

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2018.12.11

月球南海地区玄武岩厚度估算

姚美娟^{1,2}, 陈建平^{1,2,*}, 籍进柱³

1. 中国地质大学(北京) 国土资源与高新技术研究中心, 北京 100083
2. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083
3. 中国科学院 地球化学研究所, 贵州 贵阳 550081

YAO Meijuan^{1,2}, CHEN Jianping^{1,2,*}, JI Jinzhu³

1. Institute of Land Resources and High Techniques, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences(Beijing), Beijing 100083, China
3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China

YAO Meijuan, CHEN Jianping, JI Jinzhu. Thickness estimation of basalts in Mare Australe. *Earth Science Frontiers*, 2019, 26(3): 271-281

Abstract: Mare basalts were formed from partial melting mantle followed by volcanic eruption to the lunar surface. The thickness of mare basalt plays an important role in the study of magmatic process during Moon's evolution and can reflect the depths of the mare basalts source region. It can help us understand the regional volcanism and provide the basic constraints for the thermal and/or magma evolution of entire Moon. Also, the thickness of mare basalt can be used to estimate basalt volumes and indicate the total amount of magma eruption and the thermal state of the Moon. In this paper, by using multi-source remote sensing data and combing the crater morphological characteristics with crater excavation method, we estimated the thickness of Mare Australe basalts in crater and intercrater and analyzed the area, volume, age and magmatic activities. The results showed that the thickness of basalts in crater ranged between 0.11 and 4.75 km with an average thickness of 1.32 km, and the total area and volume of exposed basalts were approximately 57.06–10791.66 km² and 10.25–51260.38 km³, respectively. The thickness of basalts in intercrater was found to be 0.01–2.18 km with an average thickness of 0.34 km, and the total area and volume of exposed basalts were about 6487.89–33170.55 km² and 2711.97–11609.69 km³, respectively. As a result, we estimated the thickness of basalts in Mare Australe to be 0.01–4.75 km and averaged at 600 m, and the total area and volume of exposed basalts to be approximately 2.12×10⁵ km² and 2.71×10⁵ km³, respectively. By analyzing the ages and distribution characteristics of basalts, we found that the magma eruption activities were mainly concentrated between the Imbrian and Eratosthenian era, along with many localized multi-stage magmatic eruptions and filling processes in Mare Australe, which led to coexistence of the early and late stage basalt in a same basalt unit simultaneously, and the unique distribution characteristics of Mare Australe basalts are related to their topography.

Key words: Mare Australe, Moon; thickness estimation of basalts; magmatic activity

摘要:月海玄武岩是月幔部分熔融喷出月表而形成的,其厚度可以反映月海玄武岩源区的深度。研究月海玄武岩厚度,对进一步认识月球区域岩浆作用或火山作用的演化历史具有不可替代的作用,也能够为整个月球的热演化和岩浆演化提供基本的约束条件。同时,玄武岩厚度可以用以推测月球内部产生玄武岩岩浆的体积,对月球火山作用的岩浆喷发总量以及月球内部的热状态具有指示作用。本文基于多源遥感数

收稿日期:2018-05-25;修回日期:2018-08-28

基金项目:国家自然科学基金项目(41490634);国家科技基础性工作专项项目(2015FY210500)

作者简介:姚美娟(1989—),女,博士研究生,地球探测与信息技术专业。E-mail:lyaomeijuan@163.com

*通讯作者简介:陈建平(1959—),男,教授,博士生导师,主要从事矿产资源与定量地学研究。E-mail:3s@cugb.edu.cn

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2019,26(3)

据,综合利用撞击坑的形貌特征与月坑挖掘深度法对南海地区撞击坑内(crater)和撞击坑间(intercrater)两类玄武岩地层的厚度进行了估算,并对玄武岩的面积、体积、年龄及岩浆活动做了简单分析。研究结果表明:南海地区撞击坑内的玄武岩厚度变化范围为0.11~4.75 km,平均值约为1.32 km,玄武岩的出露面积和出露体积分别为57.06~10 791.66 km²和10.25~51 260.38 km³;撞击坑间的玄武岩厚度变化范围为0.01~2.18 km,平均值约为0.34 km,玄武岩的出露面积和出露体积分别为6 487.89~33 170.55 km²和2 711.97~11 609.69 km³。因此,南海地区玄武岩厚度的变化范围分布在0.01~4.75 km,平均厚度约为600 m,出露的玄武岩总面积约为2.12×10⁵ km²,总体积约为2.71×10⁵ km³。通过分析南海地区的玄武岩年龄及分布特征,发现南海地区内的岩浆喷发活动主要集中在雨海纪至爱拉托逊纪时期,且其局部区域存在多次岩浆喷发及充填过程,但由于晚期玄武岩岩浆的喷发总量不足以覆盖早期已形成的玄武岩,导致晚期玄武岩与早期玄武岩同时存在于同一个玄武岩单元内。南海地区独特的玄武岩分布特征也与地形有关。

关键词:月球南海地区;玄武岩厚度估算;岩浆活动

中图分类号:P184 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2019)03-0271-11

月海玄武岩是月幔部分熔融喷出月表面形成的,覆盖着大约17%的月球表面,构成约1%的月壳体积^[1]。月海玄武岩的规模、成分和年龄对月球火山作用的发生时间以及月球内部的热状态具有指示作用,对了解源区和岩浆充填方式、构造和岩石圈变形及月球内部的热演化历史提供了重要的研究数据,是研究月球内部的“窗口”^[2]。因此,通过对月球玄武岩的研究,可以勾画出月海玄武岩源区的演化历史。

月海玄武岩覆盖的面积较容易被测出,但是其厚度则难以进行约束。研究月海玄武岩厚度,对进一步认识月球区域岩浆作用或火山作用的演化历史具有重要的作用,也能够为整个月球的热演化和岩浆演化提供基本的约束条件。同时,玄武岩厚度可以用以推测月球内部产生玄武岩岩浆的体积,对月球火山作用的岩浆喷发总量以及月球内部的热状态具有指示作用。

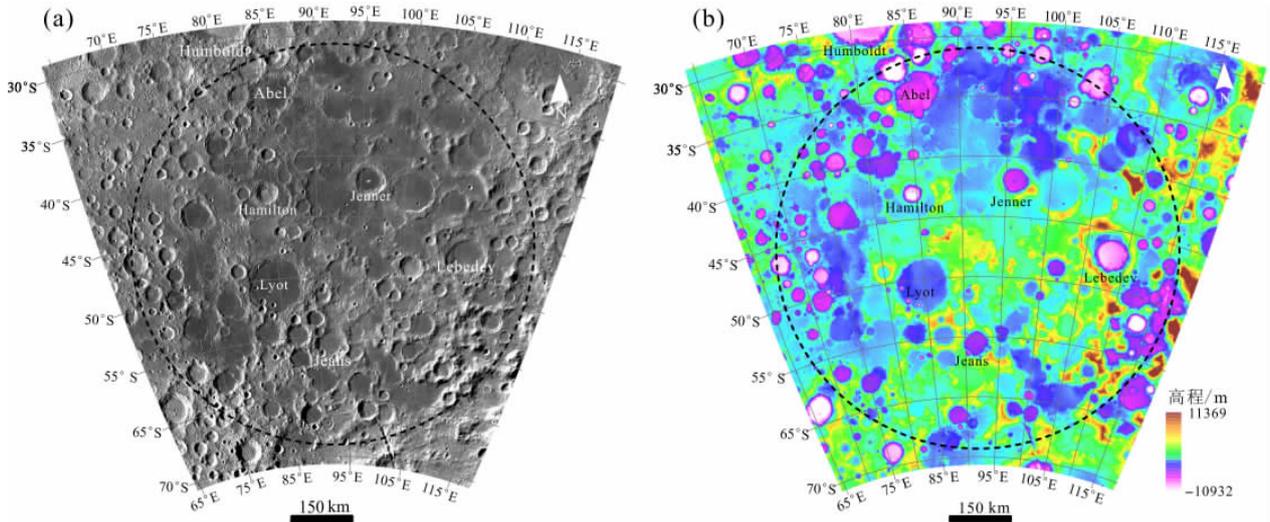
目前,国内外对月海玄武岩厚度估算方法可以分为三大类:第一类是基于几何学方法,利用撞击坑、撞击盆地,并结合地形数据、物质成分数据对玄武岩厚度进行估算^[3-9];第二类是基于地球物理方法,利用月球的重力、地震或雷达数据对玄武岩厚度进行反演^[10-14];第三类是基于地层学方法,利用区域地形剖面估算玄武岩地层的厚度,特别是地形和叠置关系很清晰的玄武岩地层的边缘^[15]。

