



嫦娥一号 CLTM-s01 模型揭示和认证的月球地形新特征

黄倩^{①②③*}, 平劲松^{①②*}, 苏晓莉^{①③}, 舒嵘^④, 唐歌实^②

① 中国科学院上海天文台, 上海 200030;

② 北京航天指挥控制中心飞行力学实验室, 北京 100094;

③ 中国科学院研究生院, 北京 100049;

④ 中国科学院上海技术物理研究所, 上海 200083

* 联系人, E-mail: huangqian@shao.ac.cn, pjs@shao.ac.cn

收稿日期: 2009-05-25; 接受日期: 2009-07-02

国家自然科学基金(批准号: 10973031)、中国科学院重要方向性项目(编号: KJCXZ-Y2-T13-2)和国家高技术研究发展计划(编号: 2008AA12A209, 2008AA12A210)资助项目

摘要 月球的表面地形、物质成分和月壳厚度在月球正面和背面的分布均具有明显的二分性, 绕月卫星的重力和地形等探测数据实现了人类对月球表面这种差异性的研究. 利用嫦娥一号激光高度计探测数据获得的高精度月球地形模型 CLTM-s01, 结合月球全球重力场分布情况, 提议出月球表面 4 个新的地形特征, 分别是位于背面的类撞击盆地 Sternfeld-Lewis, 撞击盆地 Fitzgerald-Jackson, 撞击坑 Wugang 和正面的火山沉积高地 Yutu, 同时对以往被提议的一些大尺度撞击盆地的地形特征进行了分析和认证, 并根据盆地特征划分了不同的盆地等级.

关键词

嫦娥一号
激光高度计
月面地形
二分性
新特征

月球正面和背面的形状、结构、物质成分、月壳厚度的分布等均具有明显的不均匀性, 即二分性. 月球形态的二分性体现在其正面和背面地形和地貌的明显差异: 正面多月海, 地势平坦; 背面多高地和撞击坑, 地形起伏较大. 月球正面月海地区月亮薄, 背面高地地区月亮厚, 据估算背面月亮比正面要厚近 10 km^[1~3], 这可能是造成月球质量中心(COM)与形状中心(COF)在朝地球方向上有约 2.0 km 偏差的主要原因之一^[1,4~9]. 由于月球表面是由不同类型、不同形成年龄、不同形成方式的各种岩石物质构成, 因此其物质成分的分布也具有极其明显的差异性. 正面月海多玄武岩, 蕴藏丰富的钛铁矿; 风暴洋区域多克里普

岩(KREEP), 富含元素K(钾)、REE(稀土元素)、P(磷)和Th(钍). 月球背面多高地斜长岩, 具有较高的Ca(钙)和Al(铝)含量; 南极艾肯盆地(SPA)为特殊的高纬度物质异常区, 地势较低, 地壳较薄, 无月海玄武岩覆盖, 相对于非典型的非月海玄武岩区域, SPAT具有较高的氧化亚铁(FeO)丰度^[10]. 月球正面和背面化学成分的差异, 可能是由于原始岩浆海的结晶化不对称造成的. 月亮结构的长波长分析显示, 月球全球二分性可能是由于月球正面和背面的熔融程度差异^[11]、不对称撞击^[12]或大尺度内部对流引起的^[13]. 月球的这种二分性特征是了解月球的内部结构、起源和演化问题的主要因素.

引用格式: 黄倩, 平劲松, 苏晓莉, 等. 嫦娥一号 CLTM-s01 模型揭示和认证的月球地形新特征. 中国科学 G 辑, 2009, 39(10): 1362—1370

Huang Q, Ping J S, Su X L, et al. New features of the moon revealed and identified by CLTM-s01. Sci China Ser G, doi: 10.1007/s11433-009-0284-x

绕月卫星的探测数据,尤其是照相、地形和重力的结果,使人类对整个月球表面二分特征的研究成为可能^[7,14].月球上最为明显的地形特征就是随机分布在其表面大小不一、密密麻麻的圆形凹坑——撞击坑.月球上存在着撞击坑、月球古代火山口及构造盆地3种不同成因的环形构造,但从遥感影像上难以区分和鉴别,因此只能统称为撞击坑.一般将直径大于300 km,具有多环中央结构和中央峰的撞击坑统称为撞击盆地^[15,16].在整个月球历史过程中,这些撞击盆地和撞击坑的分布和特征对了解月球的演化历史有非常重要的作用.月球的地质构造与地体类型都是根据月球地形和地貌的遥感影像反演得到的.由于遥感影像的多解性,月球地质构造的解释存在较多不确定因素,而全月球激光测高的结果可以帮助我们进一步对月球上多环盆地和撞击坑的分布和组成进行进一步的确认.

Spudis 等人^[17~19]利用 Clementine 激光高度计 LIDAR 得到的第一个全月球地形图,对月球上一定尺度的大型撞击坑进行了研究,列举了21个直径从326~2600 km的撞击盆地,并进一步评估了月亮长波长地形特征的现状和组成,其最有意义的发现就是描述了一些古老的、完全消退的撞击盆地,如 Mendel-Rydberg, Mutus-Vlacq 和 Lomonosov-Fleming 盆地等. Clementine 为月球大椭圆极轨道卫星,两个月的激光测高仅覆盖月球表面 $\pm 70^\circ$ 纬度范围,得到的月球地形模型沿赤道的空间分辨率约为60 km,在某些区域地形分辨率更差. Margot 等人^[20]利用地基雷达干涉测量数据得到极区 $\pm 87.5^\circ$ 以上地形图(空间分辨率为150 m), Cook 等人^[21]利用 Clementine 极区立体照相数据(UV-VIS),以极区 $\pm 60^\circ$ Clementine 测高数据为准,重建得到月球两极 60° 以上区域数字高程模型(空间分辨率约为1 km),基于该模型, Cook 等人提出了一些早期未发现的前酒海时期时期的撞击盆地,如 Bailly-Newton, Schrodinger-Zeeman 和 Sylvester-Nansen 等.由于缺乏绝对的高程信息,利用上述方法^[20,21]得到的地形模型均存在一定程度上的偏差.地基雷达干涉测量与 Clementine 激光测高在撞击坑第谷(Tycho)有近3 km的位置误差^[22],与立体照相的结果也有千米级以上的偏差^[20],这些偏差必然对确认撞击坑的大小和深度造成一定的影响,需要高

精度地形结果的进一步确认.

