

月表高程分布特征及其分级标准初探

刘橦漪^{1,2}, 程维明^{1,2,3}, 阎广建⁴, 王睿博¹, 刘建忠^{2,3,5}

- (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. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875;
5. 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: 月球是地球的唯一天然卫星,也是现阶段深空探测的主要天体。月表形貌研究有助于了解月球的状态、结构和组成,能够为探究月球起源和演化等科学问题提供直接、可靠的证据。与地貌分类相比,月貌研究起步较晚,发展较为缓慢。尽管月貌研究已取得了一定进展,但月球形貌分类过程中仍旧缺乏对于形貌指标,如高程等的应用,对于形貌特征的描述仍存在部分缺失。本文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地质构造单元的高程特征,认为-2500 m等高线能够较好的区分月海内部区域;-1500 m等高线能够较好的区分月海区域与月陆区域;1000 m等高线与南极艾肯盆地边界拟合程度较好;3000 m等高线能够较好地突出月陆地区撞击坑的边界。在此基础上,提出以-2500 m、-1500 m、1000 m、3000 m 4个高程值作为月球形貌分类体系中的高程分类标准,将月球表面划分为极低海拔、低海拔、中海拔、高海拔和极高海拔5个形貌类型。

关键词: 月球形貌分类方案;高程;月球形貌类型;分布特征;划分标准

DOI: 10.11821/dlxb202201008

1 引言

作为地球的唯一天然卫星,月球是现阶段深空探测的主要天体,也是行星观测任务中获取数据种类较多,精度较高的天体之一^[1-2]。月球上空缺乏复杂的大气层,塑造月球表面形貌的营力作用主要包括:岩浆活动、外来天体的撞击作用、昼夜和阴阳面的温差引起的岩石破碎、太阳风风化作用等^[3]。除岩浆活动以及外来天体的撞击外,其他营力对月球地貌的改造作用相对较弱,因此月球地貌主要是内动力作用、岩浆作用与撞击作用的结果。月球地貌研究有助于了解月球的状态、结构和组成,为探究月球起源和演化历史等科学问题提供直接、可靠的证据,是月球探索过程中必不可少的基础性工作。月球地貌分类体系的构建以及月球地貌类型划分是月球地貌研究中总结性的工作,在月球地貌研究中具有重要地位^[4-5]。

与地貌分类相比,月球地貌研究起步较晚,发展较为缓慢。早期研究提出月球地貌可以划分为月海、月陆以及撞击坑三大类别,国际天文联合会在此基础上进一步细化月

收稿日期: 2020-12-18; 修订日期: 2021-09-24

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

作者简介: 刘橦漪(1993-), 女, 辽宁大连人, 博士, 主要从事月球形貌研究。E-mail: liuqy.18b@igsnr.ac.cn

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

E-mail: chengwm@reis.ac.cn

貌类型,提出了月沼、月湾、月岬、山地、穹丘、皱脊、月谷、月溪等多个二级类^[6],这一分类体系在月球地质图中应用较广。随着月球探测的逐步深入,多类高精度探月数据的获取为月球形貌类型划分的相关研究提供了大量的基础数据,月球地貌分类研究也在逐步细化。相对于全月球尺度的月貌特征分析而言,更多的学者倾向于研究月球撞击坑的形态特征分类,如王娇等提出撞击坑形态和规模相结合的比对指标,将全月球撞击坑分为月海残留型、特大复杂型、大环状平原型、中等凹坑平原型、小规模碗型和微状酒窝型6大类^[7];Ströfller等将撞击坑分为简单撞击坑、复杂撞击坑和撞击盆地3大类^[8];何姝珺等将撞击坑分为月海残留型、复杂型、同心环型、中央隆起型、平底型、碗型以及简单型7类^[9]。在全月地貌分类方面,王娇等基于聚类与非监督分类的思想,以高程、坡度、起伏度为主要分类依据,建立了月表形貌自动分类方法^[10],这一方法主要基于相似性原理,自动化程度高,但不同研究区的分类结果具有明显差异,缺乏统一的分类标准与分类体系。程维明等和周增坡等借助于遥感影像解译特征对月球地貌进行分类,提出月海、月陆、撞击坑、平原、台地、丘陵、山地、环形山、撞击坑链、月溪和月岭等类型,并进一步构建了月球形貌矩阵式多级分类体系^[5,11]。这一分类方法从物质、形貌特征、地质年代等方面入手,与地球现有的地貌分类方案较为类似,但对于形貌分类的研究尚不透彻,缺少形貌指标的特征分析及划分依据。除此以外,Spudis等和Kruger等还以东海及第谷区域为例进行过月球地貌分类示例^[12-13]。整体来看,月球地貌分类研究已取得一定进展,提出了综合考虑物质组成、地质年代、形貌特征等多个方面的月球地貌分类体系,但其中的形貌分类缺乏对于形貌指标如高程、起伏度、坡度等的研究及应用,形貌特征的描述尚不完善。

相比较而言,地球形貌分类研究起步较早,发展较为完善,对于月球地貌分类体系的建立具有一定的借鉴意义^[14-15]。高程和起伏度是最基本的地貌指标,同时反映了内营力和外营力作用的特点和性质,无论是在全球地貌分类方案还是特定区域的地貌分类方法中,高程都是重要的分类特征。1987年出版的“中国1:100万地貌图制图规范”中,按照高程划分出平原、台地、丘陵、低山、中山、高山、极高山7个陆地基本形态类型^[16];程维明等提出的中国陆地地貌基本形态类型划分中,以高程为划分依据,以1000 m、3500 m、5000 m为界限,将地表划分为低海拔、中海拔、高海拔与极高海拔4大类^[17];国际地理联盟地貌测绘委员会编制的“1:250万欧洲国际地貌图”,也以高程和起伏度为划分依据,将基本地貌类型分为5类^[18]。已有研究表明,高程在月球地貌分类研究同样具有重要意义,如月海及月陆分界线集中分布在-1400 m高度左右^[19]。因此,借鉴地球形貌划分体系,将高程加入月球地貌分类体系中具有重要意义。