前人利用这些方法对不同区域内的月海玄武岩厚度进行了估算,但研究范围主要集中在玄武岩呈连续分布的月海内,对呈离散分布的玄武岩研究较少。因此本文选择由多个不连续玄武岩地层组成的南海作为研究对象,结合多种方法对南

海地区内的月海玄武岩厚度进行估算,为研究南海玄武岩的形成及充填过程提供约束条件。同时,由于早期对南海内玄武岩厚度的估算主要是基于影像数据,缺乏高精度、高分辨率地形数据以及月表成分数据的支撑,因此,本文在总结前人研究的基础上,利用多源遥感数据对南海地区的月海玄武岩厚度进行估算。

1 研究区地质背景

南海(Mare Australe)位于月球的东南半球,形成于前酒海纪^[16],由多个不连续玄武岩充填的玄武岩地层组成,整体形状近似圆形(图1a)。南海的这种地形地貌特征说明在玄武岩侵入之前,其表面就遭受到了撞击,形成了数量众多的撞击坑,撞击坑被后期的玄武岩充填形成玄武岩熔岩池,从而导致其原始形貌的毁坏。但由于南海未完全被玄武岩充填,因此不连续的玄武岩地层则保留了早期月海形成的信息以及撞击盆地的形成与月海火山作用的关系。由于南海遭受陨石撞击导致其原始的盆地边界比较模糊,因此其盆地中心和直径的测定则存在多种结果^[17-20],且盆地局部位置的地形变化较大,地形最低的区域位于盆地北部,盆地东南部和南部地形相对较高,最高区域位于盆地的东南部(图1b)。南海的东南部区域与南极艾肯盆地相接,并且叠加在南极艾肯盆地外环之上,这说明南海的形成较南极艾肯盆地晚^[18],南海和南极艾肯盆地之间的高地则是由两个盆地相互作用形成的。本文选择的研究区经度和纬度范围为32°~64°S和70°~113°E,直径为997 km,中心经纬度为(48°S,92°E)(图1)。



投影方式为 Lambert_Azimuthal_Equal_Area, 投影中心为 (48°S, 92°E), 黑色虚线为南海地区边界。

图1 月球南海地区 WAC 影像图(a)与 LOLA 高程图(b)

Fig.1 WAC image (a) and LOLA DEM (b) of Mare Australe

2 数据和方法

2.1 数据

本文使用美国月球勘测轨道器 LRO (Lunar Reconnaissance Orbiter) 的宽角相机 WAC (Wide Angle Camera) 影像数据解译玄武岩分布范围, 分辨率为 100 m/pixel^[21]; 利用分辨率约为 60 m/pixel 的 LOLA (Lunar Orbiter Laser Altimeter) 地形数据分析南海地区的地形地貌特征^[22]; 使用分辨率为 200 m/pixel 的 Clementine 多光谱数据对南海地区的 FeO 含量进行反演, 用以判断高地物质^[23-24]。

2.2 方法

由于南海地区的玄武岩地层主要分布在两个地质单元内: 撞击坑内 (crater) 和撞击坑间 (intercrater)^[20]。因此, 在估算南海地区玄武岩厚度时, 需要根据地质单元的类型分别进行玄武岩厚度的估算。

2.2.1 撞击坑内玄武岩厚度估算

南海地区内绝大部分的撞击坑被玄武岩覆盖或者充填。被玄武岩覆盖的撞击坑淹没在玄武岩之下, 而被玄武岩部分充填的撞击坑还保留了退化后的坑缘甚至坑壁, 这些撞击坑形成于岩浆充填之前或者充填过程中。对于被玄武岩部分充填的撞击坑内的玄武岩厚度估算, 需要借助撞击坑深径比的关系进行 (需要假定未被玄武岩充填的撞击坑遵循撞击坑深径比关系)^[25]。因此, 根据撞击坑的形貌特征, 在估算被玄武岩部分充填的撞击坑内玄武岩厚

度时, 需要首先测定撞击坑的挖掘深度以及撞击坑坑缘到玄武岩表面的深度, 两者的差值即为撞击坑内玄武岩的厚度 (图 2)。撞击坑坑缘到玄武岩表面的深度可以借助地形数据进行直接测定, 撞击坑的挖掘深度则需要根据经验性公式进行估算。Croft^[26] 和 Melosh^[27] 认为撞击坑的最大挖掘深度 H_{exe} 与瞬时坑直径 D_t 满足如下关系:

$$H_{exe} = 0.1D_t \quad (1)$$

而瞬时坑的直径则与撞击坑的坑缘直径、坑底直径以及撞击坑深度有关, 因此玄武岩部分充填的撞击坑内玄武岩厚度可由如下公式计算获得^[9]:

$$H_b = H_{exe} - H \quad (2)$$

$$D_t = \begin{cases} 0.84D & D < 15 \text{ km} \\ (13.5D^3H / (1 + 6(1 + (D_t/D) + (D_t/D)^2)^{-1}))^{0.25} & D > 15 \text{ km} \end{cases} \quad (3)$$

式中: H_b 为玄武岩厚度; H_{exe} 为撞击坑的最大挖掘深度; H 为撞击坑坑缘至玄武岩表面的高程差即深度; D 为撞击坑的坑缘直径; D_t 为瞬时坑直径; D_t 为撞击坑的坑底直径。