2007 年发射升空的中国嫦娥一号和日本“月女神”月球极轨卫星,利用搭载的激光高度计,对月球表面首次进行了全球性高程测量,分别获得了高精度高分辨率的月球全球地形结果^[8,9].平劲松等人^[8]利用嫦娥一号第一次正飞阶段获取的约300多万万个有效激光高度数据点,得到空间分辨率约为8 km的月球全球地形模型 CLTM-s01,利用该模型可以对月球上一定尺度的撞击坑和撞击盆地进行进一步的分析和确认,有助于完善人类对月表撞击坑和撞击盆地演化理论的研究.

基于嫦娥一号 CLTM-s01 模型得到的 $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$ 月球全球地形格网图,通过与 ULCN2005 模型^[23]和 Clementine 照相结果进行详细对比分析,结合月球重力场信息,本文揭示了月球表面一些新的中小尺度的地貌特征,包括位于月球背面的类撞击盆地——Sternfeld-Lewis、撞击盆地——Fitzgerald-Jackson,撞击坑——Wugang 和正面风暴洋内由火山遗迹形成的高地——Yutu.同时基于该模型,对 Clementine 后被提议但还未证实的11个撞击盆地进行了验证,进一步完善了目前月球撞击盆地的统计结果.

1 CLTM-s01 模型揭示的月球地形新特征

国际天文联合会(IAU)在美国地质调查局(USGS)网站(<http://planetarynames.wr.usgs.gov>)上公布了迄今为止所有的月球地名、位置和年代等信息,并将月球地貌按自然形态分为月海、撞击坑、山脉、峭壁、月谷、月溪、月湖、月湾、月沼和月面辐射纹等18个主要地貌类型.所有经 IAU 授权的月球地形名称均显示在行星名称术语表(Gazetteer of Planetary Nomenclature)提供的月球地图集中 1:1,000,000 地形图上(<http://planetarynames.wr.usgs.gov/dAtlas.html>).到目前为止,IAU 在线数据库已经公布了8,962个经审核的月球名称,连同不连续的废弃名称,总数超过9000个,其中有1521个命名的撞击坑^[24].

将 CLTM-s01 模型展开得到 $0.0625^\circ \times 0.0625^\circ$ 地形格网图,结合行星术语表 1:1,000,000 地形图,本文对直径大于50 km 的圆形撞击特征进行了比较分析,揭示了4个以往测高和照相无法明显显示的地形特征,如表1所示.图1为 CLTM-s01 月球全球地形图,黑色

实圆圈显示了4个新揭示的地形特征, 分别以 N1~N4 为代号, 其中 N1(20°S, 232°E), N2 (25°N, 191°E)和 N3(13°N, 189°E)均位于月球背面高地区域, N4(14°N, 308°E)位于月球正面月海区域. 图2和3分别比较了 CLTM-s01和 ULCN2005模型在月球背面3个特征区域的地形情况. 图4分别显示了月球正面 N4区域

表 1 嫦娥一号激光高度计揭示的月球地形新特征^{a)}

地形(代号)	地形名称	纬度/°S	经度/°E	直径/km	类别	年龄
N1	Sternfeld-Lewis	20	232	840	类撞击盆地	pN
N2	Fitzgerald-Jackson	25	191	470	撞击盆地	pN
N3	Wugang	13	189	190	撞击坑	pN
N4	Yutu	14	308	300	火山遗迹高地	LI

a) 月球地质演化过程被 3 个主要事件(酒海、雨海和东方海盆地的形成)划分为 4 个主要阶段, 即前酒海纪、酒海纪、前雨海纪, 后雨海纪至哥白尼纪. 表中 pN 表示月球地质年龄中的前酒海纪; LI 表示前雨海纪