月球地貌分类对于月球地貌研究具有重要意义,而构建月球地貌分类体系是月球地貌分类的基础。已有研究多着重于单一形貌类型分类体系的建立,较少涉及全月地貌类型划分体系;已建立的月球地貌划分体系虽然综合考虑物质成分、地质年代与形貌特征等各个方面,但仍缺乏对于基础形貌指标的考虑。因此,本文在综合统计月球高程特征的基础上,通过分析月海、月陆、撞击坑及撞击盆地的高程特征,对月球高程分布特征做以总结,并进一步提出月球表面高程分类标准。研究结果表明,以-2500 m、-1500 m、1000 m、3000 m 4个高程值为划分标准将月球表面分为极低海拔、低海拔、中海拔、高海拔、极高海拔5个类别较为合理。这一划分方案不仅充分考虑月海、月陆以及南极艾肯盆地间的高程差异,并且保证了全月范围及月海、月陆等地质构造基本单元内高程分类的均衡性与多样性。本文基于对月表高程的相关分析,提出了高程分类标准,为后续月球地貌类型划分体系及方案的建立提供了一定参考依据。

2 数据来源

研究数据包括月球高程数据、月海边界数据以及撞击坑数据。高程数据为美国月球轨道勘测器上搭载的月球激光测高探测器 (Lunar Orbiter Laser Altimeter, LOLA) 研究组公布的分辨率为 118 m/像素的全月数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 数据^[20-21]。LOLA 能够提供大量月表激光测高点数据, 准确反映了月表高程变化, 水平方向精度约为 20 m 左右, 垂直方向精度约为 1 m 左右^[21]。月海边界数据为美国地质调查局公开的月海数据, 该数据为矢量格式, 包含全月月海边界。撞击坑数据为 2018 年 Robbins 公布的撞击坑数据库^[22]。数据库内撞击坑由人工目视解译提取, 主要使用的基础数据包括 LROC WAC 影像 (Lunar Reconnaissance Orbiter Camera Wide-angle Camera)、LOLA DEM 高程数据、SLDEM 2015 高程数据和 TC (Terrain Camera) 影像, 这一数据库包含超 130 万个撞击坑, 较为完整的包含了全月直径 1 km 以上的撞击坑。

3 月球表面高程特征

月表高程分类是月球地貌分类体系中的重要内容, 而对月球表面高程特征的研究是构建月表高程分类方案的基础。月海、月陆、撞击坑与撞击盆地在物质组成与成因中存在较大差异, 是目前对于月球地貌分类的常规认知, 也是现有月球地貌分类体系中必然涉及的基础分类。在月球地貌分类体系中, 高程分类实质上是在月海、月陆、撞击坑与撞击盆地 4 个基础地质构造单元下的次级分类。因此, 本文从整体特征、月海特征、撞击坑与撞击盆地特征出发, 对月球表面高程特征进行分析。

3.1 整体特征

以 LOLA 118 m 分辨率的 DEM 数据为基础数据源, 对全月高程的基本特征进行统计。月球表面高程最大值为 10781.5 m, 最小值为 -9128.5 m, 平均值约为 -2038.7 m, 近 50% 区域高程位于 -2000~600 m 之间, 约有 65% 左右区域高程为负值 (表 1)。全月高程较低区域主要集中分布在南极艾肯盆地附近, 高程较高区域主要集中于西半球月陆高地附近 (图 1)。

从全月高程统计结果来看, 月球表面高程整体上呈现正态分布的特征, 但相对标准正态分布而言偏度较大, 具备一定正偏态特征。月表高程主要集中分布在 -3000~1000 m 之间 (图 2), 在 -3000 m 及 1000 m 附近, 单位高程统计区间在全月范围所占比例均出现显著增高或减小的现象。整体来看, 有约 10% 左右区域其高程分布在 -3000 m 以下, 约有近 20% 区域高程分布在 -2200 m 以下, 近 40% 区域高程分布在 -1200 m 以下, 50% 左右区域其高程小于 -800 m, 80% 左右区域高程小于 1000 m, 90% 左右区域高程小于 2500 m (图 3、表 2)。

3.2 月海高程特征

3.2.1 月海内高程特征 国际天文学联合会将月海定义为“填充有黑色玄武岩并略微起伏的大区域”。月海区域在月球表面占有较大面积, 且无论是在物质成分、成因还是形貌上