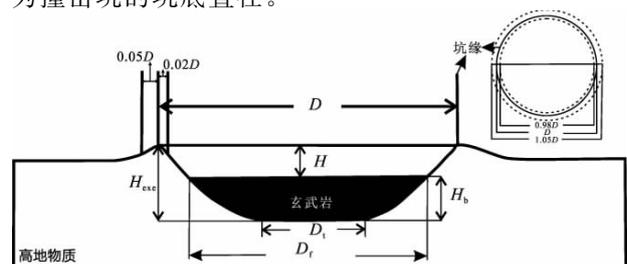
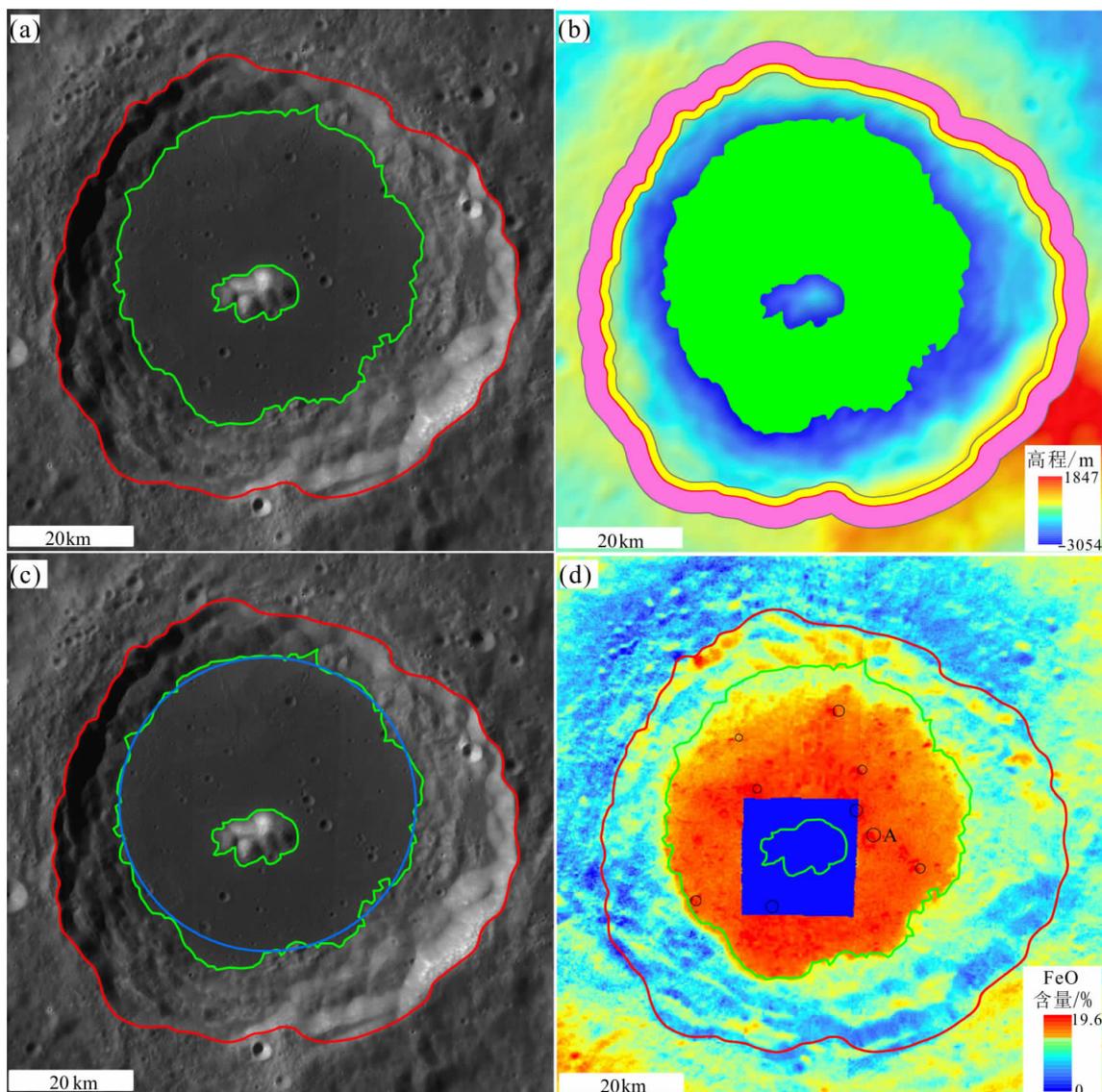


图2 撞击坑内玄武岩厚度估算示意图

Fig.2 Illustration of basalt thickness estimation of crater

本文选择南海地区具有代表性的撞击坑 Jenner (42°S, 96°E) 进行撞击坑内玄武岩厚度估算方法的说明。Jenner 是南海地区内比较典型的由玄武岩部分充填的撞击坑, 直径 D 约为 74 km, 坑壁保留较完整, 坑底由玄武岩充填, 具有中央峰, 形成于晚雨海世^[28] (图 3a)。由公式(1)和(3)可知, 计算 Jenner 撞击坑的最大挖掘深度需要首先确定撞击坑坑缘至玄武岩表面的高程差 H 和撞击坑的坑底直径 D_f 。在计算坑缘至玄武岩表面的高程差 H 时, 需要分别测定坑缘和玄武岩表面的高程。由于撞击坑的坑缘一般位于 $0.98D$ 和 $1.05D$ 的环形缓冲区内^[29], 因此利用 60 m 分辨率的 LOLA 地形数据计算坑缘的高

程时, 首先需对撞击坑坑缘进行缓冲区计算, 根据缓冲区范围测得坑缘高程的平均值, 其次测定玄武岩表面范围内的平均高程, 两者的差值即为坑缘至玄武岩表面的高程差 H (图 3b, 表 1)。对于坑底直径 D_f 的测定, 利用最小二乘法对玄武岩表面进行圆拟合, 圆的直径即为坑底直径 D_f (图 3c)。根据测得的相关变量值, 由上述公式可估算出 Jenner 撞击坑内玄武岩的厚度 (表 2), 但此时测得的厚度值为最大值即上限值, 不能较准确地说明撞击坑内玄武岩的厚度, 需要借助撞击坑内玄武岩表面上穿透玄武岩撞击坑或未穿透玄武岩撞击坑的最大挖掘深度来界定玄武岩厚度的取值范围^[15]。



a, c—WAC 影像图; b—LOLA 高程图; d—FeO 含量分布图。图中红线为撞击坑坑缘, 绿线之间的区域为玄武岩, 粉色及黄色区域为坑缘缓冲区; 图 c 中蓝线为玄武岩范围最小二乘法圆拟合边界; 图 d 中黑色圆为未穿透玄武岩撞击坑, 蓝色方形区域为无数据区。

图 3 Jenner 撞击坑内玄武岩厚度估算

Fig.3 Basalt thickness estimation of Jenner crater

表 1 Jenner 撞击坑坑缘至玄武岩表面高程差测定相关参数统计表

Table 1 Relevant parameters for elevation difference measurement from crater rim to basalt surface of Jenner crater

参数	最大值/m	最小值/m	平均值/m	标准差/m
坑缘高程	1 847	-1 591	-132.90	629.06
玄武岩表面高程	-2 065	-3 054	-2 758.41	99.66

注:坑缘至玄武岩表面高程差 $H=2.63$ km。

陨石在撞击月海玄武岩表面时会挖掘出玄武岩或高地物质。而穿透玄武岩撞击坑可以挖掘出高地物质,未穿透玄武岩撞击坑则仅能说明未挖掘出高地物质,但可以对该位置的玄武岩厚度值进行约束^[9,30-31]。如果撞击坑内存在穿透玄武岩撞击坑,则其最大挖掘深度即为该位置的玄武岩厚度;如果撞击坑内只存在未穿透玄武岩撞击坑,则计算直径最大的未穿透玄武岩撞击坑的最大挖掘深度,其深度即为玄武岩部分充填撞击坑内玄武岩厚度的最小值。

通过分析 Jenner 撞击坑玄武岩分布范围内小型撞击坑的 FeO 含量(图 3d),发现此范围内不存在穿透玄武岩撞击坑,但存在未穿透玄武岩撞击坑。因此,测定直径最大的未穿透玄武岩撞击坑最大挖掘深度(图 3d 中的撞击坑 A,直径 $D \approx 2.2$ km)就可以

