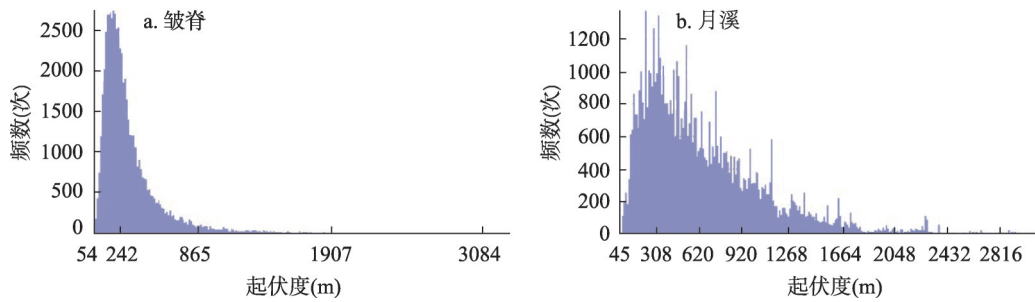


图8 月海皱脊和月溪地形起伏度频数分布直方图

Fig. 8 Frequency distribution histogram of lunar wrinkle ridges and lunar sinuous rilles

表4 月表基本地貌单元起伏度的累积频率以及累积频率对应的地貌单元起伏度值

Tab. 4 Cumulative frequency of lunar surface relief amplitude in basic geomorphic landforms and the relief amplitude corresponding to cumulative frequency

基本地貌单元	累积频率对应的地貌单元起伏度值(m)								
	10%	20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%
月海	111	143	173	210	253	308	388	521	795
月陆	507	665	802	937	1082	1250	1457	1734	2177
撞击坑	730	1013	1247	1478	1721	1987	2287	2642	3125
撞击盆地	520	709	975	1034	1197	1378	1589	1866	2307

月陆的起伏度主要集中在767 m附近(图7),月陆区域的最低起伏度为1 m,最高起伏度为5396 m,平均起伏度为1231.69 m(表3),本文对月陆起伏度频率分布进行分析,地形起伏度值在507 m以下的区域约占月陆区域的10%,地形起伏度值在802 m以下的区域约占月陆区域的30%,地形起伏度值在1250 m以下的区域约占月陆区域的60%(表4)。本文统计的撞击坑地貌类型是以直径10 km以上的撞击坑为界,月海区域由于岩浆上涌充填,表面撞击坑较月陆区域更少,因此月陆区域起伏度较大区域主要包含直径小于10 km的撞击坑,由于月陆区域的起伏度主要集中在767 m附近,因此以起伏度700 m为界区分平原区域和小起伏丘陵,以起伏度1500 m为界区分月表地貌的小起伏丘陵和中起伏山地。

4.2.3 撞击坑和撞击盆地起伏度特征 撞击坑和撞击盆地是月球表面主要的撞击地貌类型,撞击坑和撞击盆地的形成主要分为3个阶段,撞击接触压缩、挖掘和改造3个阶段。撞击会挖掘月表靶体物质向外抛射,撞击坑直径较大时,瞬时撞击坑会由于重力作用坍塌形成坑底、坑壁和坑缘地貌。针对复杂撞击坑,撞击坑中心区域由于受到强力撞击和压缩作用,靶体表面会回弹形成中心隆起,这个隆起即为撞击坑的中央峰地貌。撞击能量的大部分转化为靶体区域熔融物和蒸发物的能量时,撞击坑向撞击盆地过渡^[32]。随着撞击坑直径的增加,撞击形成的中央峰的高度和体积不断增加,重力不稳定的撞击坑中心隆起会向下向外坍塌形成盆地的峰环。因此撞击坑的坑壁和中央峰区域以及撞击盆地的峰环区域和盆壁区域的起伏度值较大。整体来看,撞击坑起伏度主要集中在1527 m附近,撞击盆地的起伏度主要集中在1080 m附近(图9),因此考虑以起伏度1500 m为界区分撞击坑区域的小起伏和中起伏地貌。约80%撞击坑和撞击盆地的地形起伏度小于2642 m和1866 m(表4),以起伏度2500 m为界区分撞击坑和撞击盆地的大起伏和极大起伏地貌。