表 1 月表高程统计值

Tab 1 Statistics of the lunar surface elevation

统计值	最小值	上四分位数	下四分位数	最大值	平均值
高程(m)	-9128.5	-1908	632.5	10781.5	-1038.7

注: 各统计数据均由 DEM 栅格像元数计算而来, 存在一定投影导致的误差, 下文同。

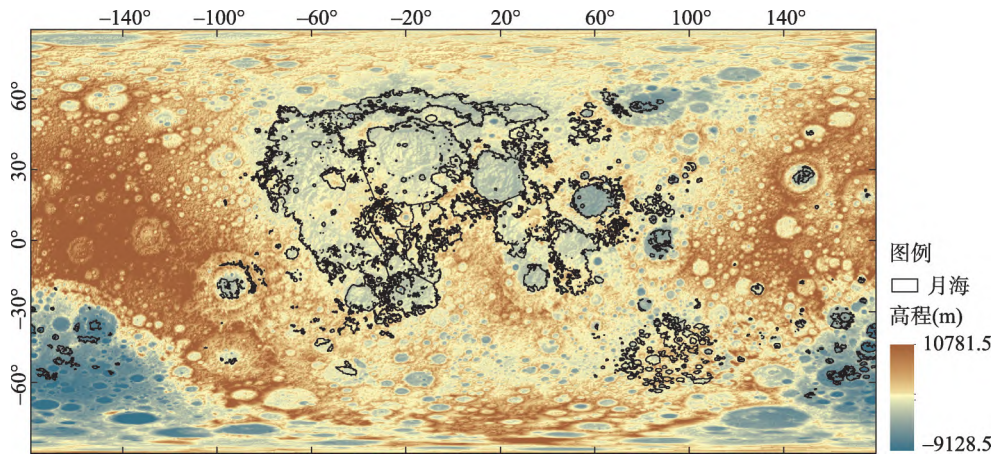


图1 月球高程分布

Fig. 1 Distribution of the lunar surface elevation

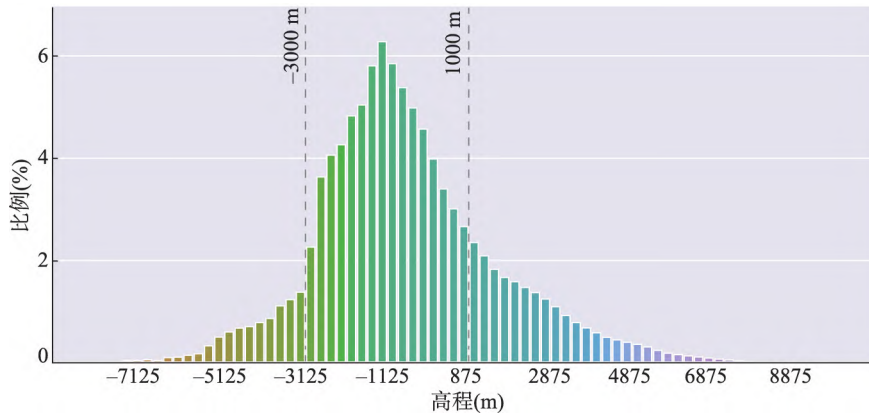


图2 月球高程频率分布直方图

Fig. 2 Frequency distribution of the lunar surface elevation

都明显有别于其他区域。因此，月球地貌分类方案中往往将其单独列为一类地质构造单元，也是分析月表高程特征中必须要涉及的分析单元。对比全部月海区域，位于南极艾肯盆地内的月海区域高程较低，而月球正面月海区域如风暴洋等地的高程相对较高（图4）。月海区域高程的统计结果表明，整个月海区域内最低高程为-7431.5 m，最高高程为870.5 m，平均高程为-2119.9 m，约有50%区域高程位于-2500~-1600 m之间（表3）。从各高程范围在月海区域所占的比例来看，随着高程的升高，250 m高程带内所包含的区域范围占全部月海的区域比例显著上升，在-3000~-2000 m间达到最高值，随后逐步缓慢下降（图5a、图5b）。月海低海拔区域，随高程升高，高程带内所含范围显著上升的主要原因在于低海拔月海区域主要位于南极艾肯盆地内，这一区域的月海高程和其他月海区域相差较大，且整个区域范围在全部月海区域所占比例较小，因此高程带内所含范围的显著升高实际上表达了南极艾肯盆地内月海高程与南极艾肯盆地外月海高程的差异性。月海区域中较高海拔区域主要位于月海月陆交界处，这些区域成片相连，高程过渡平缓，因此会使得在-2000 m后，随着高程的逐步升高，250 m高程带内所含区域范围逐步减小。

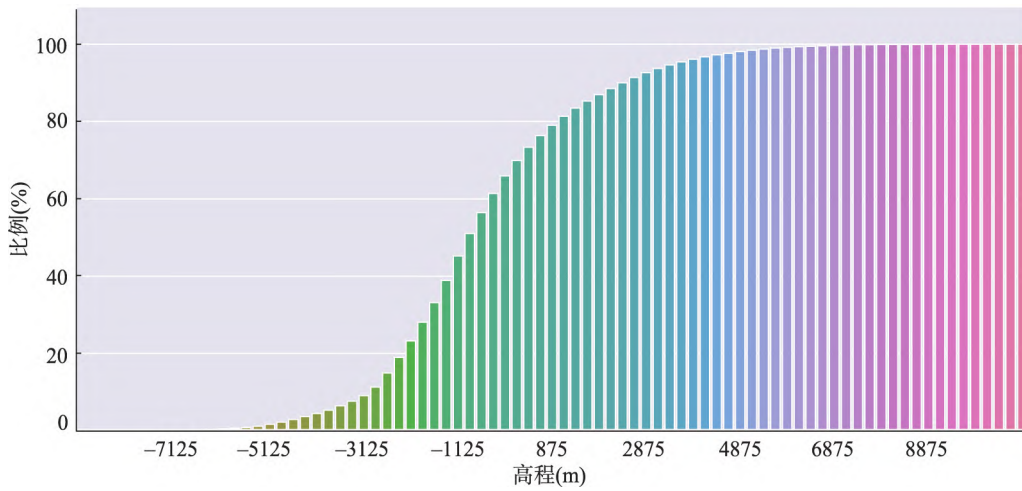


图3 月球高程累计频率分布图

Fig. 3 Cumulative frequency distribution of the lunar surface elevation

表2 月球高程分位数表

Tab. 2 Quantile distribution of the lunar surface elevation

比例(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
高程(m)	-2868	-2192	-1653	-1205.5	-796	-323	253	1100	2493