求得 Jenner 撞击坑内玄武岩厚度的最小值即下限值。Jenner 撞击坑内玄武岩的厚度取值范围如表 2 所示。

2.2.2 撞击坑间玄武岩厚度估算

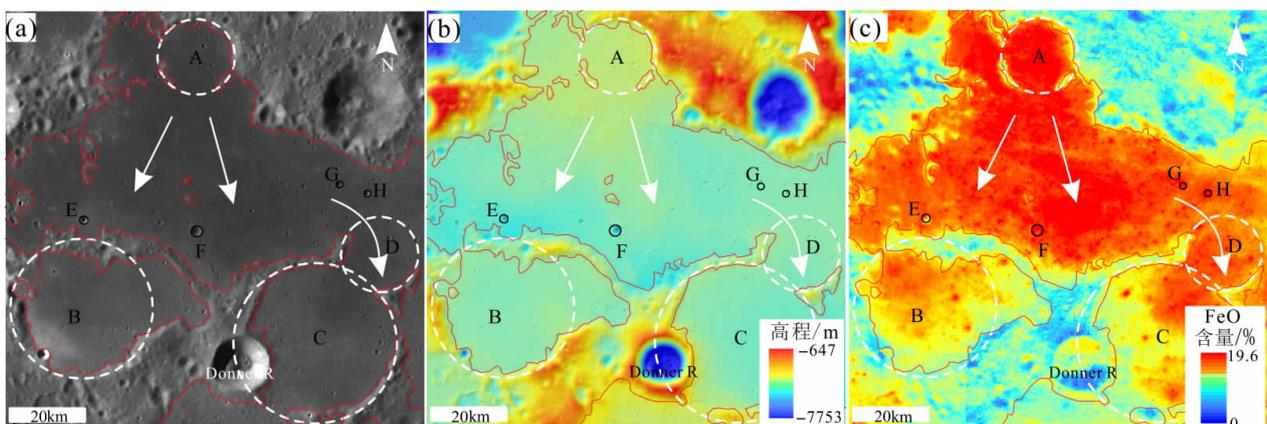
南海地区除存在分布于撞击坑内的玄武岩外,还存在连续分布的月海玄武岩地层,这些玄武岩地层主要分布在撞击坑之间。由于撞击坑之间的玄武岩呈连续分布状态,不能直接进行估算,需要结合研究区内其他类型的撞击坑(玄武岩部分充填撞击坑、穿透玄武岩撞击坑和未穿透玄武岩撞击坑)进行估算^[9,31-32]。在确定玄武岩厚度的取值范围时,根据玄武岩部分充填撞击坑的玄武岩厚度、穿透玄武岩撞击坑和未穿透玄武岩撞击坑最大挖掘深度的最大值或最小值界定玄武岩厚度区间的上下限:如果区域内存在穿透玄武岩撞击坑但其最大挖掘深度范围包含在未穿透玄武岩撞击坑的最大挖掘深度区间内,取未穿透玄武岩撞击坑最大挖掘深度区间的最小值作为玄武岩厚度的下限;如果区域内存在穿透玄武岩撞击坑但其最大挖掘深度范围超出玄武岩部分充填撞击坑的玄武岩厚度和未穿透玄武岩撞击坑的最大挖掘深度区间的最大值作为玄武岩厚度的上限。本文选择南海北部区域进行撞击坑间玄武岩厚度估算方法的说明(图 4)。

表 2 Jenner 撞击坑内玄武岩厚度估算相关变量统计表

Table 2 Relevant variables for basalt thickness estimation of Jenner crater

坑缘直径 D/km	坑缘至玄武岩 表面高程差 H/km	坑底 直径 D_t/km	瞬时坑 直径 D_i/km	撞击坑的最大 挖掘深度 H_{exe}/km	玄武岩 厚度 H_b/km	穿透玄武岩 撞击坑的最大 挖掘深度/km	未穿透玄武岩 撞击坑的最大 挖掘深度/km	玄武岩厚度 区间/km
74	2.63	49.42	43.92	4.39	1.77	—	0.18	0.18~1.77

注:—代表无此类型撞击坑,无玄武岩厚度值。



a—WAC 影像图;b—LOLA 高程图;c—FeO 含量分布图。图中红色实线为玄武岩范围,白色虚线为玄武岩部分充填撞击坑,黑色实线为穿透和未穿透玄武岩撞击坑,白色箭头为玄武岩岩浆溢流方向。

图 4 月球南海北部区域撞击坑间玄武岩厚度估算

Fig.4 Basalt thickness estimation of the intercrater in northern Mare Australe

<http://www.earthsciencefrontiers.net.cn> 地学前缘,2019,26(3)

表3 南海北部区域撞击坑间玄武岩厚度估算相关参数统计表

Table 3 Relevant parameters for basalt thickness estimation of the intercrater in northern Mare Australe

撞击坑	经纬度 / (°)	直径/km	玄武岩部分充填 撞击坑的玄武岩 厚度最大值/km	穿透玄武岩撞 击坑最大挖掘 深度/km	未穿透玄武岩 撞击坑最大挖 掘深度/km	FeO 平均 含量/%
A	32 S, 92 E	20.67	0.63	—	—	14.35
B	34 S, 91 E	37.92	1.24	—	—	10.40
C	34 S, 93 E	43.55	1.35	—	—	10.51
D	33 S, 94 E	20.66	0.62	—	—	13.59
E	33 S, 91 E	2.22	—	0.19	—	7.96
F	33 S, 92 E	2.99	—	—	0.25	15.53
G	33 S, 93 E	1.79	—	—	0.15	15.24
H	33 S, 94 E	1.80	—	—	0.15	15.35

注:—代表非此类型撞击坑,无玄武岩厚度值。玄武岩厚度区间为 0.15~1.35 km。

由图 4 可知,南海北部区域内的玄武岩反照率相对四周的高地或撞击坑坑缘及溅射物较高,地势由北向南逐渐降低,FeO 含量也由北向南逐渐减少,可以推测出玄武岩岩浆的流动方向是从北向南及东南方向流动,玄武岩岩浆的喷发位置应该位于研究区的北部。Hiesinger 等^[33]测得此区域玄武岩地质单元年龄在 3.35~3.08 Ga; Lawrence 等^[34]测得此区域内玄武岩地质单元年龄在 3.46~3.36 Ga; 它们相对于南海其他大部分区域内的玄武岩形成较晚。通过筛选研究区内的撞击坑,发现研究区内玄武岩部分充填的撞击坑主要包括 A、B、C、D 四个撞击坑,未穿透玄武岩的撞击坑主要有 F、G、H 三个撞击坑,穿透玄武岩的撞击坑则只有撞击坑 E。估算玄武岩部分充填撞击坑内的玄武岩厚度以及未穿透玄武岩撞击坑、穿透玄武岩撞击坑的最大挖掘深度可以确定南海北部区域内玄武岩厚度的取值范围(图 4,表 3)。由表 3 及撞击坑间玄武岩厚度范围界定方法,可以确定研究区内玄

武岩厚度值的变化范围为 0.15~1.35 km。

3 结果

3.1 撞击坑内玄武岩厚度

由于受太空风化等影响,分布在南海地区内的撞击坑退化较严重,其内部的玄武岩特征也发生了改变。因此,本文在选取分布在撞击坑内的玄武岩时遵循以下原则:(1)在遥感影像上,玄武岩反照率较高地物质低;(2)在地形特征上,玄武岩分布在坑缘可以识别的撞击坑内;(3)在物质成分上,玄武岩物质成分组成与高地成分区分较明显。根据上述原则以及在前人提取的月海范围的基础上^[35],本文在南海地区内选取了 76 个直径大于等于 10 km 的玄武岩部分充填撞击坑,并根据上文叙述的撞击坑内玄武岩厚度估算方法,测得撞击坑内的玄武岩厚度变化范围为 0.11~4.75 km,平均值约为 1.32 km(图 5)。