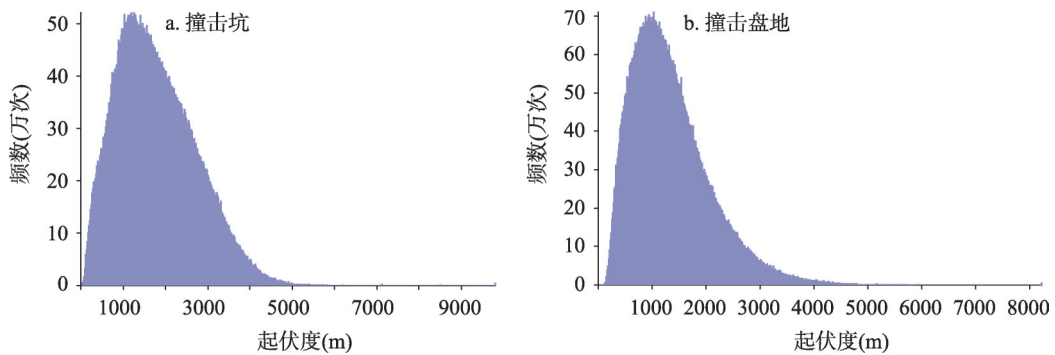


图9 月表撞击坑和撞击盆地地形起伏度频数分布直方图

Fig. 9 Frequency distribution histogram of impact craters and basin

4.3 月表起伏度分级

结合上文对月球表面基本地貌单元地形起伏度的分析,月海区域起伏度较小,月海中皱脊和月溪构造的起伏度稍大于月海平原区域,因此以起伏度 100 m 为界区分月海微平原区域和微起伏台地区域,以起伏度 200 m 及 300 m 为界分别区分月海与月陆过渡区域以及月海平原区域与月海皱脊和月溪地貌。撞击坑和撞击盆地是月表重要的地貌类型,坑底和盆底区域的起伏度较小,坑壁和盆壁的起伏度较大,撞击坑的中央峰及撞击盆地的峰环和盆壁处由于地形隆起,其起伏度较大,以起伏度 700 m 为界区分撞击坑区域的小起伏和中起伏地貌,以起伏度 1500 m 为界区分撞击坑区域的中起伏和大起伏地貌,以起伏度 2500 m 为界区分撞击坑和撞击盆地的大起伏和极大起伏地貌。分析上述结果发现,起伏度小于 700 m 的区域占全月的 26%。此外,由于月球表面最多的地貌类型是撞击坑,而撞击坑区域的地形起伏度较大,因此,中起伏、大起伏和极大起伏地貌类型占全月的比例较大,约全月区域的 74% 左右(表 5)。

参考地球上地貌类型的地形起伏分类标准,考虑月球地貌类型的实际情况,依据起伏度 100 m、200 m、300 m、700 m、1500 m 以及 2500 m 对月表起伏度进行分类。起伏度 < 100 m 为微起伏平原,起伏度 100~200 m 为微起伏台地,起伏度 200~300 m 为微小起伏丘陵,起伏度 300~700 m 为小起伏山地,起伏度 700~1500 m 为中起伏山地,起伏度 1500~2500 m 为大起伏山地,起伏度 ≥ 2500 m 为极大起伏山地(图 10)。从月表地形起伏度分级结果图中可以看出,月表的微起伏平原主要分布在月海平原区域、部分有玄武岩充填的撞击盆地的盆底区域以及撞击坑坑底区域;微起伏台地主要分布在月海和月陆过渡区域;微小起伏丘陵主要分布在月溪和皱脊等构造单元区域及坑底断裂区域;小起伏山地主要分布在撞击坑中央峰区域;中起伏山地主要分布在撞击坑坑底和坑壁过渡区域、撞击坑坑壁和坑缘过渡区域、撞击盆地盆底与盆壁过渡区域以及盆壁与盆缘过渡区域;大起伏和极大起伏山地主要分布在撞击坑坑壁区域及撞击盆地盆壁区域。

