

doi:10.13745/j.esf.2014.06.006

# 月球地质年代学研究方法及月面历史划分

郭弟均<sup>1,2</sup>, 刘建忠<sup>2,\*</sup>, 张莉<sup>2</sup>, 籍进柱<sup>1,2</sup>, 刘敬稳<sup>1,2</sup>, 王梁<sup>3</sup>

1. 中国科学院大学, 北京 100014

2. 中国科学院地球化学研究所月球与行星科学研究中心, 贵州 贵阳 550002

3. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037

GUO Dijun<sup>1,2</sup>, LIU Jianzhong<sup>2,\*</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, JI Jinzhu<sup>1,2</sup>, LIU Jingwen<sup>1,2</sup>, WANG Liang<sup>3</sup>

1. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100014, China*

2. *Lunar and Planetary Science Research Center, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*

3. *Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China*

GUO Dijun, LIU Jianzhong, ZHANG Li, et al. The methods of lunar geochronology study and the subdivisions of lunar geologic history. *Earth Science Frontiers*, 2014, 21(6):045-061

**Abstract:** The dating methods of relative age and absolute age of lunar stratigraphic units are summarized. There are four ways to establish the relative age: the geological law of superposition, crater size-frequency distribution, crater morphology as degradation, and soil maturity, whereas the absolute age can be determined only by isotopic geochronology or lunar cratering chronology. To better know about the lunar stratigraphic subdivisions presently used, the formation and evolution of the stratigraphic units are reviewed here. Based on the analysis of the established lunar stratigraphic subdivisions and lunar evolution theory, we suggest that use the term Eolunarisan Eon for representation of the lunar history when endogenic process dominated, that use the term Paleolunarisan Eon for the lunar history when endogenic process and exogenic process were both weighty, and that use the term Neolunarisan Eon for the lunar history when exogenic process dominated. And we propose that the pre-Nectarian Period could be substituted by pre-Aitkenian Period and Aitkenian Period, and the two periods are divided by the impact event forming south pole-aitken basin. The pre-Aitkenian Period was included in Eolunarisan Eon, while the Aitken Period represents the early stage of Paleolunarisan Eon, during which the impact event was the most typical geologic process. This kind of modified subdivisions not only corresponds to the lunar dynamic evolution rule, but also provides convenience for the study of lunar farside.

**Key words:** geochronology; stratigraphic unit; south pole-aitken basin; the Aitkenian Period

**摘要:**介绍了确定月球地层单元相对年龄和绝对年龄的方法。建立相对年龄的方法主要有4种:地层叠置法、撞击坑大小-频率分布统计法、撞击坑形态法和月壤成熟度法;研究绝对年龄的方法有两种:样品的同位素测年法和月球成坑计年法。回顾了现用月球层序划分的形成及发展过程,在此基础上,提出了改善月球年代划分的建议,分别用冥月宙、古月宙和新月宙表示月球内动力地质作用为主的时期、内外动力地质作用共同作用的时期和外动力地质作用为主的时期。推荐以南极艾肯盆地的形成为界线,将前酒海纪划分为前艾肯纪和艾肯纪,分别表示月球内动力地质作用为主的演化期和内外动力地质作用并重的演化初期。这种改进后的“三宙六纪”的月球年代划分既可以形成逻辑上更符合月球动力学演化过程的月球年代划分,同时又有助于开展在月球背面的地质研究。

**关键词:**地质年代学;地层单元;南极艾肯盆地;艾肯纪

**中图分类号:**P184 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2014)06-0045-17

收稿日期:2014-07-22;修回日期:2014-08-04

基金项目:国家自然科学基金项目(41373068)

作者简介:郭弟均(1988—),男,博士研究生,地球化学专业,从事行星遥感地质研究。E-mail:guodijun@mail.gyig.ac.cn

\*通讯作者简介:刘建忠(1968—),男,研究员,博士生导师,从事深空探测及比较行星学研究。E-mail:liujz@nao.cas.cn

月球的年代学研究既是一个复杂的系统性工程, 又是一个在行星科学中极重要的基础性研究工作, 有助于揭示月球的形成及演化规律, 月质事件的发生过程。月球上地层划分主要是沿地球上地层划分的基本原理, 然而与地球相比, 对月球进行年代研究和层序划分具有很大的挑战。首先, 在 Apollo 11 号任务成功之前地球上都没有来自月球确定地点的岩石土壤样品可供研究, 而通过历次探月任务从月球返回的样品分布范围有限, 不能代表整个月表的情况; 其次, 无法对月球进行现场的地质调查, 而早期地基观测和空间探测得到的数据质量不高且覆盖范围小; 此外, 月球是一个无生命的星球, 缺少类似地球上以生物化石为线索的年代学研究和地层划分。

尽管 1609 年伽利略发明望远镜之后人类就开始了对于月球的系统观测, 但直到 1949 年才有了哈巴科夫对月面年代划分的第一个系统性研究成果<sup>[1]</sup>。为了满足当时即将开展的月球探测任务和月球地质填图的需要, 1962 年美国地质调查局 (USGS) 的 Shoemaker 和 Hackman 根据威尔逊山天文台得到的哥白尼区域影像图, 主要以地层叠置关系研究出了如今国际上通用的月球相对年代划分的雏形<sup>[2]</sup>, 为后期的年代学研究提供了基本参考标准。随着 20 世纪六七十年代人类探月步法的加快, 最初的月球层序被多次改善并根据返回样品的同位素定年数据加入了绝对年龄, 形成了目前普遍使用的五分法月球地质年表<sup>[3-8]</sup>。在此期间, 也有许多其他建立月面地层层序的尝试, 形成了一些划分方式<sup>[1]</sup>, 但是没有被普遍接受并沿用下来。借助于 USGS 开展的一系列月球地质编图工作成果, 五分法的月球年代划分已被普遍接受并广泛使用, 但在一些方面还有待改进, 主要表现在两个方面: (1) 没有考虑月球演化的驱动力变化过程; (2) 雨海纪—爱拉托逊纪和爱拉托逊纪—哥白尼纪缺少地层界线。