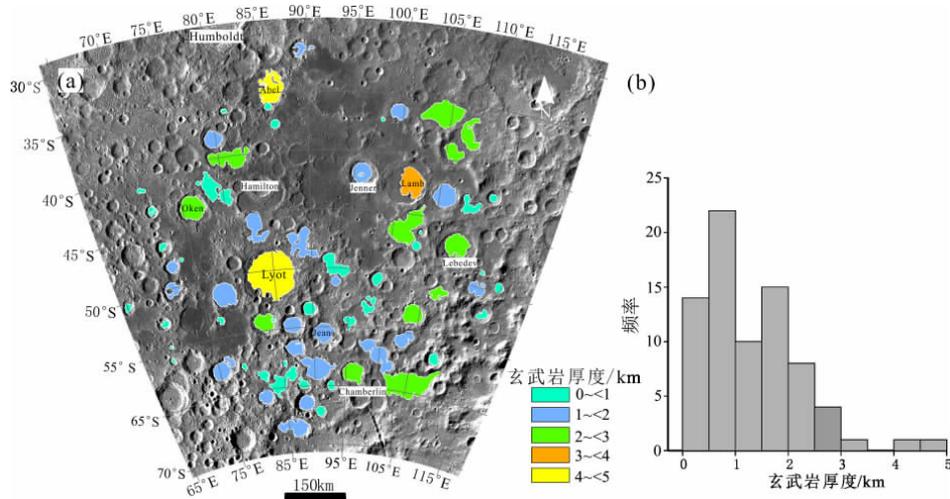


图5 撞击坑内玄武岩厚度分布图(a)与统计直方图(b)

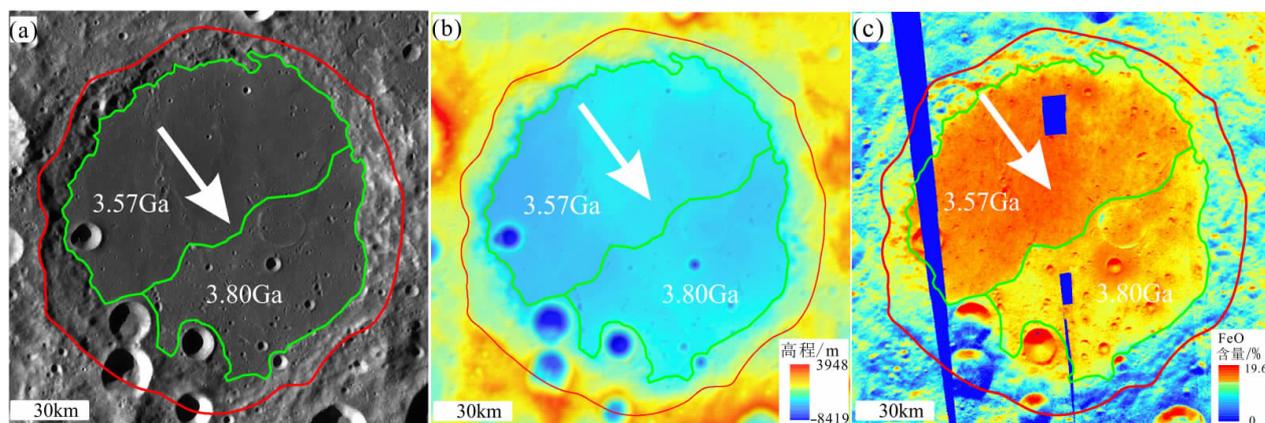
Fig.5 Basalt thickness distribution map (a) and statistical histogram of crater (b)

由图5可知(为了方便图文展示,图5中的玄武岩厚度均为最大值),南海地区撞击坑内的玄武岩主要分布在东南部和南部地形相对较高的区域,说明地形对南海玄武岩岩浆的喷发与溢流具有一定的影响,玄武岩只能充填到地势低洼的撞击坑坑底内。玄武岩厚度分布具有随机性,撞击坑内90%的玄武岩厚度在0~2.5 km,撞击坑内玄武岩厚度的最大值出现在Lyot(50°S,85°E)撞击坑内($H_b \approx 4.75$ km)(图6)。对Lyot撞击坑内的玄武岩进行分析,发现其内部存在两种类型的玄武岩单元:西北部撞击坑密度较小的玄武岩单元和东南部撞击坑密度相对较大的玄武岩单元。Hiesinger等^[33]测得这两个玄武岩单元的年龄分别为3.57 Ga和3.80 Ga,说明Lyot撞击坑内存在多次岩浆喷发及充填的过程,但由于晚期玄武岩岩浆的喷发总量不足以覆盖早期已形成的玄武岩,导致撞击坑内存在不同时期形成的玄武岩。此种情况还发生在Abel(35°S,86°E)撞击坑东部玄武岩充填的区域。

对撞击坑内玄武岩的面积、体积和年龄特征进行分析,能够进一步理解南海玄武岩岩浆喷发的强度及充填历史。因此,对撞击坑内玄武岩的面积、体积及年龄进行直方图统计(图7)。由图可知,撞击坑内97%的玄武岩分布面积集中在 $(0 \sim 5) \times 10^3$ km²,99%的体积集中分布在 $(0 \sim 0.2) \times 10^5$ km³,说明撞击坑内玄武岩受撞击坑规模的影响,其岩浆喷发总量以中小规模为主。而玄武岩形成的年龄范围在3.9~3.3 Ga^[34,36],说明南海地区撞击坑内的玄武岩充填发生在酒海纪至雨海纪之间,南海地区内的岩浆活动经历了多个阶段的喷发。

3.2 撞击坑间玄武岩厚度

南海地区内撞击坑间的玄武岩呈连续状态分布并且所占的比例较大,因此本文在对此种类型的玄武岩厚度进行估算时,选取了研究区内直径大于等于1 km的玄武岩部分充填、穿透玄武岩和未穿透玄武岩三种类型的撞击坑用于玄武岩厚度的估算。