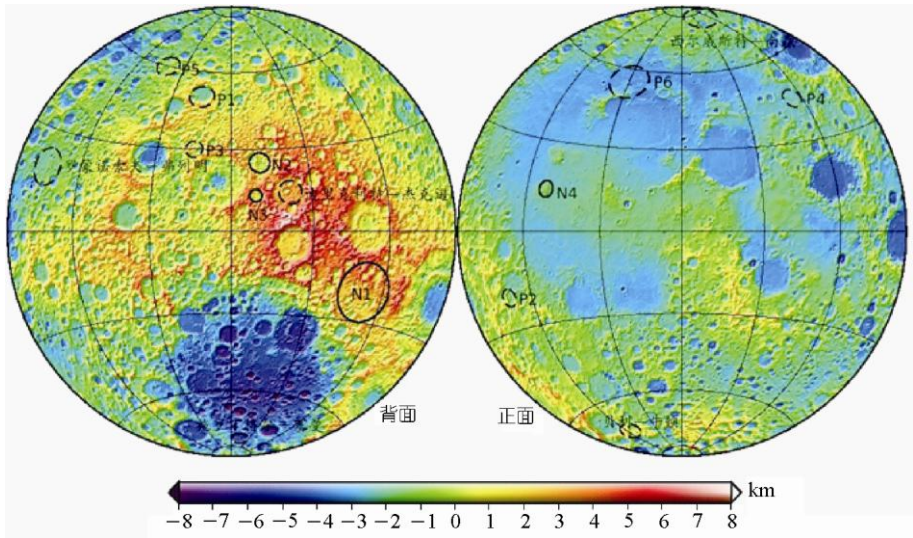


图 1 利用嫦娥一号 CLTM-s01 模型得到的 0.0625°×0.0625°月球地形图

嫦娥一号激光测高数据揭示的月球地形特征 N1~N4 以黑色实线圆圈表示, 左边是月球背面, 中央经度为 180°E, 右边是月球正面, 中央经度为 0°E, 均为兰伯特方位角等距离(Lambert Azimuthal Equal-Area)投影

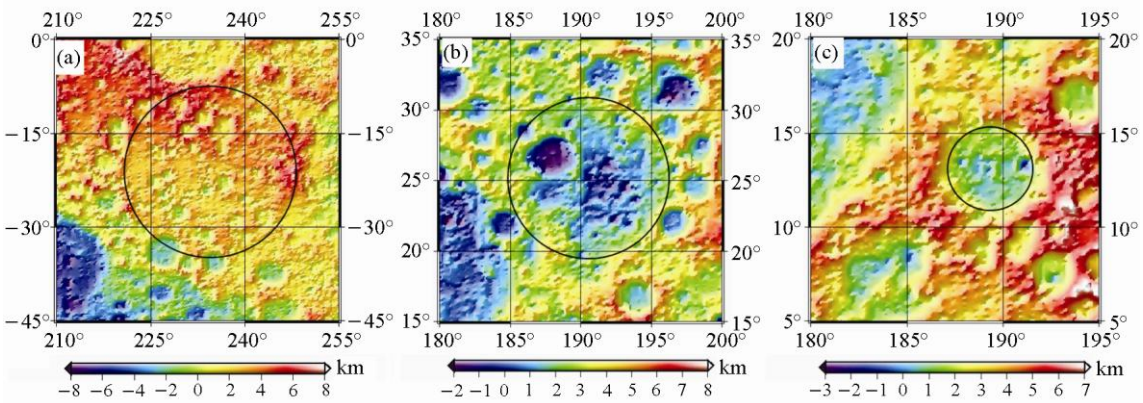


图 2 嫦娥一号 CLTM-s01 模型揭示的月球背面新特征区域 0.0625°格网地形图

(a) N1(20°S, 232°E); (b) N2(25°N, 191°E); (c) N3(13°N, 189°E)