尽管还不算完美, 但通过几十年的努力, 对于月球年代学的研究已形成了很多比较成熟的理论和研究方法。近 20 年来, 人类探月的热情正被重新点燃, 一大批新的月球探测器传回了前所未有的优质数据, 数据分辨率高、覆盖范围广、重复观测次数多。这些新的探测数据给了我们深度挖掘月球演化规律和月球地质过程的机会, 为了充分整合已有的探月数据并为接下来的探月计划铺路, 我们适时地开展了月球地质填图的工作。

借助于月球地质填图的机会, 我们重新审视了 30 多年来未做改进的月面历史划分方案, 提出了部分补充意见。本文首先综述了月球地质年代学研究可使用的方法以及现在普遍采纳的“五分法”月面历史划分的形成过程。由于现用的月面历史划分没有充分反映月球演化的动力学过程, 因此我们提出以月球上最古老的盆地——南极艾肯盆地为界线, 将前酒海纪分割为艾肯纪和前艾肯纪, 以在逻辑上与月球的动力学演化过程相适应, 并有助于月球背面的年代学研究。

## 1 月球地层单元的类型

“地层学”一词来源于拉丁语 *stratum*(层)和拉丁语 *graphia*(描绘), 它历来被认为是有关岩层的描述性科学词汇<sup>[9]</sup>。月球上地层划分的基本原理与地球上的地层划分相似。根据《国际地层指南》<sup>[9]</sup>的定义, 正式的地层单元类型包括人们最熟悉的岩石-地层单元、生物-地层单元、时间-地层单元, 以及较少使用的不整合界定单元、磁性地层极性单元。岩石-地层单元是依据岩石体的特性划分的地层单元; 生物-地层单元是依据岩石体所含化石划分的地层单元; 时间-地层单元是依据岩石体形成的时间划分的地层单元(表 1)<sup>[9]</sup>。形成时间-地层单元的地质时间间隔为地质年代单元, 它是一个时间单元而不是一个岩石体, 因而不是一个地层单元, 而每一个时间-地层单元代表一个地层体, 其沉积时限就是一个地质年代单元<sup>[9-10]</sup>。这 3 类地层划分在时间和空间上是相互联系的, 不过, 显然对于月球的地层分类不包括生物-地层单元, 只能研究岩石-地层单元和时间-地层单元及其时间单元——地质年代单元。

岩石-地层单元是地质填图的基本单元, 也是区域地层学的基本要素, 其中组(formation)又是岩石地层分类中基本的正式单元, 用于区域的地质填图、描述及解释, 组的重要特征是具有岩性、岩相或变质程度的一致性。几乎每个岩石-地层单元都是在一个特定的地质时间间隔内形成的, 它不仅具有岩石学意义, 而且还有年代地层学意义, 是月球上进行时间-地层单元划分的依据之一。一个时间-地层单元的顶底岩石-地层单元可以限定该时间-地层单元的地质时间间隔。Shoemaker 和 Hackman<sup>[2]</sup>建立月球地层年代划分时就是以各个时

表 1 地层分类的类型及单元术语总表<sup>[9]</sup>Table 1 Summary of categories and unit-terms in stratigraphic classification<sup>[9]</sup>

地层分类的类型	主要的地层单元术语	地质年代单元(时间单元)
岩石-地层单元	群(Group) 组(Formation) 段(Member) 层, 岩流层(Bed, Flow)	
生物-地层单元	延伸带(Range zones) 间隔带(Interval zones) 种系带(Lineage zones) 组合带(Assemblage zones) 富集带(Abundance zones) 其他类型的生物带(Other kinds of biozones)	
时间-地层单元	宇(Eonothem) 界(Erathem) 系(System) 统(Series) 阶(Stage) 亚阶(Substage) (时间带)	宙(Eon) 代(Era) 纪(Period) 世(Epoch) 期(Age) 亚期(或期)(Subage) (时)

注: 在月球地层类型中, 不包括生物地层单元, 岩石-地层单元主要使用建造(Formation)划分, 指在时间和空间上彼此有密切联系的各种天然岩石组合, 时间-地层单元采用系(System)为基本划分单元, 相应的地质年代单元为纪(Period)。

间-地层单元中岩石地层的特征、相互关系以及月球地质演化规律为依据的。在地球上, 岩石-地层单元可以通过岩石组分、物理特性(导电性、放射性、密度、声学及其他推断的或实测的物理性质为基础)、古生物、岩性特征、地层位置等进行识别。而对于月球, 只能借助于地基观测或卫星遥感探测的数据, 通过月球表面成分的物象特征(例如形态、表面光滑程度、相对高差和展布模式等)和光学性质(如偏光性和反照率)等进行月表岩石-地层单元的识别。因为月球上的地层没有地球上岩石地层单元中特定的层序结构, 因此, 在月球岩石地层的分类中, 通常把地球上的基本单元“组”(Formation)称作“建造”(Formation)。