注：表中各统计数据均由DEM栅格像元数计算而来,存在一定投影导致的误差。

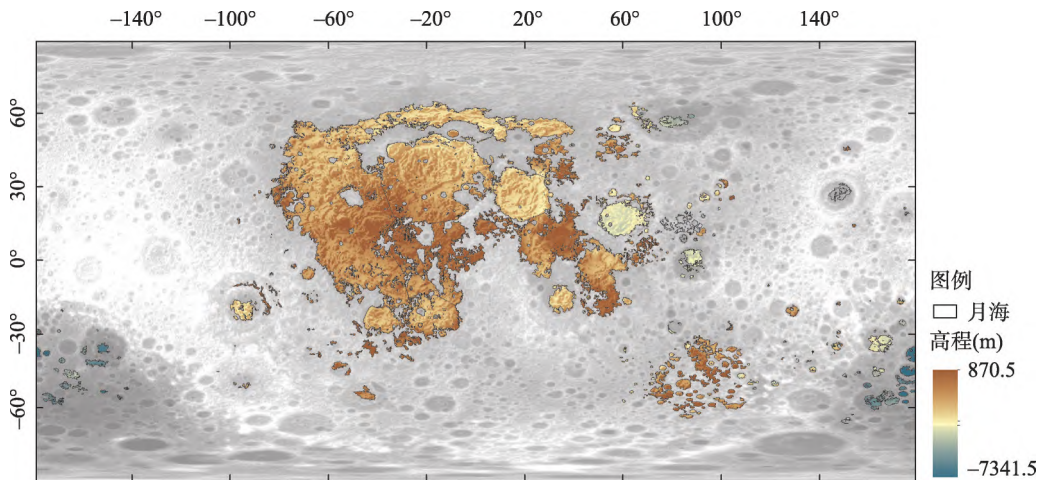


图4 月海高程分布图

Fig. 4 Distribution of surface elevation in lunar mare

表3 月海区域高程统计值

Tab. 3 Statistics of surface elevation in lunar mare

统计值	最小值	上4分位数	下4分位数	最大值	平均值
高程(m)	-7341.5	-2535.5	-1592	870.5	-2119.9

注：各统计数据均由DEM栅格像元数计算而来,存在一定投影导致的误差。

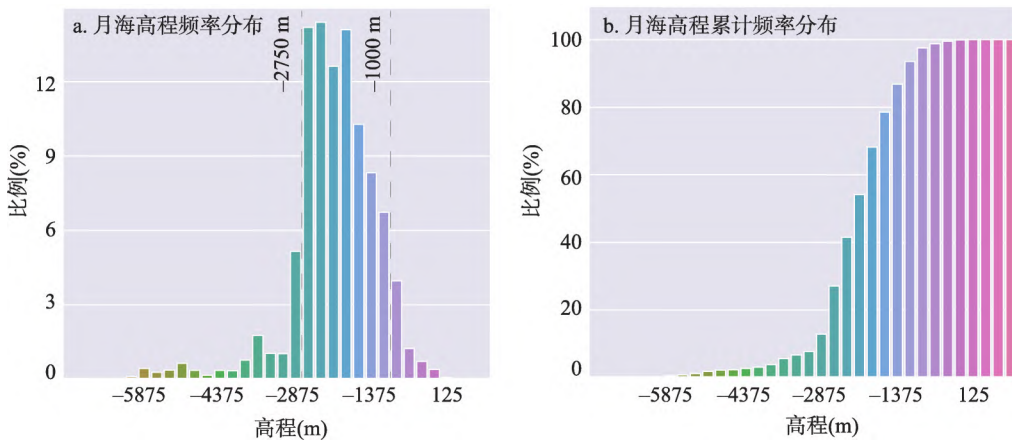


图5 月海区域高程分布特征图

Fig. 5 Characteristics of surface elevation in lunar mare

整体来看，月海区域中有约10%左右区域高程低于-2800 m以下，约有近25%区域高程低于-2500 m，50%左右区域其高程小于-2000 m，80%左右区域高程小于-1500 m，90%左右区域高程小于-1000 m。月海区域高程主要集中在-2750~-1000 m之间，大多数区域的高程集中在-2750~-1500 m之间（表4）。

3.2.2 月海边缘高程特征 对月海边缘区域高程特征的研究是分析月海高程特点的另一重要方面，本文通过月海边缘高程值的分布特征以及寻找与月海边缘拟合程度最高的高程值两个方面来进行研究。月海边缘高程值分布是探究月海与月陆高程差异最直接的方式。对月海边缘高程的统计表明，边缘区域高程最大值为910 m，最小值为-7076 m，平均值为-4162.78 m，主要集中分布在-2625~-1125 m之间（表5、图6a）。

月海边缘拟合程度最高的高程值意味着高程等值线与月海边界线拟合程度最好，距离最小。本文以拟合度指标 R_i 为评价依据，对高程等值线与月海边界线拟合程度进行计算，该指标的计算方式为：

$$R_i = \frac{\sum_{j=1}^n distance(j, i)}{n} \tag{1}$$

式中： R_i 表示月海边界线与值为 i 等高线的拟合程度； n 为用于评价的月海边界样本点个数； $distance(j, i)$ 表示第 j 个样本点与等高线 i 间的距离。月海边界样本点与等高线 i 间的平均距离越小，拟合度指标 R_i 值越小，等值线与月海边界线拟合程度越好，月海边界样本点与等高线 i 间的平均距离越大，拟合度指标 R_i 值越大，拟合程度越差。

表4 月海高程分位数表

Tab. 4 Quantile distribution of surface elevation in lunar mare

比例(%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90
高程(m)	-2841	-2614.5	-2452.5	-2276.5	-2081.5	-1902	-1714	-1458.5	-1136.5

表5 月海边界高程统计值

Tab. 5 Statistics of rim crest elevation in lunar mare

特征值	最小值	上4分位数	下4分位数	最大值	平均值
高程(m)	-7076	-2555	-1320.5	910	-4162.78

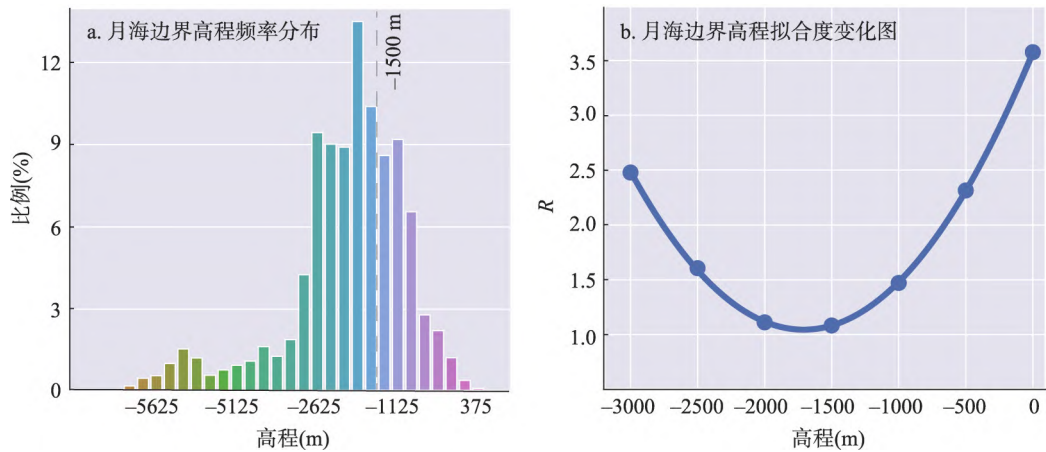


图6 月海边界高程特征图

Fig. 6 Characteristics of rim crest elevation in lunar mare

以月海边界线上的5万个随机点为样本点,以LOLA DEM数据计算获得的-3000 m、-2500 m、-2000 m、-1500 m、-1000 m、-500 m以及0 m等高线为待评价等高线,依次计算等高线与月海边界的拟合度指标 R_i (图6b)。结果表明,在所计算的7条等高线中,-1500 m等高线与月海边界线的拟合程度最好,其次为-2000 m,0 m等高线的拟合程度最差。

3.3 撞击坑与撞击盆地高程特征

3.3.1 撞击坑高程特征 与月海区域分布范围广,高程连续性高的特点不同,撞击坑自身分布较为分散,深度较深,撞击坑内部及撞击坑之间高程差异相对较大。借鉴地球形貌分类中山体海拔划分以山脚最低点高程为分类依据的划分原则,撞击坑作为一个整体的地质构造要素,以高程为指标进行形貌划分时,所采取的高程依据应为撞击坑内最低点高程值。因此,相较于其他撞击坑高程相关分析,对撞击坑最低点高程分布特征的分析对于以高程为指标进行月球地貌划分体系构建的意义更大。

以全月直径10 km以上,200 km以下22000余个撞击坑为分析对象,统计其坑内最低点高程。统计结果表明,从撞击坑个数来看,约10%左右撞击坑其最低高程分布在-3000 m以下,占全部撞击坑面积的25%左右;约有近20%区域高程分布在-2300 m以下,占全部撞击坑面积的45%;近40%区域高程分布在-1300 m以下,占全部撞击坑面积的66%;50%左右区域其高程小于-800 m,占全部撞击坑面积的73%;75%左右区域高程小于1000 m,占全部撞击坑面积的90%。从撞击坑面积占比来看,近一半撞击坑面积的高程小于-2150 m(表6、图7)。