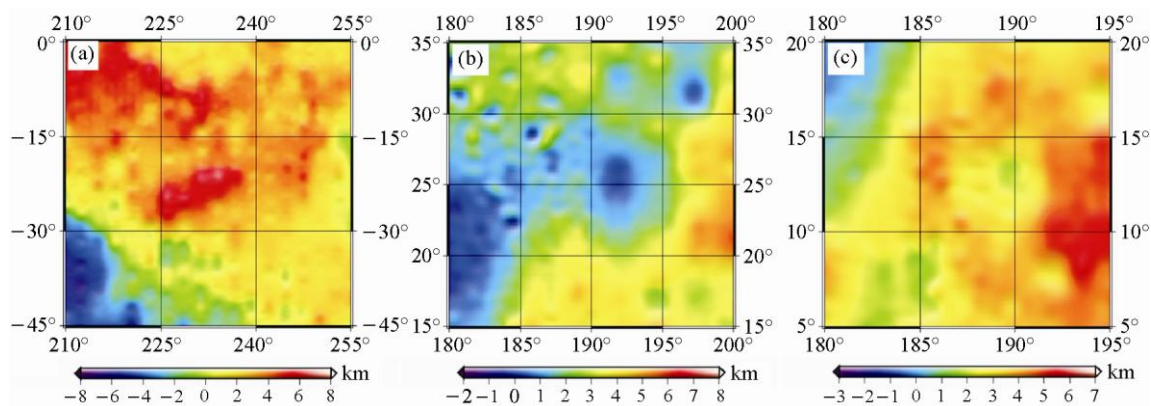


图3 ULCN2005 月球模型在 N1~N3 区域的地形情况

(a) N1; (b) N2; (c) N3

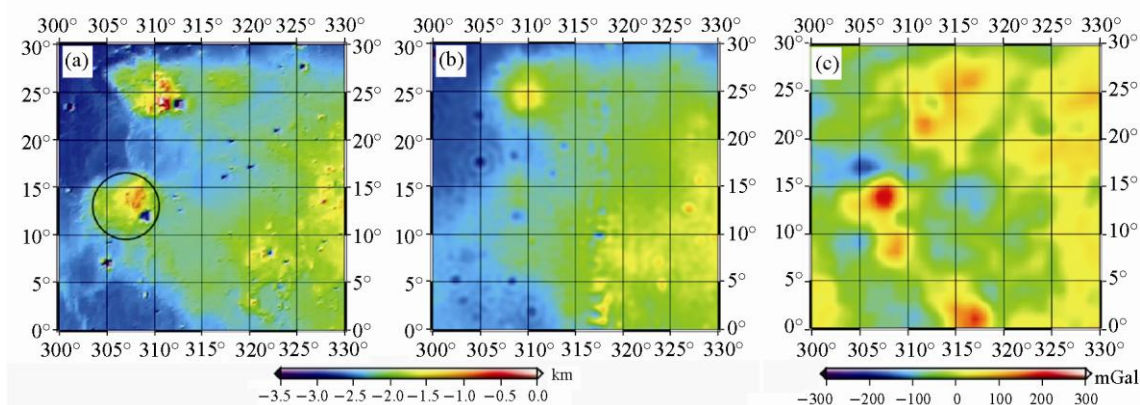


图4 嫦娥一号 CLTM-s01 模型揭示的月球正面新特征 N4 区域地形和重力图

(a) CLTM-s01 地形; (b) ULCN2005 地形; (c) LP150Q 重力异常

的地形和重力异常分布情况。

为了确认地形新特征N1~N4的分布范围,图5分别显示了N1~N4沿各自中心点纬度方向的地形剖面曲线,横轴表示经度的变化,已换算成月表距离,纵坐标表示高程。图5(a)为N1区域,纬度20°S,经度(212~252°E),剖面显示环状直径约为840 km,但是圆环状结构不够明显;图5(b)为N2区域,纬度25°N,经度(171~211°E),剖面显示较明显的凹陷特征,外环直径约为470 km;图5(c)为N3区域,纬度13°N,经度(179~199°E),表现出明显的撞击坑特征,剖面显示直径约为190 km;图5(d)为N4区域,纬度14°N,经度(298~318°E),表现为高地式的隆起,剖面显示直径约为300 km。

初步认定N1和N2具有一定的撞击盆地特征,N3为撞击坑,N4为月面上的高地。根据IAU月球任务组

(Lunar Task Group, LTG)对撞击盆地的命名规则,结合历史依据,将N1暂命名为Sternfeld-Lewis, N2命名为Fitzgerald-Jackson。结合中国古代有关嫦娥的传说,将撞击坑N3暂命名为Wugang,正面的高地N4暂命名为Yutu。下面分别对N1~N4区域的地形地貌情况逐个进行分析,并对其地质年龄进行确认。

1.1 N1 类撞击盆地(斯特恩费尔-路易斯)

Cook 等人^[25]利用 Clementine 约 700,000 幅 UV-VIS(1 km/像素)照相数据得到了月球全球数字地形图(DTM),并指出在东海(Orientale)西部(22~27°S, 223~238°E)区域,存在一个不寻常的地形上的高地块,高程约为+5~8 km,该特征表现出类似于盆地的结构,但无法确定其是否为撞击盆地,本文利用 CLTM-s01 模型对该区域地形特征进行了分析。

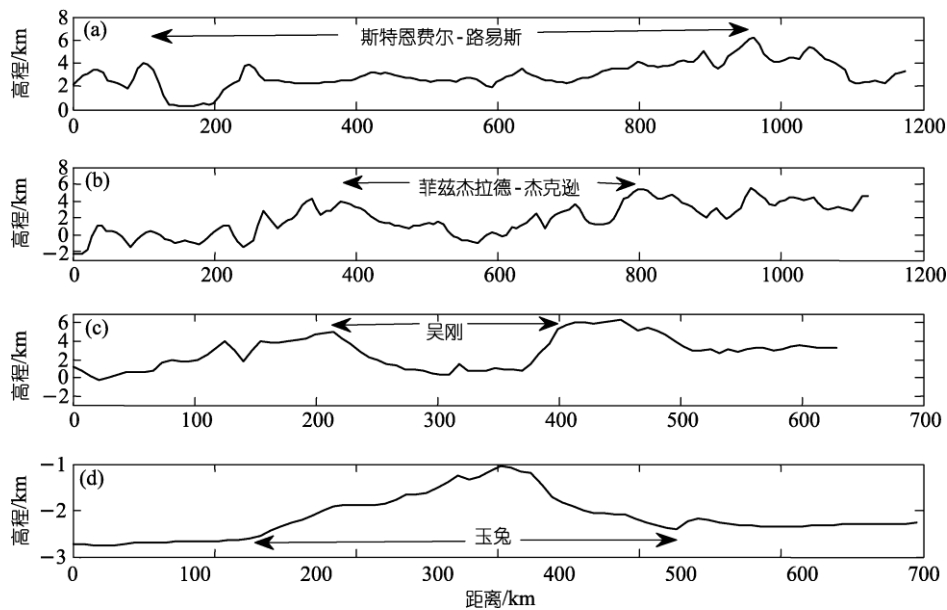


图 5 N1~N4 沿各自中心纬度的地形剖面曲线

(a) N1 区域, 纬度 20°S, 经度(212°~252°E); (b) N2 区域, 纬度 25°N, 经度(171°~211°E); (c) N3 区域, 纬度 13°N, 经度(179°~199°E); (d) N4 区域, 纬度 14°N, 经度(298°~318°E)

从图 2(a)和图 3(a) N1 区域(0°~45°S, 210°~255°E)的 CLTM-s01 和 ULCN2005 地形对比中发现, ULCN2005 地形图上东海西边, 中心点位于(25°S, 230°E), 跨越经度 225°~238°E, 纬度 30°~20°S, 有一个高程约为 +6~8 km 的地形凸起, 但在更为清晰的 CLTM-s01 地形图上, 该区域并无明显的地形隆起, 高程变化比较平坦, 约为 1~5 km. 在以往的月球重力场模型^[26]中并无任何与该地形有关的重力异常变化, 而且最新的重力场模型 SGM90d^[27]也并未显示该区域有任何的重力异常特征. 由此可以证明, 该区域的地形突起是不存在的, 而由 Clementine 激光高度计显示的这个高程凸起, 可能是由于原始的测量误差或者高程计算中的不确定性造成.