表 5 月表地形起伏度分类统计

Tab. 5 Statistics of classification criterion of lunar surface relief amplitude

	起伏度分类(m)						
	< 100	[100, 200)	[200, 300)	[300, 700)	[700, 1500)	[1500, 2500)	≥ 2500
地形名称	微起伏平原	微起伏台地	微小起伏丘陵	小起伏山地	中起伏山地	大起伏山地	极大起伏山地
占比(%)	1.06	4.3	4.71	15.48	35.18	27.38	12.89

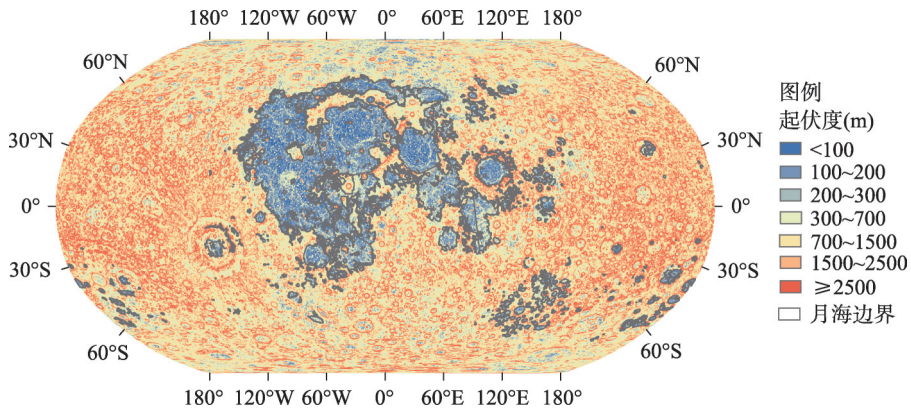


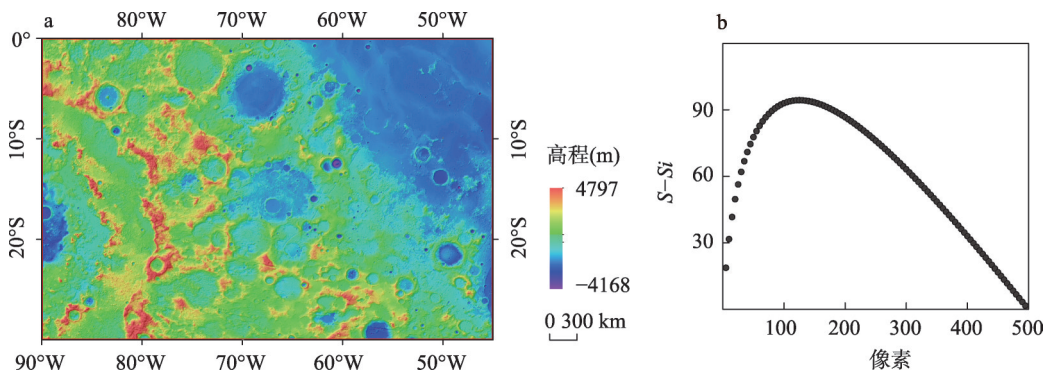
图10 月表地形起伏度分级结果

Fig. 10 The classification results of lunar surface relief amplitude

5 讨论与结论

本文基于SLDEM数据对不同分辨率的数据是否具有相同的起伏度窗口进行验证。由于数据分辨率越高数据量越大，本文在验证时选取LQ18图幅（图11a），采用墨卡托投影，利用均值变点法来确定基于SLDEM的最佳起伏度窗口。文中基于全月LOLA数据，利用两次均值变点法计算了最佳起伏度窗口，两次的结果基本一致。因此，本文基于SLDEM对LQ18图幅采用一次均值变点法确定最佳起伏度窗口。选择起始窗口以5个像元为半径的圆形窗口，以5个像元为步长，计算至500个像元内的平均起伏度以及对应的统计量，得到最佳起伏度窗口为半径为124个像元的圆形窗口（约 $54\pi \text{ km}^2$ ），结果如图11b。