a—WAC 影像图;b—LOLA 高程图;c—FeO 含量分布图。图中红线为撞击坑坑缘,绿线之间的区域为玄武岩,白色箭头为玄武岩岩浆溢流方向。

图6 Lyot 撞击坑内玄武岩特征

Fig.6 Characteristics of basalt in Lyot crater

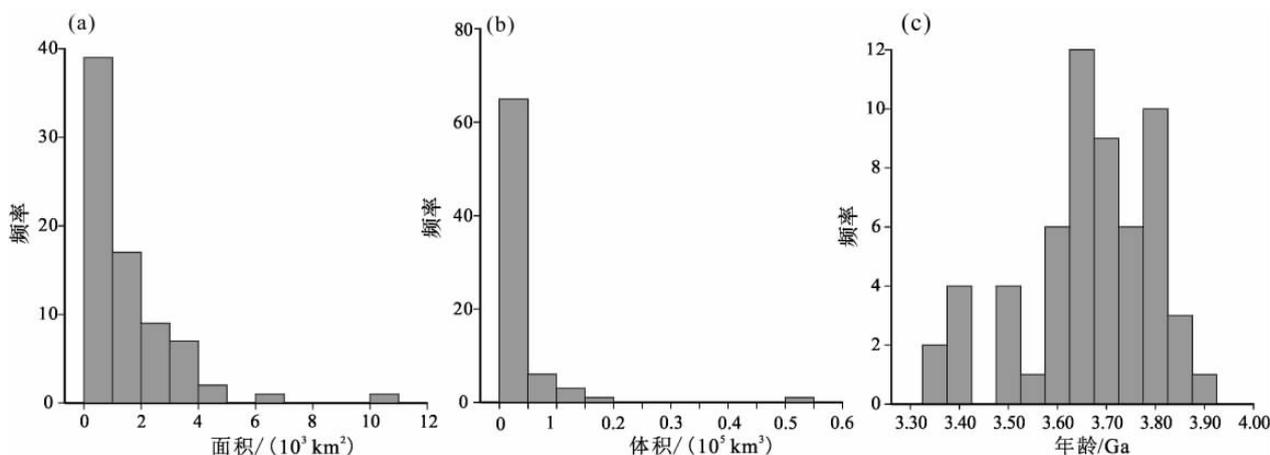


图7 撞击坑内的玄武岩出露面积(a)、体积(b)与年龄(c)统计直方图

Fig.7 Area (a), volume (b) and age (c) histogram of exposed basalt in crater

由于南海撞击坑间玄武岩厚度分布范围较广, 统一估算其玄武岩厚度会增大估算误差, 因此本文根据 FeO 含量及其分布特征将撞击坑间的玄武岩地层划分为不同的玄武岩单元(A1-A7)(图 8a), 并结合三种类型的撞击坑进行玄武岩厚度的估算, 估算结果利用反距离加权内插法(Inverse Distance Weighted, IDW)得到撞击坑间玄武岩厚度分布图^[15](图 8b)。

由玄武岩厚度分布图(图 8b)可知, 南海地区撞击坑间的玄武岩厚度变化范围为 0.01~2.18 km, 平均值约为 0.34 km, 并且玄武岩厚度分布不均一, 高值区域主要出现在玄武岩部分充填撞击坑内, 而低值区域则主要出现在玄武岩岩浆流动方向的末端或者撞击坑退化严重、撞击坑溅射物覆盖的区域。

由于各个地质单元内的玄武岩厚度及充填过程存在不同, 因此本文对撞击坑间每个玄武岩单元的

FeO 平均含量、玄武岩厚度区间及其均值、面积、体积和年龄进行了统计分析(表 4), 用以解释研究区的玄武岩特征。由表 4 可知, 玄武岩单元 A1 的玄武岩厚度和 FeO 平均含量的值最大, 形成年龄相对年轻, 说明此区域存在晚期玄武岩的充填, 晚期玄武岩与早期玄武岩都存在此玄武岩单元内。利用玄武岩的平均厚度及面积可以求出玄武岩的体积, 而根据玄武岩的体积可以推测出此单元内的岩浆喷发总量大约为 3 568.34 km³。玄武岩单元 A2 的玄武岩厚度区间较 A1 大, 估算的玄武岩出露面积大于 A2 的两倍, 其平均厚度相对小于 A1。A2 的形成年龄为 3.72 Ga, 说明此区域可能经历了晚雨海世的玄武岩岩浆充填, 但充填过程发生在 A1 之前。玄武岩单元 A3 和 A5 的玄武岩厚度平均值最小, FeO 平均含量也较低, 可以说明此区域内玄武岩厚度总体较

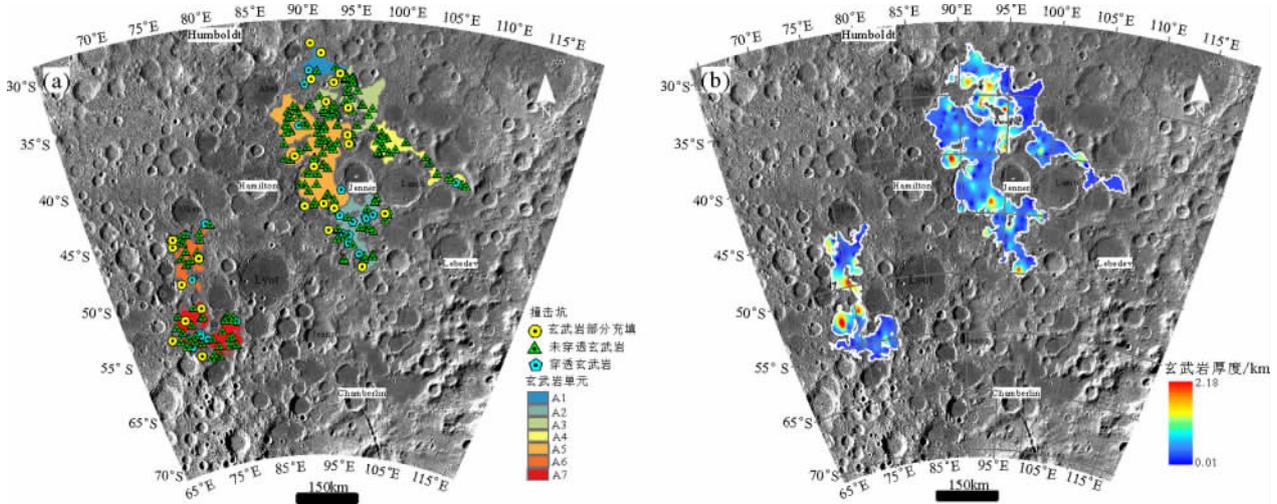


图 8 撞击坑间玄武岩单元划分(a)及玄武岩厚度分布图(b)

Fig.8 Basalt unit definition (a) and thickness distribution map (b) of intercrater

表 4 撞击坑间玄武岩厚度估算相关参数统计表

Table 4 Relevant parameters for basalt thickness estimation of intercrater

玄武岩单元	玄武岩部分充填撞击坑的玄武岩厚度区间/km	穿透玄武岩撞击坑最大挖掘深度区间/km	未穿透玄武岩撞击坑最大挖掘深度区间/km	FeO 平均含量 /%	玄武岩厚度区间 /km	玄武岩厚度均值 /km	玄武岩面积/km ²	玄武岩体积/km ³	玄武岩单元年龄 /Ga *
A1	0.63~1.35	0.19	0.15~0.25	13.02	0.15~1.35	0.55	6 487.89	3 568.34	3.10
A2	1.35~2.33		0.02~0.63	11.67	0.02~2.33	0.34	14 237.10	4 840.62	3.72
A3		2.38	0.02~1.12	10.75	0.02~2.38	0.26	10 430.64	2 711.97	3.83
A4	0.56~1.89	0.16~0.61	0.01~1.47	12.02	0.01~1.89	0.35	33 170.55	11 609.69	3.80
A5	0.93~1.46	0.06~0.19	0.01~0.89	9.90	0.01~1.46	0.26	13 321.95	3 463.71	3.81
A6	0.80~1.10	0.28~1.53	0.03~0.73	12.52	0.03~1.53	0.43	9 243.41	3 974.66	3.78
A7	0.26~2.20	0.19~0.40	0.04~1.05	12.76	0.04~2.20	0.32	14 129.64	4 521.48	3.71

注: * 表示利用 CSFD(Crater Size Frequency Distribution)方法以及 CraterTools 和 CraterStats2 进行年龄测定^[37]。

薄,推测可能因其为熔岩溢流方向末端的一部分或者由太空风化、撞击溅射物覆盖导致。玄武岩单元 A4 的体积最大,但 A3、A4、A5 的玄武岩年龄相接近,说明这三个玄武岩单元可能形成于同一时期; A6、A7 的玄武岩厚度和体积较接近,形成年龄相近,说明这两个单元内的岩浆喷发及充填过程相类似,同时 A6、A7 分布在南海的西南部,说明其玄武岩岩浆源区可能属于同一个区域。