结合该地形隆起区域周边地形特征, 从 CLTM-0s1 地形图中可以看出, 在撞击盆地东海(Orientale)以西、赫兹斯朋(Hertzspung)以南、以(20°S, 232°E)为中心, 直径约为 900 km 区域, 可能存在一个潜在的撞击盆地. 该盆地处于高地斜长岩地体(FHT)^[10]范围中, 盆地的北部区域被附近的 Hertzspung 的边缘所挤压, 东部被 Orientale 的喷出物所覆盖, 整个盆地自东北向西南倾斜, 地势由高到低. 虽然该撞击盆地具有一定的环状边缘特征, 但由于该区域被一系列撞击坑所

环绕, 所谓的边缘隆起特征可能是由这些撞击挤压造成的. 因此只能判定该区域可能仅仅是月球背面普通的高地, 只是由于撞击挤压形成了类似撞击盆地的边缘特征; 或者是因为该盆地地质年龄较老, 且退化现象比较明显, 因此还需要进一步的照相结果(嫦娥一号和“月女神”)来确认.

根据 IAU 的命名方法, 本文利用该区域东西相对的两撞击坑对其进行命名为 Sternfeld-Lewis (斯特恩费尔-路易斯). 从撞击坑边缘的层叠情况判断, 该区域的地质年龄比周边撞击坑(如 Hertzspung)要老, 应该处于月球地质演化中的前酒海纪.

1.2 N2 撞击盆地(菲兹杰拉德-杰克逊)、N3 撞击坑(吴刚)

Frey^[28]将似圆形凹陷(QCDs)分析技术应用于火星 MOLA 激光高度计的探测数据, 发现了火星上存在大量明显的隐藏形撞击坑. 为了进一步证实在月球上是否存在此类型潜在撞击盆地, Frey 将该方法运用到月球全球地形格网模型 ULCN2005^[23,29], 并对月球上所有直径大于 300 km 的似圆形结构进行搜索. 该搜索结果认为在月球背面邻近 Freundlich-Sharonov 和 Korolev 区域存在一些具有环形凹陷结构的似撞击

盆地特征. Clementine 激光测高在该区域沿经度方向存在近 10° (约 300 km) 的覆盖空隙^[7], 无法直接利用早期激光测高的结果对该区域地形特征进行辨认. 利用 CLTM-s01 地形结果, 可以对该区域是否存在撞击盆地和撞击坑等地形特征做出明确的判断.

通过与 ULCN2005 地形比较发现, 在月球背面 ($15^\circ \sim 35^\circ \text{N}$, $180^\circ \sim 200^\circ \text{E}$) 和 ($5^\circ \sim 20^\circ \text{N}$, $180^\circ \sim 195^\circ \text{E}$) 区域, CLTM-s01 地形上显示出明显的撞击凹陷特征, 分别如图 2(b) 和 (c) 所示. 图 2(b) 中显示的撞击盆地, 中心点位于 (25°N , 191°E), 直径大约 470 km, 深度 $-1 \sim -4$ km, 该撞击盆地东北边缘被一系列撞击坑所挤压, 无法确认原始盆地的边缘特征, 但仍然可以确定其具有撞击盆地的凹陷结构, 只是存在一定的退化现象.

该撞击盆地内及周围最明显的撞击坑为 Fitzgerald 和 Jackson, 沿用 Cook 等人^[25]的方法, 本文将该盆地的名称定为 Fitzgerald-Jackson (菲兹杰拉德-杰克逊). 从相对结构上看, 该撞击盆地的地质年龄老于 Freundlich-Sharonov, 处于前酒海纪.

图 2(c) CLTM-s01 地形图显示出 Fitzgerald-Jackson 撞击盆地以南, Dirichlet-Jackson 以西, 中心点位于 (13°N , 189°E) 处, 存在一个直径约为 190 km, 深度约为 4 km 的撞击坑, 本文提议命名为撞击坑 Wugang (吴刚). 图 3(c) 显示了 ULCN2005 在该区域的地形情况, 其中并无明显的撞击坑特征. 利用图 5(c) CLTM-s01 格网在该区域的剖面图可以明显看出, 该区域具有撞击坑结构, 且有一个小型的中央峰 (Central Peak). 从地质结构上分析, 该撞击坑年龄与 Freundlich-Sharonov 相近, 也应该处于前酒海纪.

1.3 N4 火山遗迹(玉兔)

从 CLTM-s01 与 ULCN2005 地形比较图^[8]中可以看出, 除月球两极和 N1 区域内明显的地形差异外, 在正面风暴洋内, 中心点位于 (14°N , 308°E) 处有一个高程约 2 km 的地形异常.

在图 4(a) 和 (b) 显示的风暴洋 ($0^\circ \sim 30^\circ \text{N}$, $300^\circ \sim 330^\circ \text{E}$) 区域地形比较图中, CLTM-s01 显示出两个明显的高地特征, 高地 1 中心点位于 (25°N , 310°E), 跨越直径范围约为 250 km, 高出月海约 3 km, 从 ULCN2005 地形图中也可以辨认出来. 通过对比行星术语表上 1:1,000,000 地形图, 发现照相结果中可以

