

基于“嫦娥一号”的月表形貌特征分析与自动提取

周增坡^{①②}, 程维明^{①*}, 周成虎^①, 万丛^{①②}, 曹玉尧^{①③}

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 中国科学院研究生院, 北京 100049;

③ 东北师范大学城市与环境科学学院, 长春 130024

* 联系人, E-mail: chengwm@lreis.ac.cn

2010-10-09 收稿, 2010-11-22 接受

中国科学院地理科学与资源研究所自主创新项目(201001005)、国家自然科学基金面上项目(40871177)和国家自然科学基金重点项目(40830529)资助

摘要 利用“嫦娥一号”CCD 相机获得的遥感影像及其经三线阵数字摄影测量处理后的 DEM 数据(空间分辨率为 500 m)进行了月表形貌特征分析. 结果表明: 月球的平均高程为-742 m, 最大高程点和最小高程点均位于月球的背面, 其中前者位于 Engel'gardt 撞击坑东缘, 后者位于 Minkowski 撞击坑的次级撞击坑内; 月球表面相对平坦, 大部分坡度在 15°以下, 占月球总面积的 90%, 月球高地的坡度值变化较大, 平均坡度大于 7°, 月海坡度变化较小, 多数在 3°以下; 月表起伏度计算的最佳统计窗口为 16 km², 大部分区域起伏度在 200 m 以下, 而起伏度大于 2000 m 的大起伏山地主要分布在撞击坑周围的环形山区域; 基于高程、坡度、起伏度及影像灰度值的归一化处理数据, 利用最大似然法进行月海和月球高地的自动提取, 其结果与美国地质调查局出版的地质图进行精度评价, 获得 Kappa 系数为 0.78, 该方法可以较好地提取月球形态特征的分析.

关键词

月表形貌
特征分析
月海与月球高地
自动提取
嫦娥一号

月球是距离地球最近的天体, 长期以来备受世人关注^[1]. 17 世纪伽利略首次将望远镜对准月球, 揭开了人类月球探测的序幕^[2]. 在 20 世纪 60~70 年代, 前苏联和美国利用 Luna, Apollo, Lunar Orbiter 等航天器和地基望远镜获得的数据和影像编制和出版了一系列月球地图集, 覆盖了月球的正面和背面, 成为月球科学研究的重要参考著作^[3~5]. 经过 1976 年到 20 世纪 90 年代初的短暂探月宁静期, 美国于 1994 和 1998 年分别发射了 Clementine 探测器和 Lunar Reconnaissance Orbiter 系列探测器, 获得了大量的影像数据和测高数据, 并研究和编制了可反映月球地形、地貌及地质信息的一系列专题要素图, 包括月球基本地图、月球彩色地形图、地貌晕渲图、月球地名图和月球基础地图等^[6,7]. 21 世纪伊始, 月球探测进

入了又一个活跃期, 各航天大国(组织)开始了以重返月球为目标的新的探月行动, 已经发射的月球探测器包括欧盟的 SMART-1、日本的 SELENE(Kaguya)、中国的“嫦娥一号”(CE-1)、“嫦娥二号”(CE-2)和印度的 Chandrayaan-1, 正在研制中的探测器包括中国的“嫦娥”系列、日本的 SELENE2、俄罗斯的 Luna Glob、英国的 MoonLITE 和 Google 资助的 Google Lunar X-Prize 等. 这些探月计划在测量数据的覆盖范围和分辨率等方面均有较大提高^[8], 为学者们深入研究撞击坑的空间分异规律、线性构造和环形构造的分布特征及形成机理、月球地貌格局及月球的演化等提供了可靠的数据基础^[9~14].

月表形貌特征是内外营力长期综合作用的结果, 直观反映了月球地表的高低起伏及空间分布特征^[15],

英文引用格式: Zhou Z P, Cheng W M, Zhou C H, et al. Characteristic analysis of the lunar surface and automatically extracting of the lunar morphology based on CE-1 (in Chinese). Chinese Sci Bull (Chinese Ver), 2011, 56: 18–26, doi: 10.1360/972010-1375

有助于进一步解析月球的内部结构及其演化历史^[16]。月球地形和地貌单元的划分、月球地貌图的研究与编制是绕月探测工程遴选的4项科学目标之一^[17,18]。李春来等人^[19,20]利用搭载在CE-1上的激光高度计获得的912万个探测数据,制作了空间分辨率为3 km的全月球DEM模型,月表地形地貌特征反映明显,地形细节表达层次分明,清晰可辨。分析可得,CE-1的激光高度计DEM模型在精度和分辨率上明显优于美国ULCN2005,与日本SELENE激光高度计DEM模型相当。李春来等人^[8,19]对“嫦娥一号”获取的CCD图像数据进行了定位精度分析和光度校正,改善了全球图像的一致性,并制作了覆盖全月球的1:2500000比例尺影像图,是目前覆盖最全、图像质量最好、定位精度最高的全月球影像图。