地层单元年龄包括相对年龄和绝对年龄的确定, 相对年龄是指各类地质事件发生的先后顺序, 绝对年龄是指各地质事件发生的距今年龄, 这两方面结合才能构成对地质事件及月球、月表演变过程的完整认识, 地质年代正是在此基础上建立起来的<sup>[11]</sup>。最初划分的月球地质年代只有相对年龄, 随后 Apollo 计划和 Luna 计划带回了月球的样品, 对这些样品的同位素年龄测定及根据同位素年龄和撞击坑统计建立的月球成坑计年补充了月球地层年代单元的绝对年龄。

## 2 月球地质年代学的研究方法

### 2.1 相对定年

(1) 地层叠置法。因为不同期次的月坑形成时产生的大范围溅射物堆积层相互覆盖, 以及月球盆地形成之后发生月海玄武岩充填作用, 地层叠置法是在月球上使用最广泛的相对年代划分方法。该方法最早由丹麦地质学家斯坦诺提出, 他根据意大利北部山脉的野外观察, 于 1669 年提出著名的“地层三定律”, 又称地层叠覆律: ①叠层律, 地层未经变动时则上新下老; ②原始连续律, 地层未经变动时则呈横向连续延伸并逐渐尖灭; ③原始水平律, 地层未经变动时则呈水平状。

Shoemaker 和 Hackman<sup>[2]</sup> 针对哥白尼坑周围区域进行了先驱性的地质填图, 并应用地层叠覆律原理划分了月球地层年代。他们划分时代新老的原则是: 如果两个岩层相比较, 甲覆盖乙, 或甲侵入乙, 或甲切割乙, 或甲的起伏比乙剧烈, 或甲的撞击坑密度以及月尘厚度比乙小, 那么甲单元就比乙单元年轻<sup>[1-2]</sup>。地层叠置法是月球相对计年最基本最可靠的方法<sup>[12]</sup>, 在月面历史划分和月球地质填图中意义重大。

(2) 撞击坑大小-频率分布统计法。作为月球上最典型的地貌特征, 月球撞击坑曾被 McGill<sup>[13]</sup> 比作

月球上的“化石”, 足见其对于认识月球演化和月球地质进程的重要意义。根据 Arvidson 等<sup>[14]</sup> 的报道, 撞击坑的统计分析可以解决 3 个方面的问题: ①理解行星年代并对地质单元和地质事件定年; ②认识行星表面及次表面过程; ③提供一个解释其他数据的框架。通过统计撞击坑的大小-频率分布 (Size-Frequency Distribution, SFD) 定年的基本原理是: 在同一个天体表面, 原始撞击坑密度越大的区域, 年龄越老<sup>[15]</sup>。它建立在两个假设之上: ①撞击坑的形成在地理上是随机分布的; ②撞击坑被破坏的速度远小于新撞击坑形成的速度<sup>[13]</sup>。

由于我们关于月球的资料主要是望远镜观测和遥感探测的数据, 所以利用统计撞击坑分布的方法划分地层年代是一项很有应用价值的工作, 很多研究者进行了早期的努力<sup>[16-21]</sup>, 然而他们大多数关注的是月球的绝对定年, 只有少数人将撞击坑频率作为地层指示<sup>[22]</sup>。Dodd 等<sup>[22]</sup> 对于利用撞击坑分布确定月球绝对年龄的方法提出了质疑, 认为这些研究对于月球历史上撞击通量变化以及其他影响撞击坑统计准确度的因素考虑不足, 他提出利用撞击坑大小-频率分布识别地层相对年代, 得到了认可和应用<sup>[8, 13, 15, 23-27]</sup>。

早期使用撞击坑大小-频率分布统计的实践由于没有统一的操作标准, 使得统计结果千差万别, 也没有可比性, 于是 1977 年 USGS 成立了一个专门标准化撞击坑大小-频率分布统计的工作小组。Arvidson 等<sup>[14]</sup> 报道了该小组的部分研究成果, 主要介绍了撞击坑统计算法的两种表达形式, 包括累积分布表示法 (图 1) 和相对分布表示法 ( $R$ -投点图) (图 2)。月坑的累积分布有哈特曼产率函数 (Hartmann Production Function, HPF)<sup>[23, 26, 28]</sup> 和诺伊康产率函数 (Neukum Production Function, NPF)<sup>[15, 29-30]</sup> 两种计算方法, 分别用幂函数和多项式函数计算, 关于这两种计算方法的比较, Neukum 等<sup>[27]</sup> 做了详细的分析。相对分布提供的是由基础幂定律求得的变差, 依据直径的有限增量来计算<sup>[12]</sup>。累积分布较相对分布算法简单, 且能与撞击坑生产方程相结合, 获取绝对模式年龄, 但采用相对分布表示法能够突出撞击坑的大小-频率分布规律, 精确地反映了撞击坑的所属类型及其相对密度, 更方便进行相对年龄的划分<sup>[31]</sup>。

需要注意的是, 在进行撞击坑统计时要考虑一些可能影响统计准确度的因素, 比如统计区的撞击

坑饱和情况、区域地质作用过程、太阳入射角的影响、二次撞击坑及内生坑的干扰等<sup>[15, 31]</sup>。Xiao 和 Strom<sup>[32]</sup> 提出了利用差分斜率检验是否受到二次撞击坑影响的方法, 可以辅助得到更准确的撞击坑统计结果。撞击坑统计定年应用十分广泛, 对于月球和其他行星来说, 在缺失叠置关系的情况下 (如单元之间互不接触), 利用月坑密度作为推定相对年龄的方法, 就变成了一个标准<sup>[33]</sup>。