表6 撞击坑(直径>10 km)最低高程统计值

Tab 6 Minimum elevation statistics of craters (diameter > 10 km)

统计值	最小值	上四分位数	下四分位数	最大值	平均值
高程(m)	-9128.5	-2026	899	8252.5	-549.32

3.3.2 南极艾肯盆地高程特征 南极艾肯盆地是目前已确认的月球上最古老的,也是最大的撞击盆地,通常认为南极艾肯盆地的形成是月球上外动力地质作用被记录的时间起点。南极艾肯地体也是月球三大地体之一,已有研究人员提出以南极艾肯撞击事件为界线划分前酒海纪^[23-24]。作为月球上重要的历史事件,对南极艾肯盆地高程特征的分析有助

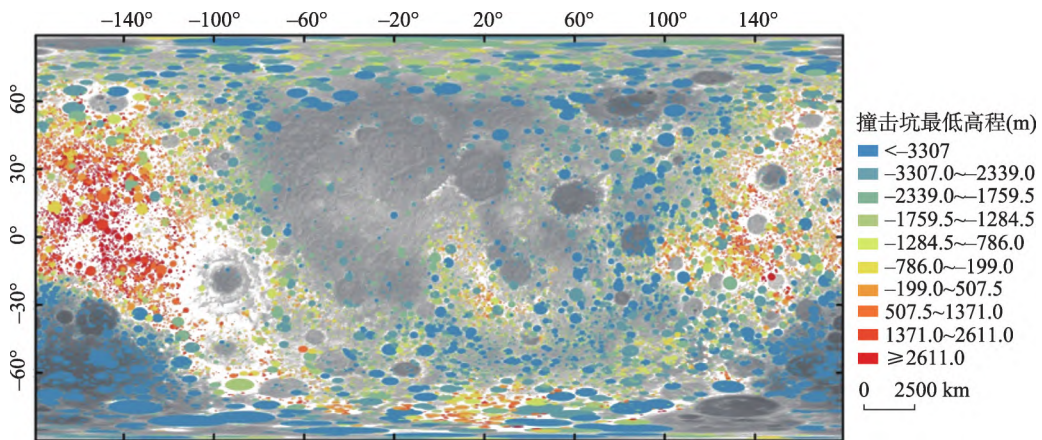


图7 撞击坑内最低高程分布图

Fig. 7 Distribution of craters' minimum elevation

于区分这一区域及其周边区域。以南极艾肯盆地椭圆拟合边界线上的5万个随机点为样本点，以LOLA DEM数据计算获得的-3000 m、-2500 m、-2000 m、-1500 m、-1000 m、-500 m、0 m、500 m、1000 m、1500 m、2000 m、2500 m以及3000 m等高线为待评价等高线，依次计算等高线与月海边界的拟合度指标 R_i (图8)。结果表明，在所计算的7条等高线中，1500 m等高线与南极艾肯盆地边界线的拟合程度最好，其次为1000 m，而-3000 m等高线的拟合程度则是最差的。

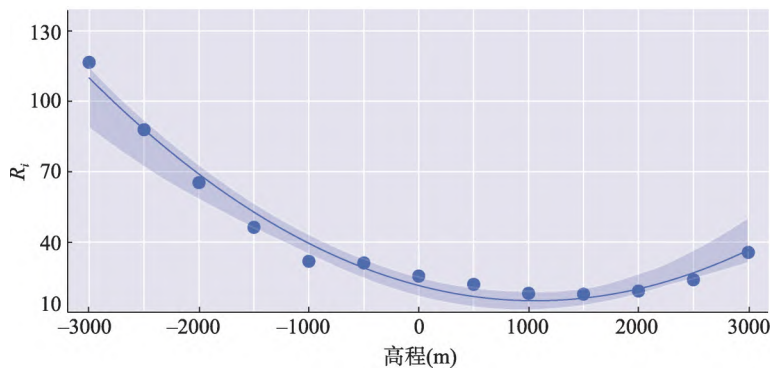


图8 南极艾肯盆地高程拟合度变化图

Fig. 8 Variation of R_i calculated for the South Pole-Aitken basin

4 月表高程分类方案构建

4.1 月表高程分类方案构建标准

综合考虑月表高程分类方案在全月地貌分类体系中所占位置，借鉴地球地貌类型划分体系及原则，提出月表高程分类方案应尽可能满足以下3个条件：

(1) 高程分类方案不仅仅表达当前的形貌差异，还应该包含更多的地学意义。例如，中国的海拔高度分级符合其三阶段特征。月球表面以月海和月陆高地为主要特征，而南极艾肯盆地是目前已确认的月球上最古老的，也是最大的撞击盆地，被认为是月球上外动力地质作用被记录的时间起点。因此，对于月球来说，高程的划分应能够充分表

达或区分月海、月陆高地和南极艾肯盆地3个区域。

(2) 从地貌类型划分的平衡性及多样性角度而言, 高程分类结果应确保月陆、月海、撞击坑与撞击盆地4个地质构造单元内至少包含2个高程类别。即月陆、月海、撞击坑与撞击盆地内部的高程类别应该有所差异, 不能全部属于同一高程级别。

(3) 各高程类别所占范围比例不应相差太大, 避免出现某一级别所占范围过多或过少的现象。

4.2 月表高程分类特征值

从全月高程分布角度看, 约10%左右区域高程小于-2868 m, 约20%左右区域高程小于-2192 m, 约50%左右区域高程小于-796 m, 约80%左右区域高程小于1100 m, 约90%左右区域高程小于2943 m。

从地质构造单元的角度来看, 综合考虑月海区域内部高程和月海边缘高程的分布特点, 认为存在-2500 m、-2000 m以及-1500 m 3个高程分类特征值。-2500 m可以较好的对月海内部高程进行划分, 将月海内部划为比例较为平衡的两部分, -2000 m及-1500 m有助于区分月海区域和月陆区域, 具有较高的地学意义。从撞击坑角度而言, 存在-3000 m、-1500 m、1000 m、2500 m以及3000 m 5个高程分类特征值。-3000 m、-1500 m以及-1000 m对于撞击坑区域内高程分类效果较好, 约有25%区域撞击坑高程小于-3000 m; 50%区域撞击坑高程小于-1500 m; 75%区域撞击坑高程小于1000 m。在等值线与山体阴影图的叠加可以明显看出, 2500 m以及3000 m对于月陆和撞击坑的区分效果较好, 2500~3000 m间高程等值线与月陆高地区域大部分撞击坑坑缘或坑底的高程相接近。从南极艾肯盆地角度而言, 存在1000 m和1500 m两个高程分类特征值。南极艾肯盆地椭圆拟合边界在1000 m等高线以及2000 m等高线之间, 整体上与1000 m和1500 m等高线更为接近, 因此选择1000 m或1500 m能够较好的突出南极艾肯盆地边界(表7)。