利用CE-1的数据进行月表形貌特征分析及月球地貌信息提取已有初步成果。甘甫平等人^[21]利用激光高度计(LAM)的数据所生成的DEM分析了月表高程、坡度、坡向等地形特征;李春来等人^[8]制作了地貌晕渲图,并分析了月表极值点区域的地形特征;平劲松等人^[22]对比CE-1的DEM数据和重力探测的历史结果,在月球正面风暴洋西部区域新认证了一个直径约300 km、高度约2 km的火山——暂时称为“玉兔”山,还修正了“玉兔”山以北300 km左右的“桂树”火山三维地形。这些研究和发现对揭示月表的形貌特征及演化过程有一定的参考价值。我国探月工程所获取数据精度不断提高,为开展月球地形地貌的特征及空间分异规律、月球的演化过程和形成机制等方面的研究提供了有力的数据支撑。鉴于此,本文基于“嫦娥一号”CCD相机获得的遥感影像及其经三线阵数字摄影测量处理后获得的DEM数据(空间分辨率为500 m),深入分析月表形貌特征,探讨月球地貌信息自动提取方法,这些研究将为全月球数字地貌图的编制提供技术支撑,为我国探月、登月及未来月球资源的利用提供依据。

1 数据源

本文所用的DEM和影像数据均来自于CE-1的三线阵CCD推扫式相机,该相机能获得探测目标的前视、正视和后视影像阵列,每行线阵的像元数为512列,前视、正视和后视相邻之间视角差为 16.7° 。CE-1立体相机的图像数据的像素空间分辨率约为120 m,幅宽约为60 km^[8]。由CCD立体相机获取的

影像数据,经三线阵数字摄影测量处理后,可以得到全月球的三维地形数据。该DEM的高程基准采用半径为1737.4 km的正球体表面,空间分辨率为500 m,平面中误差192 m,高程中误差120 m^[23]。

20世纪70年代,美国编制和出版了覆盖全月球的1:5000000月球地质图,它是基于地基观测、无人探测器和轨道者四号的数据编制而成的,是美国地质调查局月球制图项目成果的总结,它将月球表面物质大致分为四类,即月海暗色物质、环盆物质、月陆平原、高原及山地物质、环形山物质等,这些成果对月球形貌特征分类和自动提取的结果评价等具有重要的参考价值^[24]。

数字栅格地图的投影变换是一种非单值变换,在数据投影的过程中需要进行插值,所以投影不同所计算的均值不同^[25],为真实反映月表的实际情况,在均值计算过程中,应采用等积投影。本文在计算均值中采用的投影为摩尔维特投影,该投影是一种经线为椭圆曲线的正轴等积伪圆柱投影,投影的中央经线为直线,离中央经线 $\pm 90^\circ$ 的经线为一个正圆,圆的面积等于月球面积的一半,其余的经线为椭圆曲线^[26]。

2 月表形貌特征分析

地表形态是地貌最直观的表现形式。自地貌学萌芽起,地貌学家利用高矮陡缓等指标来描述地貌实体的定性属性信息,用相对位置等描述地貌实体的空间位置信息^[27,28]。下面利用地统计学及空间分析方法对月表高程的数值及直方图特征、月表的坡度和坡向、地势起伏特征等逐项进行分析。

2.1 高程分析

使用Global Mapper 8.3和月球表面的DEM数据生成月球地貌晕渲图,清晰地反映了月球表面的高低起伏特征及月球正面和背面的显著差异(图1)。其中,中部区域为月海带,包括风暴洋、雨海、澄海、危海和静海等月海盆地,它们大多形成于风暴洋纪^[21];位于南极的艾肯盆地(South Pole-Aitken)是目前确认的太阳系中最大、最深的撞击盆地^[29]。

(i) 月表高程的极值与均值。根据文中所采用的数据进行统计,月球的最高点和最低点均位于月球的背面,最高点的经纬度为 $(5^\circ 26' N, 158^\circ 34' W)$,高程为+10611 m,位于Engel'gardt撞击坑东缘;最低点