清晰辨认出该区域的高地特征, 且该区域包括了辐射状撞击坑 Aristarchus, Herodotus 和 Schroteri 月谷等地貌特征. 高地 2 中心点位于 (14°N , 308°E), 跨越直径范围约为 300 km, 高出周边月海约 2~3 km. 奇特的是, 在 ULCN2005 地形图上, 该区域仅微有地形起伏, 表现为非常平缓的月海特征. 然而图 4(c) 的月球 LP150Q^[26]重力场模型显示出该区域有非常明显的正的重力异常, 高出月海约 300 mGal. 美国月球与行星科学院 (Lunar and Planetary Institute, LPI) 月球地图集提供的 1:1,000,000 月球图 (<http://www.lpi.usra.edu/resource/mapcatalog/>) 显示, 高地 1 区域有撞击形成的月面辐射纹、山脉、撞击坑、月谷、月溪等多种复杂的地貌特征, 而高地 2 整体地势平滑, 其间被命名的仅有撞击坑 Marius (马里乌斯) 及 Rima Marius (马里乌斯月溪), 早期 Apollo 和 Lunar Orbiter 的照相结果显示, 在该区域存在许多的凸起的小山 (Hills), 统称为 Marius Hills, 这些小山后来被统称为穹隆 (Domes). 从 CLTM-s01 地形结果显示, 这些穹隆均坐落在一座大的山脉, 即高地 2 上.

大多数的作者认为月海代表了月球上的火山岩石区域, 且跟月海紧密相连的黑的穹隆 (domes) 和高地通常被认为是火山的遗迹 (shield). 例如, 雨海 (Imbrium) 中叶状的悬崖/陡坡被认为是川流 (flow fronts). 由阿波罗 11 带回的 Tranquillitatis (静海) 的结晶岩石成分显示, 该区域含有火成岩结构, 并且其成分跟陆地的玄武岩类似, 只是富含一些难熔的元素, 特别是钛 (Ti) 和锆 (Zr), 但缺少碱和挥发性成分. 不同的月海的一致性表现显示它们的起源和成分都是相似的, 并且这种所有岩石近似的玄武岩成分也有遥感结果支持. 这些累计的证据显示月海似玄武岩成分的火山物质的填充^[14].

基于以上推理, 本文认为高地 1 和高地 2 均有可能是火山的遗迹, 且高地 2 具有明显的环状地形突起, 类似于古老的月球火山口, 地质年龄应该在前雨海纪 (LI), 暂将该区域取名为 Yutu (玉兔). 该区域的地形地貌较目前的认识要复杂得多, 还有待于利用高分辨率的照相结果进行进一步的确认.

2 CLTM-s01 模型证认的月球撞击盆地

IAU 在月球术语表中并没有对撞击坑和撞击盆地进行区分. Wood 根据历史资料对以往确认和提议

的撞击盆地进行了总结 (<http://www.lpod.org/cwm/DataStuff/Lunar%20Basins.htm>, 2004), 列举出57个撞击盆地, 并依据盆地的确定性将其划分为4个等级, 等级1 (certain, 确定的), 具有明显的多环结构, 中央凹陷, 四周有喷出物堆积; 等级2 (probable, 可能的) 缺少等级1的明显盆地特征, 但仍然可以相对确定; 等级3(uncertain, 不太确定的)相对于等级2更老, 且盆地特征不太明显; 等级4(proposed, 被提议的)为被提议的盆地, 仅具有凹陷特征, 该类型最终可能被升级或者从列表中剔除。

表2列举了由Wood给出的11个位于等级4的撞击盆地信息, 其中5个有明确的名称, 6个无名称(本文分别以P1~P6为代号)。在图1所示CLTM-s01高精度地形图中, 以黑色虚线圆圈显示的为等级4的撞击盆地, 其中6个在月球背面, 5个在月球正面。本文分别对具有争议性的等级4撞击盆地的地形特征进行了分析, 并对其盆地等级进行了重新划分。

2.1 CLTM-s01 模型认证的主要撞击盆地特征

Bailey-Newton 在 CLTM-s01 地形图上显示出明显的南部和西部外边缘, 相对覆盖关系上发现, 该区域混合了不同时期的物质, 盆地外形很难精确修正。古老的 SPA(南极艾肯盆地)的边缘不仅将盆地的边缘截断, 而且横过了该盆地的底部。在Cook^[21](2000)论证的基础上, 本文将其确认为撞击盆地, 但由于盆地特征不太完整, 将其划分为等级3。

Dirichlet-Jackson 处于图1月球背面高地区域, 具有非常清晰的边缘结构, 相比 Korolev 和 Hertzsprung 撞击盆地, 其受到的二次撞击更多。“月女神”最新的重力场模型 SGM90d^[27]显示, 该区域重力异常呈环状特征, 盆地中央有一个重力异常高峰, 被盆地内负的重力异常环绕, 盆地边缘为正的重力异常环。该重力异常结构与嫦娥一号给出的地形具有很好的一致性, 无明显的质量瘤特征^[27]。本文认为 Dirichlet-Jackson 具有明显的撞击盆地特征, 将其归为等级1盆地。

Lomonosov-Fleming 区域地形比较平坦, 在 CLTM-s01 地形图中表现出一定程度的凹陷, 边缘与内部均被大大小小的撞击坑所覆盖, 具有一定的环形结构。Giguere^[30]等利用 Clementine 的 UV-VIS 数字

图片模型(DIM)得到该区域1 km和100 m分辨率图片, 确认该区域有黑色晕状的撞击坑, 并进一步证实该盆地是一个大型的潜在月海(cryptomare)。由于该区域盆地特征有一定退化, 且边缘特征不明显, 本文将 Lomonosov-Fleming 划分为等级3盆地。

Schrodinger-Zeeman 具有一定的双环结构特征, 从 CLTM-s01 地形图中可以看出, 该盆地内环完整而明显, 外环有些残缺, 该盆地地形特征与重力异常的结果具有明显的相关特性^[27,31]。虽然该区域边缘盆地特征高度退化^[21], 但仍然可以分辨其盆地构型, 本文将其划分为定级2盆地;