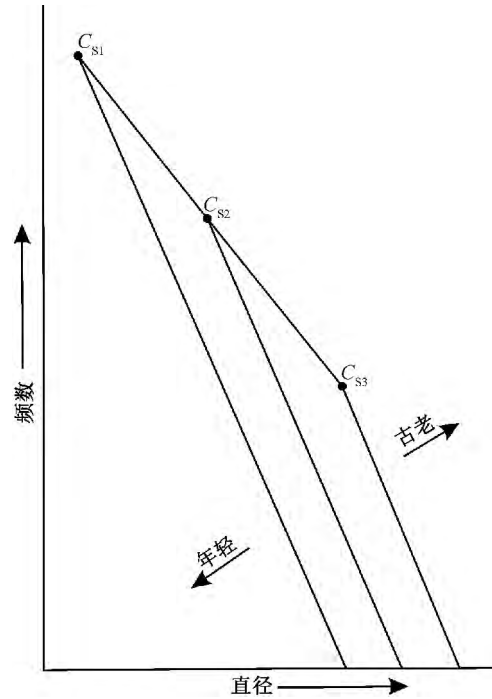


图 1 根据作为撞击坑直径的函数的累积撞击坑频率测定行星表面年龄的原理图解 (据文献[8], 转引自文献[12])

Fig. 1 Principal graph for age dating of planetary surface by cumulative crater frequencies as a function of crater diameter

曲线上的结点决定着参数  $C_s$ , 它是撞击坑产率曲线 (较缓的) 与撞击坑饱和曲线 (较陡的) 之间的转换直径。  $C_{S1}$ ,  $C_{S2}$ ,  $C_{S3}$  代表不断增大的撞击坑的相对年龄。

(3) 撞击坑形态法。由于物质坡移、物质覆盖、火山过程、月壳震动以及陨石和微陨石轰击, 月坑形成之后其形貌就一直在改变, 早期结构清晰的新鲜月坑逐渐退化成结构模糊甚至被完全抹灭的退化月坑。利用月坑的辐射纹及放射状溅射物相、卫星坑的保存程度、坑唇清晰度和坑缘纹理、地体和内部放射状凹槽发育程度等与年代的相关性, 可以对月球地层单元建立相对年代划分。

Baldwin 和 Belknap<sup>[34]</sup> 最早利用撞击坑形貌的新鲜程度对撞击坑相对年代进行了分类, 后来 Ar-

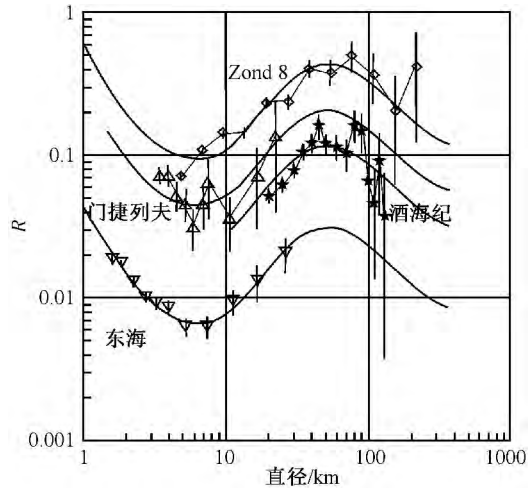


图2 雨海纪、酒海纪和前酒海纪(高地)地质单元的  
撞击坑 SFD 分析拟合  $R$  投点图  
(引自文献[27])

Fig. 2  $R$ -plot of SFD analytical fit to counts on Imbrian, Nectarian and pre-Nectarian (highlands) geological units

thur 等<sup>[35]</sup>采用相同的原理将撞击坑分为了具有相对年代关系的五种类别,这些工作建立了基于撞击坑形态定年的一般性原理。随后,Task 和 Rowan<sup>[36]</sup>利用 Lunar Orbiter 二号和三号的高分辨率影像验证了小坑退化的相对年代特征,Ronca 和 Green<sup>[37]</sup>采用统计学方法验证了的撞击坑退化程度与相对年代关系。在前人的研究基础上,Pohn 和 Offield<sup>[38]</sup>对这一方法进行了细致的改进,他们根据尺寸将撞击坑分为 3 类,依据 7 个形貌参数(图 3),

分别建立了几乎可以应用于全月的不同退化等级的标准月坑,通过与标准月坑作对比可以将月坑分为 0.0(最古老)~7.0(最年轻)71 个退化级别。这种根据不同的形貌参数进行退化程度分级在后来有了进一步研究,并在一些区域进行了应用<sup>[39-44]</sup>。其中,Soderblom 和 Lebofsky<sup>[39]</sup>提出的利用  $D_L$  划分相对年代的方法得到广泛的应用<sup>[8, 33, 43-44]</sup>。参数  $D_L$  表示地层单元中将近消失(通常以撞击坑内斜坡角度定义)的撞击坑中最大撞击坑的直径,根据  $D_L$  相对越大的地层单元其相对年龄越古老的原理可以进行地层单元相对年代划分。

基于月坑退化的撞击坑形貌相对年龄划分通常工作量大,且其准确性受到月球历史上撞击体大小分布均一性、月表区域地质作用过程、研究底图的太阳入射角等影响,撞击坑的退化程度分级也需要考虑次级坑和内生坑成因。尽管有些缺陷,但这种方法一直被成功地广泛应用<sup>[12]</sup>。

(4)月壤成熟度法。暴露于月表的月球物质受空间环境的作用逐渐趋于成熟,月壤成熟度是反应月壤与其暴露时间相一致的特征的量化指标<sup>[45]</sup>。对于有辐射纹的撞击坑,仅仅使用反照率可能导致相对年代判别错误,而利用大型月坑周围溅射物及辐射纹中不成熟(不仅仅是反照率高)的月壤可以识别月球表面最年轻的月坑<sup>[46]</sup>。Lucey 等<sup>[45]</sup>建立了基于 Clementine 多光谱数据提取月球光学成熟度(Optical Maturity Parameter, OMAT)的方法:

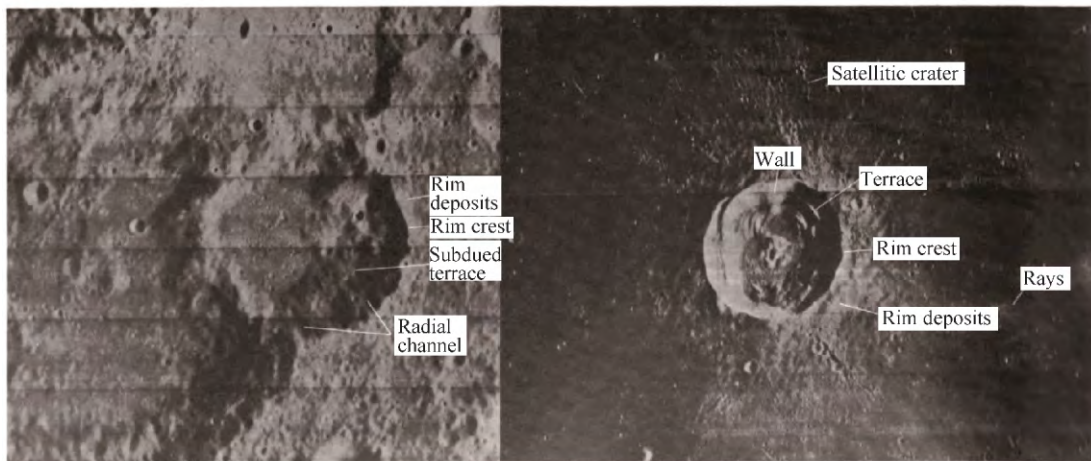


图3 撞击坑形态法相对定年中古老(左)和年轻(右)的撞击坑形貌组成  
(引自文献[38])

Fig. 3 Morphologic components of old (left) and young (right) craters used in morphology based relative-age determinations

Pohn 和 Offield<sup>[38]</sup>在相对定年中选择的 7 个形貌参数分别是 Ray, Radial ejecta, Satellitic craters, Rim-crest, Terracing and interior radial channels, Polygonality, Rim texture。



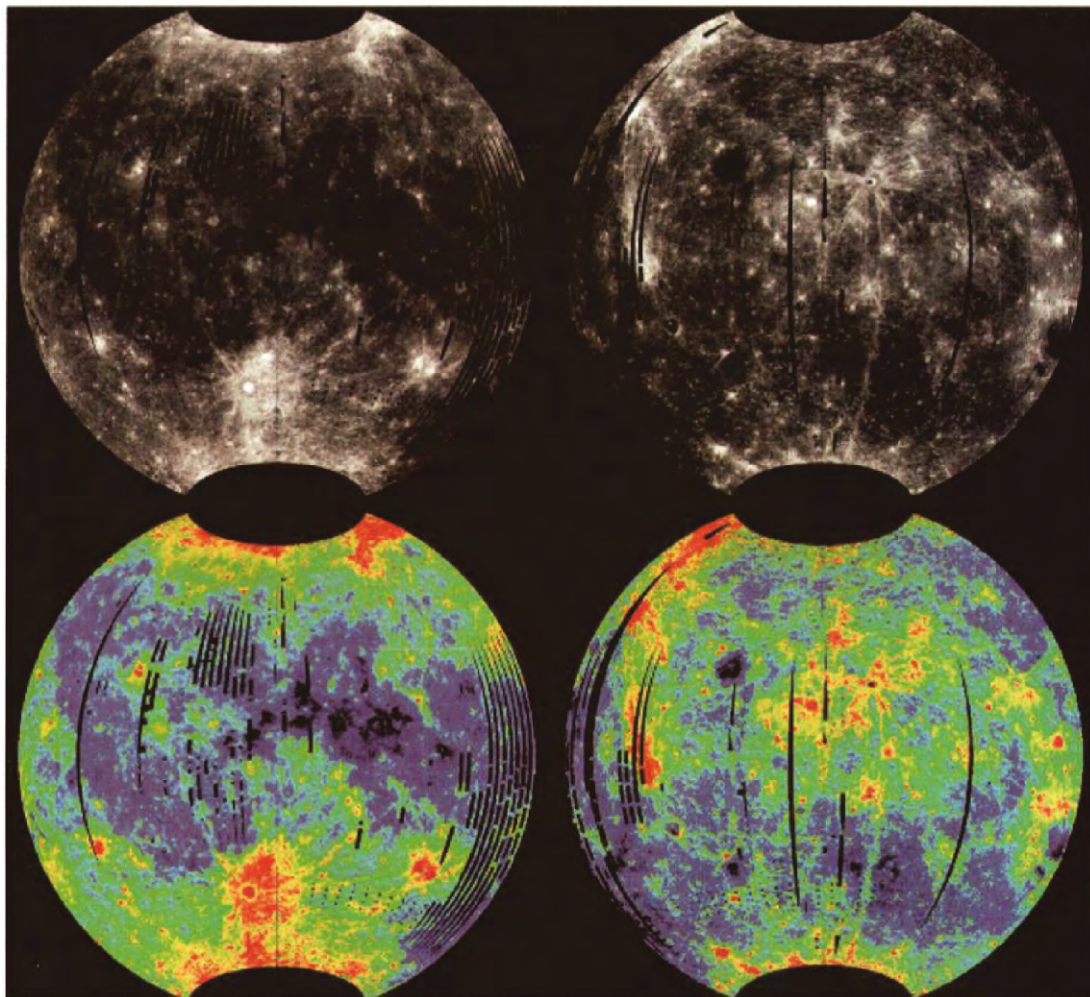


图4 月球正面(左)及背面(右)南北纬 60 度之间区域的 OMAT 图(上)及假彩色月壤成熟度图(下)  
(引自文献[46])