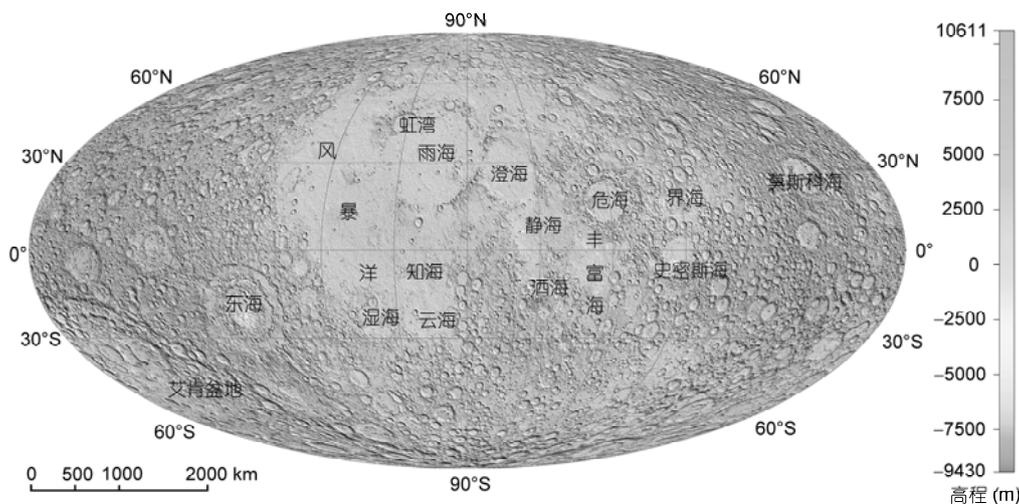


图1 基于“嫦娥一号”获得DEM制作的月球地貌晕渲图

的经纬度为(56°9'S, 146°02'W, 高程为-9430 m), 位于Minkowski撞击坑的次级撞击坑内。由于数据的来源不同, 所计算出的月表最高点和最低点的高程和位置均存在差异(表1)。从表1可以看出, 本文所采用数据的空间分辨率有明显改善, 空间分辨率为500 m, 数据精度更高。文中最高点的位置, 与李春来和平劲松等人所计算的结果和日本SELENE的结果差别不大, 但与Clementine的结果差别较大^[8,16,19,20]。文中最低点的位置, 虽然也位于南极艾肯盆地内, 但与表1所列的其他4种结果存在明显的差异, 这种差异表现在位置的不一致性和最小值的差异。由于文中所使用的数据空间分辨率更高, 文中的位置极有可能更接近(或者正好是)月表真实的最低点位置。月球表面高低起伏, 地形特征明显。经测算, 月表高程平均值为-742 m, 最大值为10611 m, 最小值为-9430 m; 月海盆地为玄武岩质熔岩所覆盖, 地势比月球高地要低得多, 平均海拔一般低于月球水准面约1000~

3000 m, 其中最低的是雨海东南部, 其最深处比月球平均水准面低6000多米^[1]; 月球高地的主要岩石类型有斜长石和富镁的结晶套岩, 地势较高, 一般高出月球水准面约2000~3000 m, 月表高程的均值和极值如表2所示。

(ii) 月表高程直方图分析。直方图是用一系列高度不等的纵向条纹或线段表示数据的分布情况, 可以直观反映统计要素的分布特征(图2)。月球高程直方图呈偏正态分布, 直方图左侧较陡, 斜率较大; 右侧较缓, 尾部较长。高程直方图频数的斜率为频数的变化率(图3, 为便于统计, 采用高程100 m间隔)。图3中的斜率在-4000~-1400 m区间内震荡较大, 其中在-4000~-2400 m范围呈震荡上升趋势, 原因可能为月球正面月海高程的累积频率随着高程的升高而急剧增加; 而-2400~-1400 m的风暴洋区域, 随着高程的升高, 累积频率急剧下降, 开始由月海向月球高地过渡。根据直方图斜率的差异, 可以将月表按照高

表1 月表最高点、最低点、最大高程差的测量结果比较

数据源	月表最高点			月表最低点			最大高差 (km)	空间分 辨率
	经度	纬度	高程(km)	经度	纬度	高程(km)		
CE-1(本文)	158.565°W	5.433°N	10.611	146.033°W	56.15°S	-9.43	20.041	0.5 km
CE-1(国家天文台) ^[19]	158.656°W	5.441°N	10.629	172.413°W	70.368°S	-9.178	19.807	3 km
SELENE(日本) ^[20,30]	158.64°W	5.44°N	10.75	172.58°W	70.43°S	-9.06	19.81	<0.5°
CE-1(上海天文台) ^[16]	158.625°W	5.375°N	10.44	148.625°W	61.375°S	-8.63	19.07	0.25°
ULCN2005 DEM ^[31]	160.656°W	3.344°N	7.939	169.719°W	69.781°S	-8.910	16.849	<2 km

表 2 月表高程的均值和极值

区域	平均高程(m)	最大高程(m)	最小高程(m)	最大高差(m)
整个月球	-742	10611	-9430	20041
月球正面	-1628	7633	-7658	15291
月球背面	144	10611	-9430	20041
南半球	-727	9659	-9430	19089
北半球	-757	10611	-8505	19116

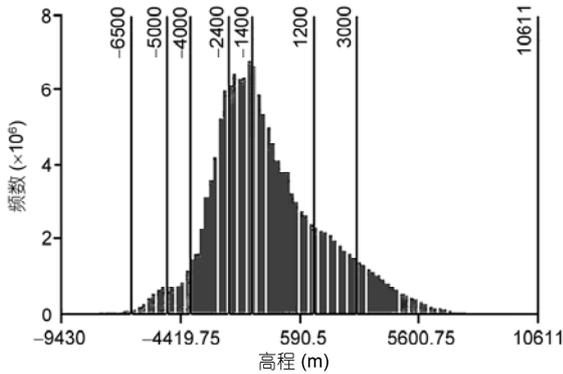


图 2 月球高程直方图

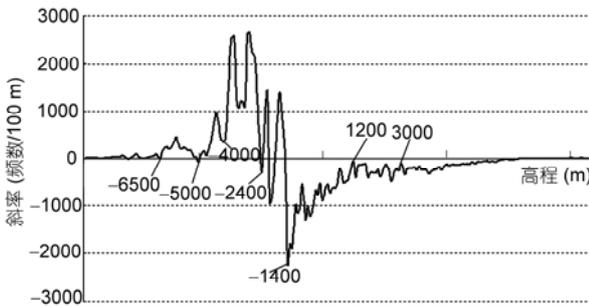


图 3 月表高程直方图的斜

程分为<-6500 m, -6500~-5000 m, -5000~-4000 m, -4000~-2400 m, -2400~-1400 m, -1400~1200 m, 1200~3000 m 和>3000 m 共 8 个高程带, 其中海拔在 -6500 m 以下的区域主要为南极艾肯盆地内的大型撞击坑; 海拔在-6500~-4000 m 的区域主要为艾肯盆地内的平原; 海拔在-4000~-2400 m 的区域主要为月海区域, 但风暴洋的海拔稍高, 并不落在此高程带内, 风暴洋的高程主要在-2400~-1400 m 高程带内, 海拔在 1200 m 以上的区域主要为月球高地, 且明显集中在月球背面的赤道两侧, 其中海拔在 3000 m 以上的区域, 所占比例较小, 主要分布在 Korolov 撞击坑周围. 在月海和月球高地之间有一过渡带, 海拔在 -1400~1200 m 之间. 若以面积对各高程带进行统计, 月球的高程主要集中在-2400~1200 m 的高程范围,

约占月球总面积的 56.6%.