4 讨论

4.1 玄武岩体积

利用上文叙述的玄武岩厚度估算方法,本文测得南海地区玄武岩厚度的变化范围为 0.01~4.75 km。Whitfordstark^[4]测得玄武岩厚度范围在 0.02~4.0 km,与本文的研究结果相接近。但值得注意的是,由于撞击坑的退化等原因,Whitfordstark^[4]和本文测得的玄武岩厚度皆为最大值,在一定程度上能为南海地区内玄武岩喷发的体积提供约束。

利用玄武岩厚度和其分布面积可以对南海地区内出露的玄武岩体积进行估算,而玄武岩体积可以说明研究区内玄武岩源区月幔熔融后喷出月表的岩浆总量。本文测得南海地区撞击坑内的玄武岩厚度变化范围为 0.11~4.75 km,平均值约为 1.32 km,出露面积在 57.06~10 791.66 km²,由此估算出撞击坑内玄武岩的出露体积在 10.25~51 260.38 km³;而撞击坑间的玄武岩厚度变化范围为 0.01~2.18 km,平均值约为 0.34 km,出露面积在 6 487.89~33 170.55 km²,由此估算出撞击坑间玄武岩的出露体积为 2 711.97~11 609.69 km³。因此,统计撞击坑内与撞击坑间的玄武岩厚度、面积及体积,得出南海地区出露的玄武岩平均厚度约为 600 m,总面积约为 2.12×10⁵ km²,玄武岩的总体积大约为 2.71×10⁵ km³。而 Whitfordstark 测得南海地区内月海玄武岩地层的覆盖面积为 3.2×10⁵ km²,平均厚度约为 750 m,总体积约为 2.4×10⁵ km³;Hiesinger 等^[38]测得南海地区内的玄武岩地层面积达到 2.43×10⁵ km²,约为盆地表面积 40%;Gills^[20]测得南海地区内的玄武岩地层面积达到 1.89×10⁵ km²,约为盆地表面积三分之一。本文的研究与他们的结果基本一致,但存在一定的差异。原因可能是 Whitfordstark 在测定南海的玄武岩厚度时,只测量了 95 个形态特征类似第谷撞击坑内的玄武岩厚度,并以此分析整个南海地

区玄武岩的厚度,但由于南海的玄武岩不仅分布在撞击坑内还分布在撞击坑间,同时由于撞击坑退化较严重,因此只用较新鲜的撞击坑进行厚度估算误差会增大。Hiesinger 等^[38]和 Gills^[20]利用 Clementine 数据对南海地区进行分析,但因限于数据分辨率,其结果误差也会相对较大。而本文通过利用高分辨的地形数据和物质成分数据对撞击坑内及撞击坑间的玄武岩厚度进行估算,结果误差相对较小,由此估算的玄武岩厚度值相对精确。

4.2 岩浆活动

本文通过研究南海地区玄武岩厚度,发现晚期玄武岩岩浆的喷发主要发生在地势相对低的区域,这说明地形对玄武岩侵位具有一定的影响。通过计算南海地区的高程发现其西北部的平均高程比东南部低 1~2 km,与南部和东部相比,玄武岩地层多分布在盆地北部和西部区域,并且南部区域的玄武岩地层主要集中分布在撞击坑坑底内。然而,与其他月海盆地中心内部充满玄武岩地层相比,南海中心的玄武岩地层则很少,并且盆地中心的高程较高,地势向盆地北部和西部逐渐降低,而理想撞击盆地的地形最低点应该在盆地中心或者中心周围,高程则随着远离中心而逐渐增加^[39]。南海形成此种地形可能是由于后期玄武岩充填作用改变了盆底特征,同时大量的撞击作用形成了不规则、粗糙的高地,这些高地覆盖了大部分原始的南海,因此在后期的岩浆活动喷发及充填过程中,南海的地形特征对形成南海玄武岩分布的独特特征产生了较大的影响。

对于南海地区玄武岩岩浆喷发及岩浆活动的持续时间,前人已经做过一定的研究。Whitfordstark^[4]认为南海岩浆活动至少经历了从早雨海世到爱拉托逊纪 4 个主要阶段,如果岩浆活动持续进行,南海形态应与月球正面的月海盆地相似^[2]。由于月海与盆地形成有关,因此南海岩浆活动的缺乏可以说明盆地早期的岩浆充填作用较弱。Gills^[20]利用 Clementine 和 Lunar Orbiter 数据,通过分析玄武岩地层表面反照率的变化以及撞击坑密度来测定玄武岩单元的相对年龄,认为南海的玄武岩地层形成于雨海纪到爱拉托逊纪之间,且多为玄武岩岩浆喷发溢流形成,同时岩浆喷发具有溢流速度快的特点,快速流动的岩浆覆盖了喷发地。因此根据南海的喷发特点能够推测出溢流式玄武岩岩浆喷发是早期盆地玄武岩充填的普遍方式,而晚期玄武岩岩浆的喷发则可能形成类似于东海盆地的玄武岩充填^[40]。Hiesing-

er 等^[20]利用 Lunar Orbiter IV 影像图测得南海玄武岩地层的年龄在 3.91~3.08 Ga; Lawrence 等^[35]利用 LRO 影像图测得南海玄武岩地层形成的模式年龄在 4.1~3.1 Ga, 经历了从前酒海纪至晚雨海世时期的演化。而本文利用分辨率为 100 m/pixel 的 WAC 影像数据与 CSFD 方法以及 CraterTools 和 CraterStats2 测得南海地区玄武岩地层形成的模式年龄在 3.88~3.10 Ga, 即形成于前酒海纪至爱拉托逊纪时期。结合前人的研究成果及本文获得的研究结果, 认为南海地区的岩浆活动主要集中发生在雨海纪至爱拉托逊纪时期。

5 结论

本文利用多源遥感数据, 结合撞击坑的形貌特征和月坑挖掘深度法对南海地区撞击坑内 (crater) 和撞击坑间 (intercrater) 的玄武岩厚度进行了估算, 同时对南海地区的玄武岩体积及岩浆活动做了简要讨论, 主要得出以下结论:

(1) 根据玄武岩地层的分布特征及充填类型, 利用高分辨的遥感影像数据、地形数据和物质成分数据对撞击坑内及撞击坑间的玄武岩厚度进行估算, 结果误差相对较小, 由此估算的玄武岩厚度值相对精确。

(2) 南海地区玄武岩厚度的变化范围在 0.01~4.75 km, 平均厚度约为 600 m, 玄武岩出露的总面积约为 $2.12 \times 10^5 \text{ km}^2$, 总体积约为 $2.71 \times 10^5 \text{ km}^3$ 。

(3) 南海地区内的岩浆喷发活动主要集中发生在雨海纪至爱拉托逊纪时期, 且其局部区域存在多次岩浆喷发及充填过程, 但由于晚期玄武岩岩浆的喷发总量不足以覆盖早期已形成的玄武岩, 导致晚期玄武岩与早期玄武岩同时存在同一个玄武岩单元内。南海地区独特的玄武岩分布特征也与地形有关。