4.3 月表高程分类方案

4.3.1 方案构建与对比 考虑高程分类方案在月球地貌分类体系中所占的地位, 认为基于高程的月貌分类方案应该能够起到区分月海、月陆以及南极艾肯盆地的作用。基于月海及南极艾肯盆地边界拟合高程的研究表明, -1500 m和-2000 m等高线对月海边界的拟合程度较好, 1000 m和1500 m等高线对南极艾肯盆地边界的拟合程度较好。因此, 在月表高程分类方案中, 高程分类特征值应在-1500 m与-2000 m以及1000 m与1500 m中各包含一个。考虑高程分类结果的多样性, 从月海角度看, 高程分类方案中应在-2000 m以下存在一类, 以保证月海中高程分类结果多样性; 从月陆及撞击坑角度看, 高程分类方案中应在1500 m以上存在一类, 以保证月陆及撞击坑高程分类结果多样性。考虑高程分类结果的均衡性, 分类结果中每一级别在月表中所占范围不应过小, 而全月约10%区域高程低于-2868 m, 约10%区域高程高于2943 m。因此, 分类方案中, 最低海拔分界线应在-3000 m以内, 最高海拔分级界限应在3000 m以内。此外, 考虑月球地貌分类体系的复杂性及月表高程分布特征, 参考已有地貌分类体系中的高程分类, 认为以4个分类特征值划分为极低海拔, 低海拔, 中海拔, 高海拔和极高海拔5个高程类型较为合理。

本文在综合比较高程特征值的分布、地理含义及其在分类体系中作用的基础上, 将其分为5个类别以便后续构建高程分类方案。以来源于月表高程分布的5个特征值为一类, 主要用作分类方案内各高程类别比例参考。-3000 m及2500 m为一类, 为极低海拔与低海拔分类特征值; -2000 m及-1500 m为一类, 二者都对区分月海月陆起到一定作用, 为低海拔与中海拔分类特征值; 1000 m及1500 m为一类, 二者都对突出南极艾肯盆

表7 月表高程分级标准及地理意义

Tab. 7 Lunar surface elevation classification of different regions and their geographical significance

月球高程分区	比例分割 分级标准(m)	调整分级 标准(m)	分级来源	地理意义
极低海拔区	-	-3000	撞击坑	25%区域撞击坑,其高程小于-3000 m
	-2868	-	月表高程分布	全月约10%区域高程低于-2868 m
低海拔区	-	-2500	月海	较好的对月海内部高程进行划分
	-2192	-	月表高程分布	全月约20%区域高程低于-2192 m
中海拔区	-	-2000	月海	有助于区分月海区域和月陆区域
	-	-1500	月海撞击坑	有助于区分月海区域和月陆区域,50%区域其撞击坑高程小于-1500 m
	-796	-	月表高程分布	全月约50%区域高程低于-796 m
	-	1000	南极艾肯盆地撞击坑	与南极艾肯盆地边界高程相接近,75%区域其撞击坑高程小于1000 m
高海拔区	1100	-	月表高程分布	全月约80%区域高程低于1100 m
		1500	南极艾肯盆地	与南极艾肯盆地边界高程相接近
		2500	撞击坑	能够用于区分月陆高地区域撞击坑
极高海拔区	2943	-	月表高程分布	全月约90%区域高程低于2943 m
		3000	撞击坑	能够用于区分月陆高地区域撞击坑

注:加粗数值为本文采用的月表5类形貌的分级标准高程。

地起到一定作用,为中海拔与高海拔分类特征值;2500 m及3000 m为一类,主要用于区分撞击坑与月陆高地,为高海拔与极高海拔特征值。以上述4个类别特征值为基础,本文提出了4种高程分类方案(表8)。方案1以-2000 m以及1000 m为分类标准保证月海、月陆以及南极艾肯盆地的区分;搭配-3000 m以及3000 m以保证高程分类多样性及均衡性。方案2以-1500 m以及1500 m为分类标准保证月海、月陆以及南极艾肯盆地的区分;搭配-2500 m以及3000 m以保证高程分类多样性及均衡性。方案3的分类标准为

表8 4种月球高程的分类方案

Tab. 8 Lunar elevation classification

	标准(m)	分级来源	地理意义
方案1	-3000	撞击坑	25%区域撞击坑,其最低高程小于-3000 m
	-2000	月海	有助于区分月海区域和月陆区域
	1000	南极艾肯盆地撞击坑	与南极艾肯盆地边界高程相接近,75%区域其撞击坑高程小于1000 m
	3000	撞击坑	能够用于区分月陆高地区域撞击坑
方案2	-2500	月海	较好的对月海内部高程进行划分
	-1500	月海撞击坑	有助于区分月海区域和月陆区域,50%区域其撞击坑高程小于-1500 m
	1500	南极艾肯盆地	与南极艾肯盆地边界高程相接近
方案3	3000	撞击坑	能够用于区分月陆高地区域撞击坑
	-2500		较好的对月海内部高程进行划分
	-1500	月海撞击坑	有助于区分月海区域和月陆区域,50%区域其撞击坑高程小于-1500 m
方案4	1000	南极艾肯盆地撞击坑	与南极艾肯盆地边界高程相接近,75%区域其撞击坑高程小于1000 m
	3000	月海	能够用于区分月陆高地区域撞击坑
	-3000	撞击坑	25%区域撞击坑,其最低高程小于-3000 m
方案4	-2000	月海	有助于区分月海区域和月陆区域
	1500	南极艾肯盆地	与南极艾肯盆地边界高程相接近
	3000	撞击坑	能够用于区分月陆高地区域撞击坑

-2500 m、-1500 m、1000 m、3000 m。方案4的分类标准为-3000 m、-2000 m、1500 m、3000 m。

从分类结果上来看,4个方案对于南极艾肯盆地边界的区分效果都比较好,但方案2与方案3对于月海与月陆的区分效果更好,具有的地质意义相对较高(图9)。方案2与方案3的主要区别在于高海拔地区与极高海拔地区的占比。方案2中高海拔区域所占范围相对较小而极高海拔区域所占范围偏大;方案3则刚好相反,高海拔区域所占范围大于极高海拔区域。总体上来看,方案3的分布规律更为合理,符合中部较多,两边区域相对较小的理想分布特征。因此,本文以方案3为最终分类方案,其高程划分更为合理,在充分突出月海、月陆以及南极艾肯盆地等的基础上保证了划分结果的均衡性与多样性。