月球高程基准为半径 1737.4 km 的正球体表面^[8,19], 若以此面作为高程分界面, 大于 0 m 的区域与小于 0 m 的区域所占的面积分别为 69%和 31%. 若进行削高填低, 全月球将下降约 700 m.

2.2 坡度与坡向分析

地貌面的坡度和坡向是局部的地表坡面在空间的倾斜程度和倾斜方向. 月表坡度的大小直接影响着陆场的选择和月球车线路的布设; 坡向则决定了地表接收和重新分配太阳辐射量的状况^[32], 进而影响作为核聚变燃料 ³He 的丰度及分布情况^[33]. 月球水平地面占月球的总面积在 1%以下(在坡向计算中值为-1 的栅格), 所占比例较小, 而其他 8 个方向所占的比例相对均衡, 在 10%~15%之间, 其中坡向朝南和朝北的比例稍占优势, 在 14%以上, 其他 6 个方向都在 11%左右. 从南北或东西半球的对比来看, 各个坡向所占的比例相对均衡, 整体趋势与全月球表现出的规律类似.

月球表面相对平坦, 大部分坡度在 15°以下, 约占月球总面积的 90%, 尤其是坡度在 2°以下的区域, 占到月球表面的 35.9%, 这些区域主要分布在月球正面的月海, 从一个侧面反映了月海由岩浆洋充填的特性; 坡度大于 15°的区域在月面所占的比例较小, 主要位于撞击坑的坑底与坑唇的过渡区域. 月球高地的坡度变化较大, 平均坡度大于 7°. 撞击坑是月球表面最常见的地貌单元, 尤其是那些具有辐射纹的撞击坑更引人注目. 撞击坑最典型的特征是圆形凹坑构造, 坑底平坦, 坡度在 3°以下, 而周围的环形山坡度较大, 坡度可达 15°以上. 不同坡度在月表所占的比例如表 3 所示.

2.3 起伏度分析

地形起伏度是指在所指定的分析区域内所有栅格中最大高程与最小高程的差, 能够直观地反映地

表3 不同坡度在月表所占的比例

坡度	>2°	2°~5°	5°~7°	7°~15°	15°~25°	25°~35°	>35°
比例(%)	35.9	23.4	10.0	20.5	7.8	2.0	0.4
地面特征	平坦平原	倾斜或起伏平原		平缓山地	缓山地	陡山地	极陡山地

形起伏特征. 起伏度分析窗口的确定是提取算法的核心步骤和决定区域地形起伏度信息提取效果与有效性的关键^[34]. 在广泛采样的基础上, 统计所有样点的分析窗口和起伏高度. 分析窗口不同, 所对应的起伏高度不同, 一般来讲, 分析窗口越大, 计算所得的起伏度越大, 但是在分析窗口有规律变化的情况下, 起伏度的变化速率并不一致, 取起伏度变化最剧烈的点作为分析窗口的“拐点”. 然后统计“拐点”所对应的分析窗口大小, 出现频率最高的分析窗口即可作为起伏度计算的最佳窗口^[35,36]. 起伏度的计算可分为如下三步.

(1) 样本采集. 根据研究区的特点和需要, 可以采用不同的采样方法, 最常用的采样方法是规则采样、随机采样和分层采样.

(2) 确定拐点. 在样本集 (i, j) 中, 样本点 i 在 j 窗口处的起伏度变化量 dH_{ij} 为 $dH_{ij} = \Delta H_{ij} - \Delta H_{i(j-1)}$, 比较 i 点所有 dH_{ij} , 取最大 dH_{ij} 所对应的窗口 j 为拐点, 记为 W_i .

(3) 频率统计. 统计 W_i 在样本中出现的频率, 出现频率最高的那个样本即为最佳统计窗口.

按照上述步骤, 首先使用 Hawth's Analysis Tools for ArcGIS9 工具对全月球进行规则采样, 采样间距为 100 km. 剔除位于 DEM 边缘的采样点, 共获得 3666 个采样点. 对每一样点取 15 组窗口计算月表地势起伏度数据数值, 窗口大小从 6×6 开始, 步长 2; 然后, 统计“拐点”在样本中出现的频率, 统计结果如表 4 所示.

表4 拐点与窗口统计表

窗口大小	6~8	8~10	10~12	12~14	14~16	16~18	18~20
频率(%)	20.2	10.7	9.1	6.5	6.5	6.5	5.1
窗口大小	20~22	22~24	24~26	26~28	28~30	30~32	32~34
频率(%)	4.9	5.4	4.4	5.1	4.7	5.1	5.9

表5 不同起伏度分级所占的比例

起伏度(m)	<200	200~500	500~1000	1000~2500	>2500
比例(%)	57.3	30.8	10.3	1.5	0.1

由此可知, “拐点”出现频率最高的是窗口大小由 6×6 过渡到 8×8, 因此, 月球起伏度的最佳分析窗口为 8×8, 按照分辨率为 500 m 计算, 最佳统计窗口为 16 km².