本文在酝酿、成文过程中, 得到了国家天文台陈媛博士的帮助, 在此表示衷心的感谢。同时感谢审稿人的意见和建议, 对于完善本文具有重要的意义。

参考文献

- [1] HEAD J W. Lunar volcanism in space and time[J]. *Reviews of Geophysics*, 1976, 14(2): 265-300.
- [2] SOLOMON S C, HEAD J W. Lunar Mascon Basins: lava filling, tectonics, and evolution of the lithosphere[J]. *Reviews of Geophysics & Space Physics*, 1980, 18(1): 107-141.
- [3] DEHON R A. Thickness of western mare basalts[C]// *The Woodlands*. Tou Texas, USA: LPSC, 1979: 2935-2955.
- [4] WHITFORDSTARK J L. Charting the Southern Seas: the evolution of the Lunar Mare Australe[J]. *Lunar & Planetary*, 1979, 10: 2975-2994.
- [5] HEAD J W. Lava flooding of ancient planetary crusts: geometry, thickness, and volumes of flooded lunar impact basins[J]. *Moon & the Planets*, 1982, 26(1): 61-88.
- [6] YINGST R A, HEAD J W. Volumes of lunar lava ponds in South Pole-Aitken and Orientale Basins: implications for eruption conditions transport mechanisms, and magma source regions[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(E5): 10909-10931.
- [7] BUDNEY C J, LUCEY P G. Basalt thickness in Mare Humorum: the crater excavation method[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 1998, 103(E7): 16855-16870.
- [8] HIESINGER H, HEAD J W, WOLF U, et al. Lunar mare basalt flow units: thicknesses determined from crater size-frequency distributions[J]. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(8): 891-894.
- [9] THOMSON B J, GROSFILS E B, BUSSEY D B J, et al. A new technique for estimating the thickness of mare basalts in Imbrium Basin[J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, 36, L12201.
- [10] TALWANI M, THOMPSON G, DENT B, et al. Traverse gravimeter experiment[C]// *Apollo 17: preliminary science report*. Washington DC: NASA, 1973: 13.
- [11] SHARPTON V L, HEAD J W. Stratigraphy and structural evolution of Southern Mare Serenitatis: a reinterpretation based on Apollo Lunar Sounder experiment data[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1982, 87(B13): 10983-10998.
- [12] 刘万崧, 陈圣波, 于岩, 等. 月球风暴洋地区玄武岩厚度的重力研究[J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 102-106.
- [13] EVANS A J, SODERBLOM J M, ANDREWS-HANNA J C, et al. Identification of buried lunar impact craters from GRAIL data and implications for the nearside maria[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43(6): 486-494.
- [14] GONG S, WIECZOREK M A, NIMMO F, et al. Thicknesses of mare basalts on the Moon from gravity and topography[J]. *Journal of Geophysical Research Planets*, 2016, 121(5): 854-870.
- [15] 陈媛, 蒋云, 张迅与, 等. 雨海晚期玄武岩的规模研究[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2016, 46(2): 29604.
- [16] WILHELMS D E, MCCAULEY J F, TRASK N J. The geologic history of the Moon[M]. Washington DC: US Geological Survey, 1987.
- [17] GILLIS J J, JOLLIFF B L. An analysis of remotely sensed data of Mare Australe[R]// *The Moon beyond 2002: next*

- steps in lunar science and exploration. New Mexico: Lunar and Planetary Institute, 2002.
- [18] STUART-ALEXANDER D E, HOWARD K A. Lunar Maria and circular basins: a review[J]. *Icarus*, 1970, 12(3): 440-456.
- [19] WILHELMS D E, EL-BAZ F. Geologic map of the eastern limb of the Moon[CM] // USGS Map I-948. Washington DC: Department of the Interior United States Geological Survey, 1977: 134-157.
- [20] GILLIS J J. The composition and geologic setting of mare deposits on the far side of the Moon[D]. Houston, Texas: Rice University, 1998.
- [21] ROBINSON M S, BRYLOW S M, TSCHIMMEL M, et al. Lunar Reconnaissance Orbiter Camera (LROC) instrument overview[J]. *Space Science Reviews*, 2010, 150(1/2/3/4): 81-124.
- [22] SMITH D E, ZUBER M T, NEUMANN G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) [J]. *Geophysical Research Letters*, 2015, 37(18): 109-118.
- [23] NOZETTE S, RUSTAN P, PLEASANCE L P, et al. The Clementine mission to the Moon: scientific overview[J]. *Science*, 1994, 266(5192): 1835-1839.
- [24] LUCEY P G, BLEWETT D T, JOLLIFF B L. Lunar iron and titanium abundance algorithms based on final processing of Clementine ultraviolet-visible images[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2000, 105 (E8): 20297-20305.
- [25] WILLIAMS K K, ZUBER M T. Measurement and analysis of lunar basin depths from Clementine altimetry[J]. *Icarus*, 1998, 131(1): 107-122.
- [26] CROFT S K. Cratering flow fields: implications for the excavation and transient expansion stages of crater formation[C] // The Woodlands. Texas, USA: LPSC, 1980: 2347-2378.
- [27] MELOSH H J. *Impact cratering: a geologic process*[M]. Oxford: Oxford University Press, 1989.
- [28] LOSIAK A, WILHELMS D E, BYRNE C J, et al. A new lunar impact crater database[C] // The Woodlands. Houston, Texas, USA: LPSC, 2009: 1532.
- [29] KALYNN J, JOHNSON C L, OSINSKI G R, et al. Topographic characterization of lunar complex craters[J]. *Geophysical Research Letters*, 2013, 40(1): 38-42.
- [30] 凌宗成, 刘建忠, 张江, 等. 基于“嫦娥一号”干涉成像光谱仪数据的月球岩石类型填图: 以月球雨海—冷海地区(LQ-4)为例[J]. *地学前缘*, 2014, 21(6): 107-120.
- [31] 籍进柱, 刘建忠, 张莉, 等. 云海地区月海玄武岩厚度估算[C] // “月球·行星·科学与探测”学术研讨会论文集. 贵阳: 中国科学院地球化学研究所, 2014: 48-50.
- [32] 籍进柱, 刘建忠, 郭弟均, 等. 云海撞击盆地的恢复及其地质演化研究[J]. *岩石学报*, 2016, 32(1): 127-134.
- [33] HIESINGER H, JAUMANN R, NEUKUM G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2000, 105(1959): 15-41.
- [34] LAWRENCE S J, STOPAR J D, OSTRACH L R, et al. Remote sensing and geologic studies of Mare Australe: the North Australe region[C] // The Woodlands. Houston, Texas, USA: LPSC, 2017: 1844.
- [35] NELSON D M, KOEBER S D, DAUD K, et al. Mapping lunar maria extents and lobate scarps using LROC image products[C] // The Woodlands. Houston, Texas, USA: LPSC, 2014: 2861.
- [36] LAWRENCE S J, STOPAR J D, JOLLIFF B L, et al. Characterizing mare deposits in the Australe region[C] // The Woodlands. Houston, Texas, USA: LPSC, 2015: 2739.
- [37] 李珂, 陈建平. 基于撞击坑自动识别的月球雨海北部地区(LQ-4)月海玄武岩定年研究[J]. *地学前缘*, 2012, 19(6): 47-59.
- [38] HIESINGER H, JAUMANN R, NEUKUM G, et al. Mare Australe: new results from Lunar Orbiter and Clementine UV/VIS Imagery[C] // The woodlands. Houston, Texas, USA: LPSC, 1996: 545-546.
- [39] SPUDIS P D. *The geology of multi-ring impact basins*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1993.
- [40] GREELEY R. Modes of emplacement of basalt terrains and an analysis of mare volcanism in the Orientale Basin[C] // The Woodlands. Houston, Texas, USA: LPSC, 1976: 2747-2759.