Sylvester-Nansen 靠近北极, 处于月球正面。CLTM-s01 极区地形图显示, 该区域边缘和内部结构广泛退化, 中央有年轻的撞击坑和沉积物覆盖, 重力异常图显示该地区中央处有一个负的重力异常^[27,31], 根据上述特征, 本文将该盆地划分为等级2盆地。

2.2 CLTM-s01 模型认证的其他撞击盆地特征

表2中编号为P1~P6的盆地特征均由Spudis根据Clementine激光高度计的地形结果而提议^[17,18], 但并未命名。Cook^[25]利用Clementine照相结果认证的点中心位于(15°S, 66°W), 直径为400 km, 名为Cruger-Sirsalis的撞击盆地, 其地形特征与表2中P2相近。Hikida等人^[32]利用多面体模型反演的方法得到的月亮厚度模型, 修正Cruger-Sirsalis的位置为(16°S, 65°W), Wieczorek等人^[33]给出了Cruger-Sirsalis盆地的地质年龄为雨海-前酒海期。嫦娥一号地形显示该区域存在明显的盆地凹陷特征, 本文认为表2中的P2即为Cruger-Sirsalis撞击盆地, 并将其划分为等级1盆地。

根据Spudis^[18]对P1, P3~P6特征的描述, 本文无法利用嫦娥一号CLTM-s01地形结果对这些特征的盆地特性进行明确辨认。虽然P1区域几乎与撞击坑D'Almeida(50.8°N, 163.9°E, 直径255 km)重合, 但在P1显示的450 km范围内, 并无明显撞击盆地特征。因此本文认为除P2外其他被提议的撞击盆地特征仍为等级4, 或者可以从撞击盆地列表中排除。不过还有待于嫦娥一号和“月女神”高精度的月面照相结果的进一步确认。

表 2 已被提议的撞击盆地(Wood, 2004)^{a)}

盆地(英文名)	盆地(中文名)	纬度/(°)	经度/(°)	直径/km	年龄	发现者	本文证认等级
Bailly-Newtom	J. S. 贝利-牛顿	-73	-57	330	pN	Cook 2000	3
Dirichlet-Jackson	迪里克利特-杰克逊	14	-158	470	pN	Cook 2000	1
Lomonosov-Fleming	罗蒙诺索夫-弗列明	19	105	620	pN	Wilhelms & ElBaz 1977 ^[34]	3
Schrodinger-Zeeman	施罗丁格尔-塞曼	-81	-165	250	pN	Cook 2000	2
Sylvester-Nansen	西尔威斯特-南森	83	45	500	pN	Cook 2000	2
P1		50	165	450		Spudis 1995	4
P2(Cruger-Sirsalis)	克鲁格尔-雪萨利斯	-20(-16)	-70(-65)	300(400)	I-pN	Spudis 1994	1
P3		30	165	330		Spudis 1995	4
P4		45	55	350		Spudis 1995	4
P5		60	130	400		Spudis 1995	4
P6		55	-30	700		Spudis 1995	4

a) 经纬度变化范围-180°~180°; -90°~90°; 直径为盆地的边缘直径; 盆地的年龄显示: pN 为前酒海纪, I 为雨海纪

3 讨论与总结

月球表面的地形和地质的二分性直接或间接的被大约 50 个撞击盆地所控制, 这些盆地的特征由照相和在轨卫星的观测结果不同程度的确定^[35]. 月球上大的撞击盆地的表象对理解月球早期热和磁化状态非常重要, 同时对研究月球近期大的撞击以及太阳系中撞击坑的标准年龄也有重要意义. 早期的激光测高和照相结果, 对我们了解月球上撞击盆地的分布、组成和特征提供了非常重要的依据, 但由于数据空间分辨率的限制, 对这些撞击盆地形成的解释还很贫乏, 而且用这些数据只能对月球表面大中型尺度的撞击坑进行研究.

本文利用中国月球探测器嫦娥一号 CLTM-s01 模型, 结合月球重力场分布情况, 提议并确认了月球背面类撞击盆地 Sternfeld-Lewis, 撞击盆地 Fitzgerald-Jackson, 撞击坑 Wugang 和正面的高地 Yutu; 还对以往被提议的一些大尺度撞击盆地的地形特征进行了

分析和证认, 并根据盆地特征划分了不同的盆地等级.

月球的二分性是了解月球的内部结构、起源和演化问题的主要因素. 小尺度的地形特征和高精度的重力数据对解释月球的二分性提供了重要的依据. 嫦娥一号高分辨率地形图虽然对研究小尺度的月球地形特征提供了一定的地形信息, 但对解释这些地形特征的地质构造和地体类型上还存在一定的限制. 早期的月球地质构造和地体类型都是根据月球地形和地貌的遥感影像反演得到的, 由于遥感影像的多解性, 也就带来了月球地质构造解释的不确定性. 因此结合高精度的遥感影像结果(如: 嫦娥一号影像结果)对这些提议的撞击盆地和特殊的地形特征的分布和组成进行进一步的分析显得很重要.

由于 IAU 对地形特征的命名有严格的规定, 按照 LTG 的提议, 将通过程序对以上暂定名称提供给 LTG 进行审批.

致谢 感谢赵铭老师对文章深入而细致的审阅, 提出了宝贵的修改意见, 完善了文章的整体内容. 球面投影图和区域地形图均采用了The Generic Mapping Tools (GMT)软件^[36], 在此表示感谢!