月球的地貌类型主要为月海、月球高地, 在这些地貌类型上还广布规模不等的撞击坑. 参照地球起伏度的分类标准^[28], 将月球的地势起伏度划分为 5 个等级: 200 m 以下主要为平原和台地, 广泛分布在月海和撞击坑的底部, 尤其在月海最为集中; 200~500 m 为小起伏山地和丘陵; 500~1000 m 为中起伏山地; 1000~2500 m 为极大起伏山地. 不同起伏度在月表所占的比例如表 5 所示.

从表 5 中可以看出, 月球的平原和台地所占比重较大, 达月球表面积的一半以上, 这些平原和台地除了分布在月海外, 在大型和巨型撞击坑的底部也分布广泛. 在起伏度大于 200 m 的丘陵和山地中, 又以起伏度为 200~500 m 的小起伏山地和丘陵为主, 占月球表面的 30.8%, 这些小起伏山和丘陵主要分布在月球高地和由撞击坑底向梯级坑壁的过渡地带; 而对于起伏度大于 500 m 的山地, 主要为撞击坑周围的环形山.

3 月表地貌的自动提取

月球地貌是指月球表面的起伏形态, 是各种形态特征、成因类型、分布格局及其发育过程的综合. 月球表面是一个连续的整体, 并因形态特征、营力类型与作用性质、物质组成与形成年代等方面的差异而呈现出显著的区域分异, 形成一系列具有不同特征

的月海和月球高地(简称月陆),它们构成了月表地貌体系的控制框架,其提取的准确性直接关系到更高级别月球地貌信息提取的正确与否,具有统领全局的重要地位.月海以充填玄武岩为特征,从遥感影像上看,月海的反照率较小,颜色较暗;月球高地以斜长石为主,反照率较大,颜色明亮.在月球DEM上,月海和月球高地也差异明显,月海的海拔较低,地势平坦,坡度较小,撞击坑密度也较小;月球高地的海拔较高,撞击坑密度较大,特别是直径较大的撞击坑,几乎全部分布在月球高地.

3.1 实验样区的选择

本文以月球标准分幅中的 H010 为例(位于 $0^{\circ}\sim 18^{\circ}\text{W}$, $0^{\circ}\sim 14^{\circ}\text{S}$),借助理信息系统空间分析技术和分类方法,进行月海和月球高地宏观月球地貌单元自动提取方法的初步探讨.实验样区面积约为 $23\times 10^4\text{ km}^2$,最高海拔 1793 m,最低-4203 m,平均海拔高度为-1612 m,区内含有月海和月球高地两大主要地貌类型.研究中用到的基本数据为 CE-1 的 CCD 影像(空间分辨率为 120 m)和其经三线阵数字摄影测量处理后得到的 DEM 数据(空间分辨率为 500 m).

3.2 指标体系的建立及分类方法

地形指标的选择依赖于分类的目的^[37].为了有效识别月海和月球高地,在分类指标选取中除高程数据外,还选择了由高程衍生的坡度、起伏度和影像数据等指标.这 4 个指标从不同侧面刻画了月海和月球高地地形及物质反照率的差异,但是这些数据的量纲差异显著,高程和起伏度的单位为米、坡度的单位为度,而影像数据则为无量纲的灰度值.为消除量纲的差异,应采用归一化处理,使所有的数据均在 0~1 之间.在这 4 个指标中,高程、坡度和起伏度均来自于 DEM 数据,指标之间存在一定的相关性,使用主成分分析的方法,把多指标转化为少数几个综合的指标,从而达到降维和消除相关性的目的.在 DEM 和遥感影像上,月海和月球高地差异显著,它们对于分类具有同等重要的作用.因此,对于权重的设置,影像数据为 3,高程、坡度和起伏度各为 1.

在遥感影像分类的方法中,最常用的是 K-Means 和 ISODATA 算法,但是这两种算法的效率不高,且在分类的完整性方面存在缺陷^[38].为克服这些缺点,本文尝试使用最大似然法对研究区进行月海和月球

高地的划分.最大似然法分类(MLC)是根据概率判别函数的贝叶斯准则对遥感图像进行识别分类.从数学的角度来说,最大似然法考虑到了判别风险的问题,是至今发展出的一种行之有效的分类方法.月海和月球高地自动提取的流程如图 4 所示.

3.3 提取结果

按照图 4 所示的数据流程,信息提取主要包括三个步骤:数据准备、数据分类和分类后处理.在起伏度计算的过程中,使用的统计窗口为 16 km^2 .在数据准备完成以后,就可以使用最大似然法将影像、高程、坡度和起伏度数据分为 10 类,这 10 个类别可作为进一步合并月海和月球高地的依据.经计算所得的分类树如图 5 所示.