Fig. 4 The top row shows lunar OMAT between 60° N and 60° S of nearside (left) and farside (right), and the bottom row is a false color representation of soil maturity

假彩色图像中红色区域代表最不成熟的月壤,深蓝色区域代表最成熟的月壤,黄色到绿色的区域表示中间程度成熟度的月壤。

$$\text{OMAT} = \sqrt{(R_{750} - x_0)^2 + \left(\frac{R_{950}}{R_{750}} - y_0\right)^2} \quad (1)$$

$x_0$  和  $y_0$  在 Clementine 多光谱数据中的值分别为 0.08 和 1.19,  $R_{750}$  表示波长为 750 nm 的光在一个像元或区域中的反射率,  $R_{950}$  表示波长为 950 nm 的光在一个像元或区域中的反射率。相较于其他的月壤成熟度方法如  $I_s/\text{FeO}$  指标<sup>[47-49]</sup>, Lucey 的光学成熟度方法使用更为简单, 应用范围更广。

Grier 等<sup>[46]</sup> 研究了月球上可能具有辐射纹溅射物的大型撞击坑 ( $\geq 20$  km) 光学成熟度 (图 4), 根据撞击坑径向剖面 OMAT 值将撞击坑分为了 3 个相对年代群: ①比哥白尼坑老 (约 810 Ma); ②中等年代; ③与第谷坑年龄相近或更年轻 (约 109 Ma)。然而, 不同的月壤成分可能有自身的成熟度起止点, 月

壤成分的差异性构成了十分复杂的月壤成熟过程, 一个单独的绝对成熟度指标可能无法应用于全月球<sup>[50]</sup>。

## 2.2 绝对定年

### 2.2.1 同位素定年

月球是目前唯一有确定地点的样品的地外天体<sup>[33]</sup>, 当前月球样品主要来自美国和前苏联的 9 次月球采样返回任务 (图 5, 表 2)。另外还有已发现的 183 块月球陨石 (据 Meteoritical Bulletin Database), 但是这些陨石不能与特定的月面单元联系起来。在 9 次月球采样中美国通过“Apollo 计划” (1961—1972), 在 Apollo 11、12、14、15、16 和 17 任务中共成功采集并返回了 2 196 份独立的岩石、土壤和岩心样品, 总质量为 381.7 kg, 前苏联 Luna 16、

20 和 24 任务(1972—1976)利用机器采样成功返回了共计 0.271 kg 钻取岩心样品。根据 Stöffler 等<sup>[51]</sup>和 Heiken 等<sup>[52]</sup>关于岩石分类的研究,月球样品岩石类型可分为火成岩、晶质撞击熔融岩和撞击玻璃、热变质岩(麻粒质岩性)、多元碎屑基质角砾岩。根据放射性同位素测年能够获得它们不同类型的年龄,包括:(1)结晶作用年龄,确定岩浆、撞击熔融和重结晶事件的年龄;(2)撞击角砾岩形成年龄,确定多元角砾岩的集成和沉淀时间;(3)热扰动年龄,确定重置了部分或全部放射性同位素系统的事件(大多数情况下是撞击事件)的时间;(4)暴露年龄,确定撞击-移位后的岩石碎屑(块)暴露于宇宙射线之下的持续时间<sup>[33]</sup>。通过对返回的月球样品进行同位素定年是关于月球地质单元最精确的年龄测定,采用同位素定年方法主要有两大类,即短半衰期的灭绝核素方法和长半衰期的传统同位素定年。

短半衰期的灭绝核素方法包括:Be-B、K-Ca、Cl-S、Al-Mg、Fe-Ni、Mn-Cr、Pd-Ag、Hf-W、Pb-Ti、I-Xe、Nb-Zr、Sm-Nd 等,用于月球定年研究的短半衰期体系主要是<sup>182</sup>Hf-<sup>182</sup>W 和<sup>146</sup>Sm-<sup>142</sup>Nd。Hf 是亲石元素,主要分布在硅酸盐之中,而 W 是亲铁元素,主要存在于金属相中,<sup>182</sup>Hf-<sup>182</sup>W 体系是研究星体核幔分异发生时间的重要工具<sup>[53-57]</sup>。Sm 和 Nd 同为稀土元素,主要分布在硅酸盐中,但当硅酸盐发生部分熔融时,Nd 将较多地进入熔体,从而产生 Sm-Nd 分异,因此,Sm-Nd 体系是研究壳幔分异作用的重要工具<sup>[57-61]</sup>。

周琴等<sup>[57]</sup>比较全面地介绍了月球的长半衰期传统同位素测年。长半衰期的传统同位素定年包括 K-Ar、Ar-Ar、Rb-Sr、<sup>147</sup>Sm-<sup>143</sup>Nd、Lu-Hf、Re-Os、