参考文献

1 Neumann G A, Zuber M T, Smith D E, et al. The lunar crust: Global structure and signature of major basins. J Geophys Res, 1996, 101: 16841—16843^[doi]

2 Wiczorek M A, Phillips R J. Potential anomalies on a sphere: Applications to the thickness of the lunar crust. J Geophys Research-Planet, 1998, 103 : 1715—1724^[doi]

3 Potts L V, von Frese R B. Crustal attributes of lunar basins from terrain-correlated free-air gravity anomalies. J Geophys Res, 2003, 108(E5): 5037^[doi]

- 4 Kaula W M, Schubert G, Lingenfelter R E, et al. Apollo laser altimetry and inferences as to lunar structure. *Proc Lunar Sci Conf* 5th, 1974, 3049—3058
- 5 Bills B G, Ferrari A J. A harmonic analysis of lunar topography. *Icarus*, 1977, 31: 244—259[[doi](#)]
- 6 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[[doi](#)]
- 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[[doi](#)]
- 8 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(11): 1601—1612
- 9 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[[doi](#)]
- 10 Jolliff B J, Gillis J J, Haskin R L, et al. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins. *J Geophys Res*, 2000, 105: 4197—4216 [[doi](#)]
- 11 Kaula W M, Schubert G, Lingenfelter R E, et al. Analysis and interpretation of lunar laser altimetry. *Proc Lunar Sci Conf* 3th, 1972, 3: 2189—2204
- 12 Wood C A. Moon: Central peak heights and crater origins. *Icarus*, 1973, 20: 503—506[[doi](#)]
- 13 Lingenfelter R E, Schubert G. Evidence for convection in planetary interiors from first-order topography. *Earth Moon Planets*, 1973, 7: 172—180
- 14 Stuart-Alexander D E, Howard K A. Lunar Maria and Circular Basins-A review. *Icarus*, 1970, 12: 440—456[[doi](#)]
- 15 Hartmann W K, Wood C A. Moon: Origin and evolution of multi-ring basins. *Earth Moon Planets*, 1971, 3: 3—78
- 16 Wilhelms D E. The geologic history of the Moon. Washington DC: U. S. Government Printing Office, U. S. Geol. Surv. Prof., 1987
- 17 Spudis P D, Gillis J J, Reisse R A. Ancient multiring basins on the moon revealed by clementine laser altimetry. *Science*, 1994, 266: 1848—1851[[doi](#)]
- 18 Spudis P D. Clementine laser altimetry and multi-ring basins on the Moon. *LPS XXVI*, 1995, 26: 1337—1338
- 19 Spudis P D, Adkins C D. Morphometry of basins on the Moon: New results from Clementine laser altimetry. *LPS XXVII*, 1996, 27: 1253
- 20 Margot J L, Campbell D B, Jurgens R F, et al. Topography of the lunar poles from radar interferometry: A survey of cold trap locations. *Science*, 1999, 284: 1658—1660[[doi](#)]
- 21 Cook A C, Watters T R, Robinson M S, et al. Lunar polar topography derived from Clementine stereoinages. *J Geophys Res*, 2000, 105: 12023—12033[[doi](#)]
- 22 Margot J L, Campbell D B, Jurgens R F, et al. Topography of tycho crater. *J Geophys Res*, 1999, 104: 11875—11882[[doi](#)]
- 23 Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. The unified lunar control network 2005. U. S. Geological Survey Open-File Report, 2006, Version 1. 0, 2006-1367
- 24 Shevchenko V, El-Baz F, Gaddis L, et al. The IAU/WGPSN Lunar Task Group and The Status of Lunar Nomenclature. In: 40th Lunar and Planetary Science Conference, 2009. 2016
- 25 Cook A C, Spudis P D, Robinson M S, et al. Lunar topography and basins mapped using a clementine stereo digital elevation model. *Lunar and Planetary Science XXXIII*, 2002
- 26 Konopliv A S, Asmar S W, Yuan D N. Recent gravity models as a result of the lunar prospector mission. *Icarus*, 2001, 150: 1—18[[doi](#)]
- 27 Namiki N, Iwata T, Matsumoto K, et al. Farside gravity field of the Moon from Four-Way Doppler Measurements of SELENE (Kaguya). *Science*, 2009, 323: 900—905[[doi](#)]
- 28 Frey H V. Previously unrecognized large lunar impact basins revealed by topographic data. *Lunar and Planetary Science XXXIX*, 2008, 1344
- 29 Archinal B A, Rosiek M R, Kirk R L, et al. Report on the Final Completion of the Unified Lunar Control Network 2005 and Lunar Topographic Model. U. S. Geological Survey Open-File Report, 2007
- 30 Giguere T A. Cryptomare in the Lomonosov-Gleaming region of the moon. *Lunar and planetary science XXXIII*, 2002, 1466
- 31 Konopliv A S, Binder A B, Hood L L, et al. Improved gravity field of the Moon from Lunar Prospector. *Science*, 1998, 281: 1476—1480[[doi](#)]
- 32 Hikida H, Wieczorek M A. Crustal thickness of the Moon: New constraints from gravity inversions using polyhedral shape models. *Icarus*, 2007, 192: 150—166[[doi](#)]
- 33 Wieczorek M A, Feuvre M L. Did a large impact reorient the Moon? *Icarus*, 2009, doi: 10. 1016/j. icarus. 2008. 12. 017
- 34 Wilhelms D E, El-Baz F. Geologic Map of the East Side of the Moon. U. S. Geological Survey, 1997
- 35 Normann M D. Lunar Basins and Breccias. *Earth Solar System Impact Bombardment*, 2008, 3009
- 36 Wessel P, Smith W H F. Free software helps map and display data. *Eos Trans, AGU*, 1991, 72(41): 441 [[doi](#)]