分类树图能很好地描述数据群与数据群之间的关系,是数据分析过程中一种非常直观的表达方式.从图 5 可以看出,最大似然法将研究区分成三大类,参照月球地貌的实地情况,这三类分别为:月海={1, 3};月球高地={6, 7, 8, 9, 10};月海与月球高地过渡区={2, 4, 5}.由于本文仅提取月海和月球高地的界限,根据研究区的实际情况可以将{2}合并到月海类

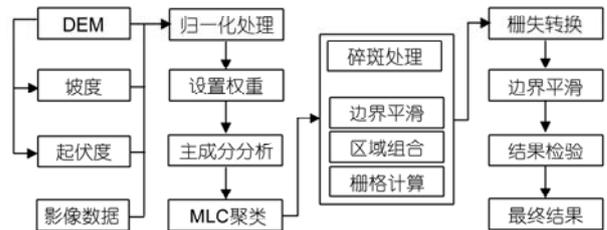


图 4 月海和月球高地自动提取的一般流程

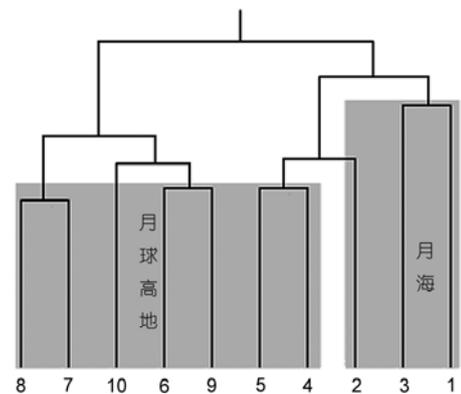


图 5 MLC 建立的研究区分类树

型, {4, 5}合并到月球高地类型, 这样月海={1, 2, 3}; 月球高地={4, 5, 6, 7, 8, 9, 10}. 按照此分类方案, 使用 Reclassify 将最大似然法的分类结果重新聚合为两类, 并用-1 表示月海, 1 表示月球高地, 结果命名为 MLC_Reclassify2.

经过重分类, 自动提取月海和月球高地的轮廓已基本形成, 但因栅格数据本身或其他原因, 结果难免会出现一些破碎图斑, 需要对其进行处理. 首先使用 Boundary Clean 工具对类型边界进行清理, 使边界平滑. 然后, 使用 Region Group 工具统计分类结果中每一栅格图斑所包含的栅格数, 统计结果命名为 MLC_RegionGroup, 在统计结果的属性表中包含有一 COUNT 字段, 该字段记录了栅格图斑所包含的像元数. 对于包含像元较少的碎屑图斑, 使其与之相邻的大图斑进行融合, 由于月海和月球高地的值分别为-1 和 1, 只需对栅格数小于一定数目的图斑属性值取反, 即可将其与邻近的大图斑进行融合, 运算式为 $CON([MLC_RegionGroup].COUNT < 100, MLC_Reclassify2 \times (-1), MLC_Reclassify2)$. 最后进一步利用 ArcGIS 中的 Eliminate 命令, 将栅格矢量转化过程中可能产生的面积过小的多边形与相邻的大面积多边形进行融合, 完成碎斑的自动处理.

由栅格数据转换得到的矢量边界线一般均存在非圆滑的折线, 虽然多数区域效果较好, 但对制图而言, 需要对其进行平滑处理. 在 ArcGIS 中可以使用 Smooth Polygon 工具中的 Peak 算法进行处理, 结果较理想. 经过上述步骤后, 还要根据研究区的实际情况和专家知识进行边界的微调, 使之满足制图的要求, 月海和月球高地的自动提取结果如图 6 所示.

3.4 结果评价

美国编制和出版的全月球地质图, 因数据基础不统一, 图斑的定位精度存在一定的偏差, 根据 CE-1 获得的 CCD 影像数据和其经三线阵数字摄影测量处理后得到的 DEM 数据对该地质图进行人工修正后, 消除了偏差, 可作为精度评价的标准.

在进行精度评价前, 先将其地质图所划分的 4 类物质归为两大类, 即月海暗色物质和月陆物质; 然后切割研究区的地质图数据, 利用 Hawth's Analysis Tools for ArcGIS9 工具随机产生 500 个抽样点, 将本次提取结果与切割的地质数据进行一致性分析, 经计算获得其 Kappa 系数为 0.78, 表明一致性较好. 比较可得, 在月海与月球高地的过渡地带(即地质图的环盆地区域), 由于撞击物质的覆盖, 类型界线模