基于LOLA数据得到的最佳起伏度窗口为半径为62个像元的圆形窗口，面积约 $53\pi \text{ km}^2$ ，与基于分辨率59 m的SLDEM计算得到的最佳起伏度窗口的面积（ $54\pi \text{ km}^2$ ）接近，因此本文计算得到的起伏度窗口具有一定的参考价值，可以更好的应用到月球地貌指标的分级中。将以上研究结果与高程分级组合可以形成月球表面地貌形态的基本类型，进而为月球地貌等级分类体系的构建提供数值参考。



注：图a分辨率为59 m/像素。

图11 LQ18图幅的SLDEM数据及均值变点法分析

Fig. 11 SLDEM data and the analysis results of the change-point in the mean of lunar surface relief amplitude

本文基于LOLA分辨率约为118 m的DEM数据,利用均值变点法确定了月表地形起伏度计算的最佳窗口,并对全月地形起伏度进行计算和分析,构建月表地形起伏度分级标准。结论如下:

(1) 基于均值变点法的结果分析,本文确定了计算月表起伏度的最佳窗口为以62个像元(约 $53\pi \text{ km}^2$)为半径的圆形窗口。本文将全月球分成撞击坑、撞击盆地、月海及月陆4种基本地貌单元,并对撞击坑、撞击盆地、月海和月陆地貌单元的起伏度形态进行研究。

(2) 参考地球上地貌类型的地形起伏分类标准和月球地貌类型的实际情况,确定了起伏度划分的阈值为100 m、200 m、300 m、700 m、1500 m以及2500 m,并基于该阈值将月表划分为微起伏平原、微起伏台地、微小起伏丘陵、小起伏山地、中起伏山地、大起伏山地以及极大起伏山地7个类型。

(3) 微起伏平原主要分布在月海平原区域、撞击坑坑底区域、部分有玄武岩充填的撞击盆地的盆底区域;微起伏台地主要分布在月海和月陆区域的交界区域;微小起伏丘陵主要分布在月溪及皱脊等构造单元区域以及撞击坑坑底断裂区域;小起伏山地主要分布在撞击坑中央峰区域;中起伏山地主要分布在撞击坑坑底和坑壁过渡区域、撞击坑坑壁和坑缘过渡区域、撞击盆地盆底与盆壁过渡区域以及盆壁与盆缘过渡区域。大起伏和极大起伏山地主要分布在撞击坑坑壁区域、撞击盆地盆壁区域。

参考文献(References)

- [1] Ouyang Ziyuan. Scientific objectives of Chinese lunar exploration project and development strategy. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(3): 351-358. [欧阳自远. 我国月球探测的总体科学目标与发展战略. *地球科学进展*, 2004, 19(3): 351-358.]
- [2] Wilhelms D E, McCauley J F, Trask N J. *The Geologic History of the Moon*. Washington, DC: U.S. Geological Survey Professional Paper, 1987.
- [3] Ouyang Ziyuan. *Introduction to Lunar Science*. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005. [欧阳自远. *月球科学概论*. 北京: 中国宇航出版社, 2005.]
- [4] Cheng Weiming, Liu Qiangyi, Wang Jiao, et al. A preliminary study of classification method on lunar topography and landforms. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(9): 885-897. [程维明, 刘樯漪, 王娇, 等. 全月球形貌类型分类方法初探. *地球科学进展*, 2018, 33(9): 885-897.]
- [5] Cheng Weiming, Zhou Zengpo, Wan Cong, et al. *Introduction to Lunar Morphology Science*. Beijing: Geological Publishing House, 2016. [程维明, 周增坡, 万从, 等. *月球形貌科学概论*. 北京: 地质出版社, 2016.]
- [6] Zhou Zengpo, Cheng Weiming, Zhou Chenghu, et al. Characteristic analysis of the lunar surface and automatically extracting of the lunar morphology based on CE-1. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 18-26. [周增坡, 程维明, 周成虎, 等. 基于“嫦娥一号”的月表形貌特征分析与自动提取. *科学通报*, 2011, 56(1): 18-26.]
- [7] Wang J, Cheng W M, Zhou C H, et al. Automatic mapping of lunar landforms using DEM-derived geomorphometric parameters. *Journal of Geographical Sciences*, 2017, 27(11): 1413-1427.
- [8] Cheng Weiming, Wang Jiao, Zhou Chenghu. Analysis on research progress and tendency of lunar morphological characteristics. *Geographical Research*, 2014, 33(6): 1003-1014. [程维明, 王娇, 周成虎. 月表形貌特征研究进展及趋势分析. *地理研究*, 2014, 33(6): 1003-1014.]
- [9] Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences. 1: 1000000 Geomorphological Mapping Specification (trial). Beijing: Science Press, 1987. [中国科学院地理研究所. 中国1:100万地貌制图规范(试行). 北京: 科学出版社, 1987.]
- [10] Li Bingyuan, Li Juzhang. 1:400000 Geomorphological Map of China. Beijing: Science Press, 1994. [李炳元, 李钜章. 中国1:400万地貌图. 北京: 科学出版社, 1994.]
- [11] Li Bingyuan, Pan Baotian, Han Jiafu. Basic Terrestrial geomorphological types in China and their circumscriptions. *Quaternary Sciences*, 2008, 28(4): 535-543. [李炳元, 潘保田, 韩嘉福. 中国陆地基本地貌类型及其划分指标探讨. 第四纪研究, 2008, 28(4): 535-543.]