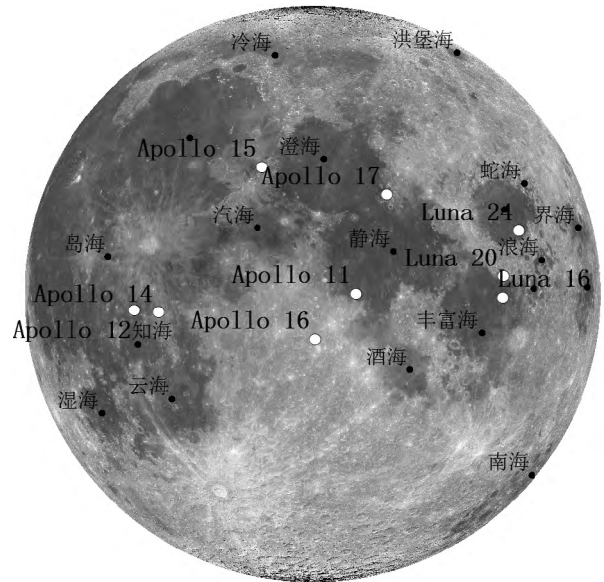


图 5 采样返回月球任务的登陆位置  
Fig. 5 Landing sites of sample return lunar missions

Pb-Pb、U-Pb 等,用于月球定年研究的长半衰期体系主要包括 Ar-Ar、K-Ar、Rb-Sr、U-Pb 和 Pb-Pb 等。长半衰期同位素定年可分为等时线法和单点法,其中等时线法包括全岩等时线和全岩-矿物等时线两种。全岩等时线法要求所测样品同源、同时、体系封闭,这显然在月球研究中有很大局限,因为很多月岩是不同岩石的混合物,且遭受了后期撞击作用的影响。此外,不同月岩样品具有较小的同位素比值变化范围,因而获得的等时线年龄在很多情况下是误差等时线,因此要获得可靠的数据需要非常高精度的同位素分析测定。对于单点年龄,应用较多的是 K-Ar、Ar-Ar 和 U-Pb 法;K-Ar 法封闭温度较低,现在在月岩定年中已较少使用;Ar-Ar 法较合适月海玄武岩定年;U-Pb 法可同时提供相互约束的 3

表 2 月球岩石分类及各月球登陆点样品统计<sup>[12]</sup>

Table 2 Classification of lunar rocks and statistics of samples at the lunar landing sites<sup>[12]</sup>

登陆点	样品数	总质量/kg	>10 mm 岩石的质量分数/%	深成岩	火成岩(玄武岩)	撞击岩	<10 mm 岩石的质量分数/%	钻心所占质量分数/%
A-11	58	21.6	44.9	2	20	23	54.6	0.4
A-12	69	34.3	80.6	<1	79	2	16.8	1.2
A-14	227	42.3	67.3	<1	9	58	30.6	0.9
A-15	370	77.3	74.7	<1	38	36	17	6
A-16	731	95.7	72.3	12	<1	62	19.3	7.4
A-17	741	110.5	65.9	5	29	32	26.7	6.6
L-16	1 钻心	0.101					100	100
L-20	1 钻心	约 0.05					100	100
L-24	1 钻心	0.17					100	100

组年龄, 可信度较高, 但月岩样品中通常缺少相应的矿物限制了该方法的使用, 同时我们对于月球普通铅的确切组成还不了解<sup>[57]</sup>。

需要注意的是, 不同类型月球样品的放射性年龄具有非常不同的月质意义, 只有针对由摄影地质学技术确定的特定建造, 通过对样品及其地质环境作谨慎而周到的分析, 才能将其月球地质意义推论出来<sup>[12]</sup>。

## 2.2.2 月球成坑计年

利用月球样品同位素定年虽然能对相应的地层单元给出准确的绝对年龄数据, 然而月球样品的覆盖面很小, 无法满足更大范围的月球地层单元绝对年龄测定。而与此同时, 关于撞击坑大小-频率的一系列研究表明, 自晚期重轰炸结束以来月球撞击坑大小-频率分布一直是相对稳定的<sup>[27]</sup>, 月表撞击坑的数量随着暴露在空间中时间的增加而增加, 撞击坑的直径随着时间的增加而减小<sup>[62]</sup>。那么, 对比所有月球样品年龄与其所代表的地层单元的撞击坑密度, 可构建适用于全月面的撞击坑产率函数, 进而, 对于某一研究区, 统计其表面的撞击坑, 可结合撞击坑产率函数估算该区域的绝对模式年龄。

月球成坑率和绝对月坑存续年龄的标定曲线, 已有相当长的研究时间<sup>[26, 39, 63-65]</sup>, 其中 Soderblom 和 Lebofsky<sup>[39]</sup> 在分析中还结合了对撞击坑退化参数  $D_L$  的综合分析。Neukum 等<sup>[15]</sup> 首次建立了 7 阶多项式的月坑产率函数, 后来改进为 11 阶多项式的月坑产率函数<sup>[29]</sup>, 并在之后对多项式函数的系数做了改进<sup>[27]</sup>。利用撞击坑产率函数和月球样品年龄的关系, Neukum<sup>[29]</sup> 建立了每  $\text{km}^2$  面积上直径等于或大于 1 km 的撞击坑数与月单元年龄的经验方程, Stoffer 和 Ryder<sup>[33]</sup> 给出了可测年月表建造的绝对年龄最新测定值, 被 Neukum 等<sup>[27]</sup> 用来修订了月球成坑计年方程:

$$N(1) = 5.44 \times 10^{-14} [\exp(6.93T) - 1] + 8.38 \times 10^{-4} T \quad (2)$$

其中:  $N(1)$  表示一个区段内每  $\text{km}^2$  面积上直径等于或大于 1 km 的撞击坑数;  $T$  表示该区段地层单元的年龄, 单位为 Ga, 描述方程的月坑存续年龄标定曲线见图 6。