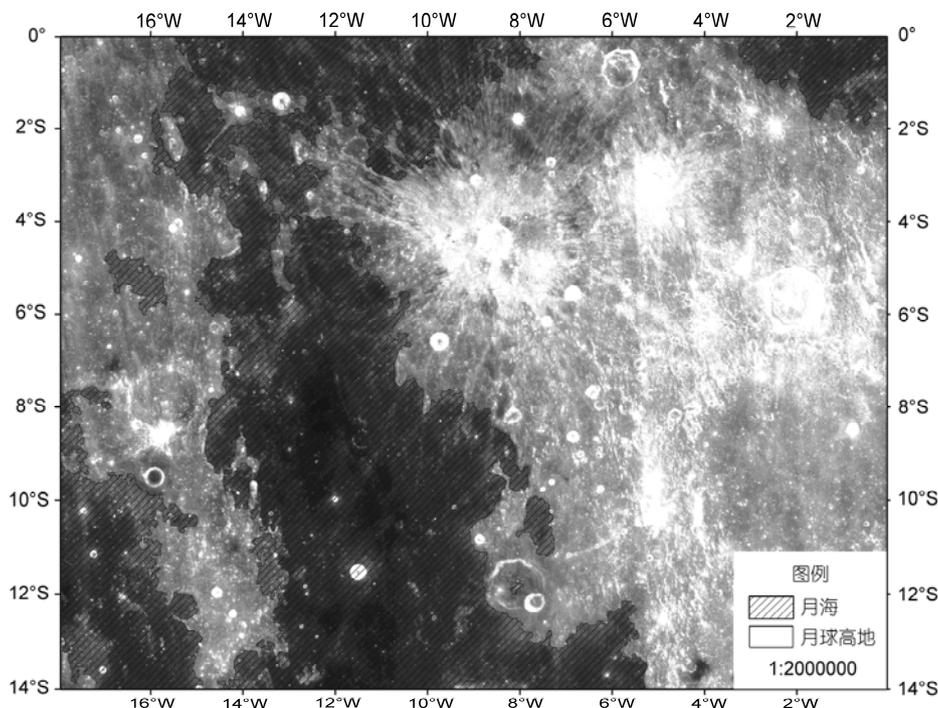


图 6 月海和月球高地的自动提取结果

糊,使提取结果存在一定的偏差.总体而言,基于最大似然法自动提取的结果与人工解译的结果规律基本一致,该方法可以进行月表形貌特征的分析与提取.

4 结论

通过对 CE-1 获得的 CCD 影像数据和其经过三线阵数字摄影测量处理后得到的 DEM 数据的月表形貌特征分析与自动提取,主要形成如下结论.

(1) 月球的最大高程点和最低高程点均位于月球的背面,最大高程点位于 Engel'gardt 撞击坑东缘;最低高程点位于 Minkowski 撞击坑的次级撞击坑,月球的平均高程约为-742 m;基于月球高程直方图和斜率变化曲线,得出月球高程变化的拐点及划分区间.

(2) 月球表面相对平坦,大部分坡度在 15°以下,占月球总面积的 90%.坡度值变换较大的地区主要分布在月球高地,平均坡度大于 7°;月海的坡度值变化较小,坡度在 3°以下,只是在月海的边缘处与月球高地呈明显过渡,坡度由小于 3°上升到 7°~10°.

(3) 基于邻域分析方法得出月球起伏度计算的最佳统计单元为 16 km².月表的起伏和缓,大部分区域起伏度在 200 m 以下,而起伏度大于 2000 m 的大起伏山地主要分布在撞击坑的坑沿区域.

(4) 对高程、坡度、起伏度和影像灰度值等进行归一化处理,使用最大似然法可以很好地进行月海和月球高地的自动提取,提取结果与美国地质调查局出版的全月球地质数据进行一致性分析,得到 Kappa 系数为 0.78.

随着“嫦娥”系列数据的不断成功获取,对月表形貌特征的分析 and 认识将会不断深入,这些都为月球地貌图的研究和编制提供了基础.基于嫦娥卫星获取的影像数据进行月表形貌特征的自动提取方法研究也需要继续深化,这样嫦娥卫星获取大量数据的信息才会快速地提取出来,为月球形貌特征、月球演化及月球资源利用等提供基础数据.总之,月球是熟悉又陌生的星球,还有很多未解的奥秘等待去探讨,文中所得到的结论将随着数据源和精度的不断提高以及认识的深入而继续得到深化.

致谢 感谢月球与深空探测科学应用中心提供 CE-1 数据.

参考文献

- 1 欧阳自远.月球科学概论.北京:中国宇航出版社,2005
- 2 宁晓刚,King B,张继贤.基于 Clementine 和 ULCN2005 的月球测图研究.测绘学报,2009,38:290-295
- 3 Akademia N, Barabashov, Nikolai P, et al. Atlas Obratnoi Storony Luny. Moskva: Izd-vo-Akademii Nauk SSSR, 1960
- 4 Lewis H A G. The Times Atlas of the Moon. London: Times Newspapers, 1969
- 5 Bowker D E, Hughes J K. Lunar Orbiter Photographic Atlas of the Moon. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1971
- 6 Rosiek M R, Kirk R, Howington-Kraus E. Color-coded topography and shaded relief maps of the lunar hemispheres. In: 33rd Lunar and Planetary Science Conference. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002
- 7 Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Topography of the moon from the Clementine lidar. J Geophys Res, 1997, 102: 1591-1611
- 8 李春来,刘建军,任鑫,等.嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图.中国科学:地球科学,2010,40:294-306
- 9 岳宗玉,刘建忠,吴淦国.应用面向对象分类方法对月球撞击坑进行自动识别.科学通报,2008,53:2089-2813
- 10 陈圣波,孟治国,崔腾飞,等.虹湾地区月球卫星遥感地质解析制图.中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40:1370-1379
- 11 Chabot N L, Hoppa G V, Strom R G. Analysis of lunar lineaments: Far side and polar mapping. Icarus, 2000, 147: 301-308
- 12 Morota T, Furumoto M. Asymmetrical distribution of rayed craters on the Moon. Earth Planet Sci Lett, 2003, 206: 315-323
- 13 Urbach E R, Stepinski T F. Automatic detection of sub-km craters in high resolution planetary images. Planet Space Sci, 2009, 57: 880-887
- 14 Hawke B R, Blewett D T, Lucey P G, et al. The origin of lunar crater rays. Icarus, 2004, 170: 1-16
- 15 法文哲.月球微波遥感的理论建模与参数反演.博士学位论文.上海:复旦大学信息科学学院,2008
- 16 平劲松,黄倩,鄢建国,等.基于嫦娥一号卫星激光测高观测的月球地形模型 CLTM-s01.中国科学 G 辑:物理学 力学 天文学,2008,38:1601-1612
- 17 欧阳自远,李春来,邹永廖,等.绕月探测工程的初步科学成果.中国科学:地球科学,2010:40:261-280
- 18 欧阳自远,李春来,邹永廖,等.月球探测的进展与我国的月球探测.中国科学基金,2003,4:193-197
- 19 李春来,任鑫,刘建军,等.嫦娥一号激光测距数据及全月球 DEM 模型.中国科学:地球科学,2010,40:281-293
- 20 河野宣之,刘庆会,平劲松,等.月球探测 SELENE 的科学成果.中国科学:物理学 力学 天文学,2010,40:1380-1386