- [12] Liu Qiangyi, Cheng Weiming, Yan Guangjian, et al. Distribution characteristics and classification schemes of lunar surface elevation. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(1): 106-119. [刘樯漪, 程维明, 阎广建, 等. 月表高程分布特征及其分级标准初探. *地理学报*, 2021, 76(1): 106-119.]
- [13] Smith D E, Zuber M T, Frey H V, et al. Mars orbiter laser altimeter: Experiment summary after the first year of global mapping of Mars. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E10): 23689-23722.
- [14] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18). DOI: 10.1029/2010GL043751.
- [15] Cavanaugh J F, Smith J C, Sun X L, et al. The mercury laser altimeter instrument for the MESSENGER mission. *Space Science Reviews*, 2007, 131(1-4): 451-479.
- [16] Mazarico E, Rowlands D D, Neumann G A, et al. Orbit determination of the lunar reconnaissance orbiter. *Journal of Geodesy*, 2012, 86(3): 193-207.
- [17] Barker M K, Mazarico E, Neumann G A, et al. A new lunar digital elevation model from the Lunar Orbiter Laser Altimeter and SELENE Terrain Camera. *Icarus*, 2016, 273: 346-355.
- [18] Han Haihui, Gao Ting, Yi Huan, et al. Extraction of relief amplitude based on change point method: A case study on the Tibetan Plateau. *Scientia Geographica sinica*, 2012, 32(1): 101-104. [韩海辉, 高婷, 易欢, 等. 基于变点分析法提取地势起伏度: 以青藏高原为例. *地理科学*, 2012, 32(1): 101-104.]
- [19] Tu Hanming, Liu Zhendong. Demonstration on optimum statistic unit of relief amplitude in China. *Journal of Hubei University (Natural Science)*, 1990, 12(3): 266-271. [涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度最佳统计单元的求证. *湖北大学学报(自然科学版)*, 1990, 12(3): 266-271.]
- [20] Tukey J W. *Exploratory Data Analysis*. Reading: Addison-Wesley Publishing Company, 1977.
- [21] Milier R L, Brewer J D. *The AZ of Social Research: A Dictionary of Key Social Science Research Concepts*. Padstow: SAGE Publications, 2003.
- [22] Warren P H. The magma ocean concept and lunar evolution. *Annual Review of Earth & Planetary Sciences*, 1985, 13(1): 201-240.
- [23] Warren P H. Early lunar crustal genesis: The ferroan anorthosite epsilon-neodymium paradox as a possible result of crustal overturn. *Mathematical Gazette*, 2001, 36(Suppl.): 219-220.
- [24] Robbins S J. A new global database of lunar impact craters >1-2 km: 1. Crater locations and sizes, comparisons with published databases, and global analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, 124(4): 871-892.
- [25] Liu J Z, Guo D J, Chen S B, et al. Chinese 1:2.5 M geologic mapping of the global moon. *Proceedings of the Lunar and Planetary Science Conference*, 2016.
- [26] Hartmann W K, Wood C A. Moon: Origin and evolution of multi-ring basins. *Moon*, 1971, 3(1): 3-78.
- [27] Che X C, Nemchin A, Liu D Y, et al. Age and composition of young basalts on the moon, measured from samples returned by Chang'e-5. *Science*, 2021, 374(6569): 887-890.
- [28] Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E12): 29239-29275.
- [29] Strom R G. *Lunar Mare Ridges, Rings and Volcanic Ring Complexes: The Moon*. Dordrecht: Springer, 1972: 187-215.
- [30] Yue Z, Li W, Di K, et al. Global mapping and analysis of lunar wrinkle ridges. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2015, 120(5): 978-994.
- [31] Hurwitz D M, Head J W, Hiesinger H. Lunar sinuous rilles: Distribution, characteristics, and implications for their origin. *Planetary and Space Science*, 2013, 79: 1-38.
- [32] Baker D M, Head J W H. New morphometric measurements of craters and basins on Mercury and the Moon from MESSENGER and LRO altimetry and image data: An observational framework for evaluating models of peak-ring basin formation. *Planetary and Space Science*, 2013, 86: 91-116.