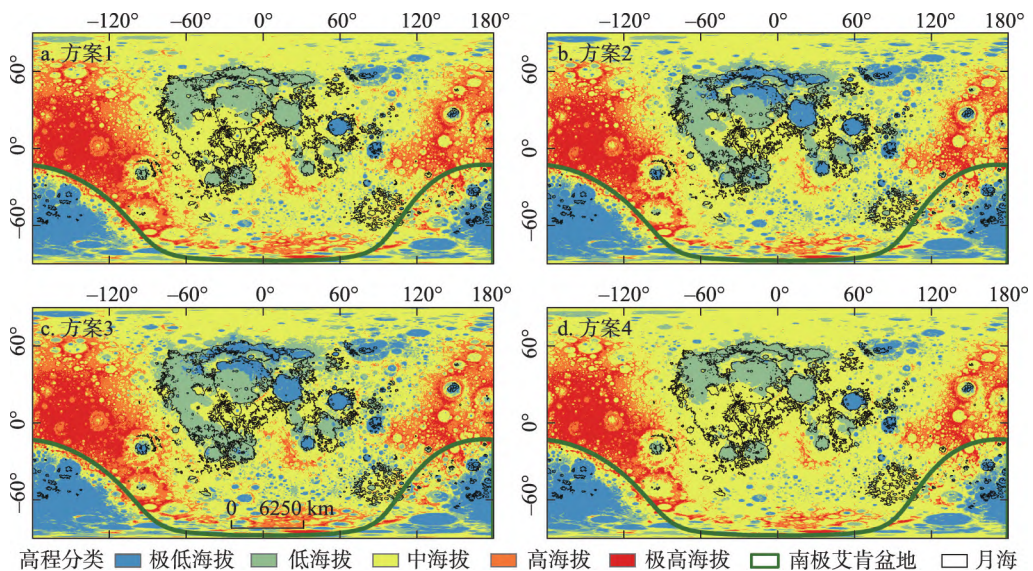


图9 月球高程分类方案对比

Fig. 9 Comparison of different elevation classification schemes

4.3.2 月表高程形貌分类结果 以-2500 m、-1500 m、1000 m、3000 m为特征值对全月进行分类,将月球表面分为极低海拔,低海拔,中海拔,高海拔和极高海拔5个地貌区域,其结果如图10所示。极低海拔地区主要分布在南极艾肯盆地和月海区域的北部。低海拔地区主要分布在月海区域和月球两极附近。中海拔地区集中在中纬度和高纬度地区,而极高海拔地区则主要位于中低纬度地区,尤其集中在西半球的月陆区域。月球高纬度集中分布极低海拔与低海拔区域,中低纬度地区各个高程类型均有分布;月球正面主要为极低海拔、低海拔与中海拔分布区域,月球背面则主要为高海拔与极高海拔区域(表9、图10)。

从月海、月陆等地质构造单元的高程分类结果来看,月海区域、撞击坑及撞击盆地区域的高程类别分布较为合理。约25%左右的月海区域为极低海拔,50%左右月海区域为低海拔,25%左右的月海区域为中海拔,高程类型的多样性及均衡性均满足标准。从

表9 月表高程分级结果统计表

Tab. 9 Statistics of lunar surface elevation grading

海拔(m)	≤ -2500	-2500~-1500	-1500~1000	1000~3000	>3000
类别	极低海拔	低海拔	中海拔	高海拔	极高海拔
比例(%)	14.92	18.20	45.91	13.63	7.33

撞击坑面积比例来看,直径大于10 km的撞击坑中,属于极低海拔的撞击坑约占全部撞击坑面积的40%,低海拔约占30%,中海拔约占20%,高程类型的多样性同样满足分类标准的要求。

从月貌高程分类的整体结果来看,分类方案满足地理意义及类型均衡性的要求。在分类结果的地理意义上,南极艾肯盆地内部及北半球高纬度月海区域基本属于极低海拔,而中低纬度月海区域基本属于低海拔,二者都对区分月海与周边区域起到一定作用。此外,中海拔与高海拔所采用的高程1000 m分界线也与南极艾肯盆地的椭圆拟合边界线基本吻合。因此,4个高程分级标准中,-2500 m、-1500 m以及1000 m都具有较好的地理意义。从各高程级别类型所占比例来看,中海拔区域所占范围最大,约占全月范围的45.91%;高海拔区域次之;极高海拔区域所占范围最小,约占全月范围的7.33%(表9)。尽管中海拔地区所占比例最多,但由于统计单元及投影变形的差异,中海拔地区实际所占比例可能较统计结果偏少。高海拔区域及极高海拔区由于处于中低纬度区域,受变形影响较小,因此实际所占比例可能较统计结果偏多。从整体的比例来看,自中海拔向两侧,高程级别所占范围逐步减小,且最小比例约占全月10%左右,基本满足分类标准中比例范围的要求。

高程分级结果不仅能够反映月陆、月海、撞击坑、撞击盆地的形貌特征,也在一定程度上反映月球三大地体的划分结果^[24]。多光谱等数据显示,月壳并不是一个简单的全月统一的结构,从物质化学信息来看,全月可以分为风暴洋克里普地体、长石高地地体以及南极艾肯地体3个区域^[24]。物质的分布特点与月貌形态都受控于内外动力的作用,因而两者会在一定程度上展现出相同的特征。从月球高程分级的结果来看,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(图10)。

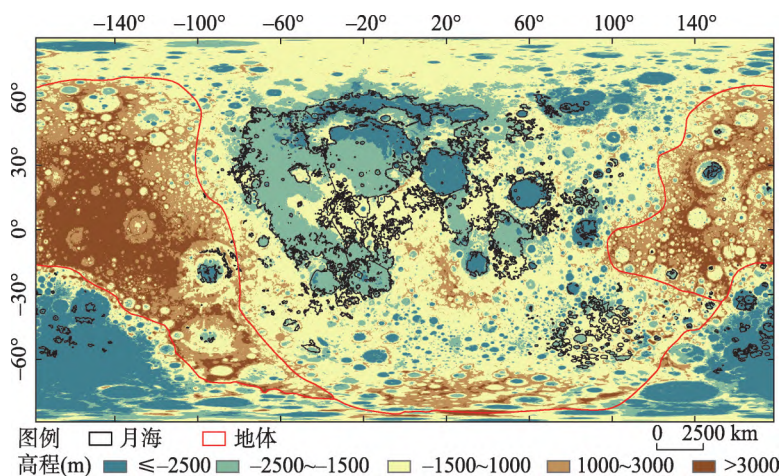


图10 月表高程分类分布

Fig. 10 Spatial distribution of lunar surface elevation grading

5 结论

本文通过分析月表各区域高程分布特征,对以高程为分类指标的月球地貌分类方案做以探讨,结论为:① -2000 m及-1500 m等高线与月海边界的吻合程度较高,月海与月陆分界高程主要分布在-1500 m左右;② -1500 m及3000 m等高线能够较好的区分撞