- 21 甘甫平, 于艳梅, 闫柏琨. 月表地貌格局和物源特征的耦合性初步研究. 国土资源遥感, 2009, 4: 14–18
- 22 平劲松, 黄倩, 苏晓莉, 等. 嫦娥一号探测器发现月球正面“玉兔”火山. 科学通报, 2009, 54: 3166–3169
- 23 <http://baike.baidu.com/view/2847792.htm>
- 24 ftp://pdsimage2.wr.usgs.gov/pub/pigpen/moon/geology/I_0703/Metadata/i_0703_geology_metadata.htm
- 25 刘庆元, 孟俊贞. 双线性插值近似网格的栅格数据投影变换. 测绘工程, 2009, 18: 15–18
- 26 吕晓华, 邓术军, 牛星光. 月球制图的投影选择与设计. 测绘与空间地理信息, 2008, 31: 155–158
- 27 李钜章. 中国地貌形态基本类型数量指标初探. 地理学报, 1982, 37: 17–26
- 28 周成虎, 程维明, 钱金凯. 数字地貌解析与制图. 北京: 科学出版社, 2009
- 29 Zuber M T, Smith D E, Lemoine F G, et al. The shape and internal structure of the Moon from the Clementine mission. Science, 1994, 266: 1839–1843
- 30 Araki H, Tazawa S, Noda H, et al. Lunar global shape and polar topography derived from Kaguya-LALT laser altimetry. Science, 2009, 323: 897–900
- 31 Archinal B A, Rosiek M R, Kirk L K, et al. The Unified Lunar Control Network. The U.S. Geological Survey Open-File Report 2006-1367. 2006
- 32 汤国安, 刘学军, 闫国年. 数字高程模型及地学分析的原理与方法. 北京: 科学出版社, 2005
- 33 Fa W Z, Jin Y Q. Quantitative estimation of helium-3 spatial distribution in the lunar regolith layer. Icarus, 2007, 19: 15–23
- 34 中科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). 中华人民共和国 1:100 万数字地貌制图规范(征求意见稿). 2005
- 35 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: 266–271
- 36 涂汉明, 刘振东. 中国地势起伏度研究. 测绘学报, 1991, 20: 311–319
- 37 Bue B D, Stepinski T F. Automated classification of landforms on Mars. Comput Geosci, 2006, 32: 604–614
- 38 Jain A K, Dubes R C. Algorithms for Clustering Data. Englewood Cliff, NJ: Prentice-Hall, 1988

Characteristic analysis of the lunar surface and automatically extracting of the lunar morphology based on CE-1

ZHOU ZengPo^{1,2}, CHENG WeiMing¹, ZHOU ChengHu¹, WAN Cong^{1,2} & CAO YuYao³

¹ State Key Laboratory of Resources and Environmental Information Systems, Institute of Geographic and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 10049, China;

³ School of Urban and Environmental Sciences, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

The satellite Chang'E-1(CE-1) was launched in October 24, 2007 in China, which obtained a large number of scientific data of the global moon, including imageries and laser altimetric data. In this paper, the characteristics of the lunar surface are analyzed and the lunar morphologic information of the lunar mare and highland is automatically extracted based on the imagery acquired by CCD camera and the DEM processed by three-line digital photogrammetric technology. The results show that the average elevation of the global moon is -742 m; the highest and lowest locations stand in the farside of the moon; the highest is at the eastern margin of Engel'gardt crater; the lowest is in the secondary impact crater pit of Minkowski crater. The surface of the moon is very flat; most of its slope is below 15° , accounting for 90% of the total area of the global moon. The great variation of slope value mainly distributes in the lunar highlands, with an average slope of greater than 7° . The lunar mares widely distribute in the nearside of moon, with an average slope of below 3° . The optimum statistical unit for lunar relief value is 16 km^2 . The mare and highland are the basic types of lunar morphology, which can be automatically extracted by maximum likelihood classifier based on the elevation data and slope, relief and imagery data. The values of altitude, slope, relief and grey level of CE-1 imageries are normalized and binarized. A case study of H010 (locating in $0^\circ-18^\circ\text{W}$, $0^\circ-14^\circ\text{S}$) shows that the overall accuracy assessment for extracted results of the lunar mare and highland based on the geological data published by USGS in 1971 is better, and the Kappa coefficient is 0.78, and the results of the lunar mare and highland show that the method can be used to extract the characteristics of lunar surface.

Moon, characteristic analysis, the mare and highland of the Moon, automatically extracting, Chang'E-1 (CE-1)

doi: 10.1360/972010-1375