Morphological differentiation characteristics and classification criteria of lunar surface relief amplitude

DENG Jiayin^{1,2}, CHENG Weiming^{1,2,3}, LIU Qiangyi^{1,2}, JIAO Yimeng^{1,2}, LIU Jianzhong^{2,3,4}

(1. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. CAS Center for Excellence in Comparative Planetology, Hefei 230052, China; 4. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China)

Abstract: The lunar landform is the result of the geological and geomorphic processes on the lunar surface. It is very important to identify the type of the lunar landforms. Geomorphology is the scientific study of the origin and evolution of topographic landforms on the planetary surface. Elevation and relief amplitude are the most commonly used geomorphic indexes in the study of geomorphological classification. Previous studies have determined the elevation classification criterion of lunar surface. In this paper, we focus on the classification criterion of the topographic relief amplitude of the lunar surface. As for the estimation of the best window to calculate the relief amplitude of the lunar surface, we used the method of change-point in the mean based on LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) DEM data and DEM that combines the LOLA and SELENE TC (Terrain Camera) merged Digital Elevation Model (SLDEM2015). According to the statistical analysis of the basic lunar landforms, the classification criterion of lunar surface relief amplitude is determined. Taking the topographic relief amplitudes of 100 m, 200 m, 300 m, 700 m, 1500 m and 2500 m as the thresholds, the lunar surface is divided into seven geomorphic types, including slightly micro-relief plains (< 100 m), slightly micro-relief platforms [100 m, 200 m), micro-relief landforms [200 m, 300 m), small relief landforms [300 m, 700 m), medium relief landforms [700 m, 1500 m), large relief landforms [1500 m, 2500 m) and extremely large relief landforms (\geq 2500 m). The slightly micro-relief plains are mainly distributed in the maria, and the floor of craters and basins that are filled with basalts, while the slightly micro-relief platforms are mainly distributed in the transition regions between the maria and highlands. The micro-relief landforms are mainly located in the regions with higher topography than the mare, such as wrinkle ridges and sinuous rilles in the mare. The small relief landforms are mainly scattered in the central peak and floor-fractured of craters. The medium relief landforms are mainly distributed in the transition regions between the crater floor and crater wall, between the crater wall and crater rim, between the basin floor and basin wall, and between the basin wall and basin rim. Large and extremely larger relief landforms are mainly scattered in the crater wall and basin wall. The determination of classification criteria of lunar surface relief amplitude in this paper can provide important references for the construction of digital geomorphology classification schemes of the lunar surface.

Keywords: lunar geomorphological classification schemes; morphometric features; lunar relief amplitude; characteristics analysis; classification criteria