击坑并突出月陆高地地区部分撞击坑的边界；③ 南极艾肯盆地边界高程主要集中在1000~2000 m左右；④ 月球高程分类以-2500 m、-1500 m、1000 m、3000 m为指标，分为极低海拔、低海拔、中海拔、高海拔和极高海拔5种类型。月球高纬度主要为极低海拔与低海拔分布区，中低纬度地区各类高程类型均有分布；月球正面主要为极低海拔、低海拔与中海拔分布区，月球背面则为高海拔与极高海拔区域。

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] Liu Jianzhong, Ouyang Ziyuan, Li Chunlai, et al. China national moon exploration progress (2001-2010). *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2013, 32(5): 544-551. [刘建忠, 欧阳自远, 李春来, 等. 中国月球探测进展(2001—2010年). *矿物岩石地球化学通报*, 2013, 32(5): 544-551.]
- [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, 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.]
- [5] 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, 刘楠漪, 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.]
- [6] Moore P. Mapping and naming the moon: A history of lunar cartography and nomenclature. *Endeavour*, 1999, 23(4): 188-189.
- [7] Wang Jiao, Cheng Weiming, Zhou Chenghu. A global inventory of lunar craters: Identification, classification, and distribution. *Progress in Geography*, 2015, 34(3): 330-339. [王娇, 程维明, 周成虎. 全月球撞击坑识别、分类及空间分布. *地理科学进展*, 2015, 34(3): 330-339.]
- [8] Stoffler D. Cratering history and lunar chronology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 2006, 60(1): 519-596.
- [9] He Shujun, Chen Jianping, Li Ke, et al. The morphological classification and distribution characteristics of the craters in the LQ-4 Area. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 83-89. [何姝珺, 陈建平, 李珂, 等. 月表典型区撞击坑形态分类及分布特征. *地学前缘*, 2012, 19(6): 83-89.]
- [10] 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.
- [11] 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.]
- [12] Spudis P D, Martin D J P, Kramer G. Geology and composition of the Orientale Basin impact melt sheet. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2014, 119(1): 19-29.
- [13] Krüger T, van der Bogert C H, Hiesinger H. Geomorphologic mapping of the lunar crater Tycho and its impact melt deposits. *Icarus*, 2016, 273: 164-181.
- [14] Cheng Weiming, Zhou Chenghu. Methodology on hierarchical classification of multi-scale digital geomorphology. *Progress in Geography*, 2014, 33(1): 23-33. [程维明, 周成虎. 多尺度数字地貌等级分类方法. *地理科学进展*, 2014, 33(1): 23-33.]
- [15] Zhou Chenghu, Cheng Weiming, Qian Jinkai, et al. Research on the classification system of digital land geomorphology of 1:1000000 in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 707-724. [周成虎, 程维明, 钱金凯, 等. 中国陆地1:100万数字地貌分类体系研究. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 707-724.]
- [16] Su Shiyu, Li Juzhang, Su Yingping, et al. Problems in designing 1:1000000 geomorphologic map of China. *Acta Geographica Sinica*, 1982, 37(1): 8-16. [苏时雨, 李钜章, 苏映平, 等. 中国1:100万地貌图设计中若干问题的探讨. *地理学报*, 1982, 37(1): 8-16.]
- [17] Cheng W M, Zhou C H, Chai H X, et al. Research and compilation of the Geomorphologic Atlas of the People's Republic of China (1:1000000). *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(1): 89-100.
- [18] Su Shiyu, Li Juzhang. *Geomorphologic Mapping*. Beijing: The Mapping Publishing Company, 1999. [苏时雨, 李钜章. *地貌*

制图. 北京: 测绘出版社, 1999.]

- [19] Cheng Weiming, Zhou Chenghu, Chai Huixia, et al. Quantitative extraction and analysis of basic morphological types of land geomorphology in China. *Journal of Geo-information Science*, 2009, 11(6): 725-736. [程维明, 周成虎, 柴慧霞, 等. 中国陆地地貌基本形态类型定量提取与分析. *地球信息科学学报*, 2009, 11(6): 725-736.]
- [20] 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): L18204. DOI: 10.1029/2010GL043751.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] Guo D J, Liu J Z, Zhang F Q, et al. A lunar time scale from geodynamic evolution perspective. *The Woodlands: Lunar & Planetary Science Conference*, 2016.
- [24] Jolliff B L, Gillis J J, Haskin L A, et al. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E2): 4197-4216.

Distribution characteristics and classification schemes of lunar surface elevation

LIU Qiangyi^{1,2}, CHENG Weiming^{1,2,3}, YAN Guangjian⁴, WANG Ruibo¹, LIU Jianzhong^{2,3,5}

(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. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, CAS, Guiyang 550002, China)

Abstract: The moon is the only natural satellite of the earth and the main celestial body in deep space exploration at current stage. The study on lunar surface morphology can not only help understand the structure and composition of the moon but also provide direct and reliable evidence on the origin and evolution history of the moon. Compared with the geomorphic classification of the earth, research on lunar morphology started late and developed slowly. Although researchers have been concentrated in lunar morphology study, there is still lack of research with regards to the distribution characteristics of morphological indicators and their combination with lunar morphological classification schemes. Based on the characteristic analysis of surface elevation in lunar mare, we found that the division criteria of -2500 m and -1500 m can better distinguish the inner region of the lunar mare and the crater rim crests and highland. The study on the impact craters shows that a contour line of 3000 m can better highlight the boundary of some impact craters in the highland. Besides, the boundary of South Pole Aitken is mostly situated at an elevation of about 1000 m. Thus, four thresholds of -2500 m, -1500 m, 1000 m and 3000 m are proposed as the classification criteria in lunar morphological classification scheme, and the lunar surface is divided into five geomorphic types: extremely low altitude, low altitude, medium altitude, high altitude and extremely high altitude.

Keywords: lunar geomorphological classification schemes; lunar surface elevation; lunar geomorphic types; distribution characteristics; classification criteria