方程(2)对时间  $T$  求导数:

$$\frac{\partial N}{\partial T} = 3.77 \times 10^{-13} \exp(6.93T) + 8.38 \times 10^{-4} \quad (3)$$

可得到每  $\text{km}^2$  面积上直径等于或大于 1 km 的撞击坑随时间而变的成坑率的估计(图 7)。

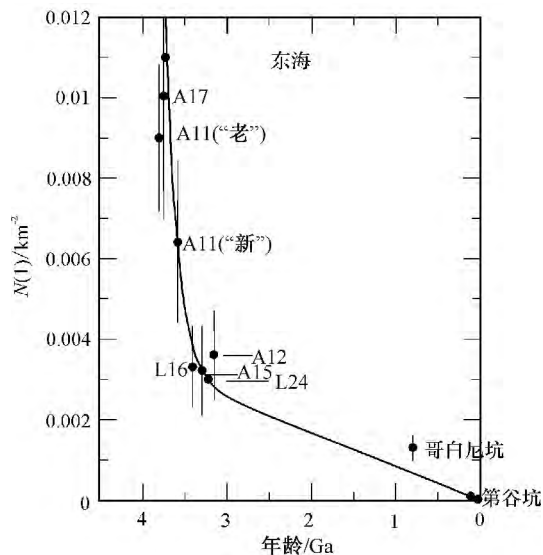


图 6 方程式(2)的图形表达。

(引自文献[12])

Fig. 6 Graphical representation of equation (2)

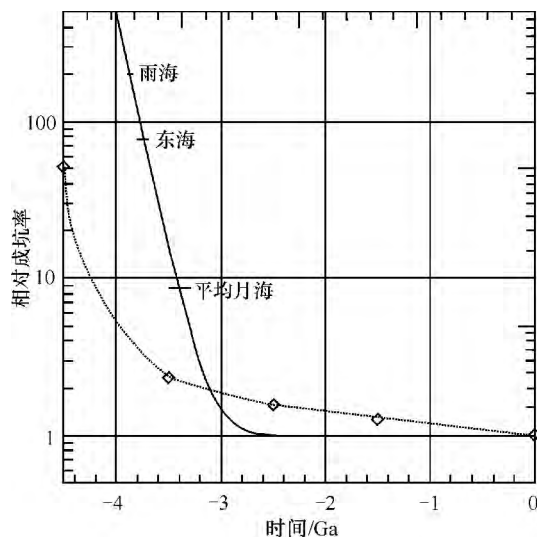


图 7 方程式(3)的图形表达

(引自文献[27])

Fig. 7 Graphical representation of equation (3)

约 3 Ga 之后成坑率基本稳定, 而 4 Ga 前的成坑率是它的 500 倍。菱形代表的是 Durda 等<sup>[66]</sup> 的模型。

利用月球成坑计年学还可以对其他行星表面定年<sup>[27, 30, 66-67]</sup>, 但这需要计算相对于月球的成坑率。在计算相对成坑率的时候要考虑的基本因素包括: (1) 相对的撞击体通量和速度分布; (2) 撞击体大小与产生的撞击坑大小的函数关系, 它与撞击体速度分布的变化、重力场和靶区性质有关; (3) 归一化的



撞击截面和行星表面区域<sup>[69]</sup>。具体的处理在相应参考文献中有说明, 这里不做详细介绍。

次级坑和内生坑也是影响撞击坑绝对定年准确度最重要的因素, 在应用中要注意剔除次级坑和内生坑的影响。此外, 基于撞击坑统计的绝对年代确定需要选择均一的月表区域, 因此在进行统计之前应根据光谱数据将研究区划分为不同的岩性单元, 并在适合的投影方式下处理底图。

### 3 现用月球地层层序表的形成与演变

Shoemaker 和 Hackman<sup>[2]</sup>以哥白尼坑区域为对象, 通过反照率和地形地貌等特征的研究, 以地层叠置规律为基础, 建立了第一套相对成熟的月球相对年代序列, 也确立了月球相对年代划分的基本思路和方法。此后随着研究范围的扩大、研究数据的增加, 尤其是 Apollo 系列任务的成功实施, 月球的地层层序划分逐步得到完善(表 3), 同时, 对返回样品的同位素定年研究为各时间-地层单元提供了绝对年龄(表 5)。

#### 3.1 相对年龄

##### 3.1.1 Shoemaker 和 Hackman 的划分

20 世纪 60 年代初, 美国空军 (United States Air Force, USAF) 和美国地质调查局均开展了以地基望远镜观测数据为基础的 1:1 000 000 月球地质编图。当时还没有统一的月面历史单元尺度标准。Shoemaker 和 Hackman<sup>[2]</sup>以围绕哥白尼坑的区域为中心, 绘出了经度 10°E~30°E, 纬度 0~15°N 的月球区域地质图。该区域中的物质主要是围绕撞击坑的溅射物沉积叠置序列, 根据叠置关系、纹理和光学性质被分为 5 个地层单元, 从老到新分别是前雨海系、雨海系、风暴洋系、爱拉托逊系、哥白尼系, 5 个地层划分对应了 5 个时间-地层单元, 即前雨海

纪、雨海纪、风暴洋纪、爱拉托逊纪和哥白尼纪。

根据 Shoemaker 和 Hackman 所作的哥白尼区域地质图, 前雨海系物质包括了所有形成于雨海系物质之前的角砾、溅射层, 可能还包括火成岩等物质单元, 在一些地区可能有较薄的雨海溅射物覆盖。雨海系主要是来自雨海的破碎的岩石和大型岩块组成的溅射毯 (ejecta blanket), 厚度几百到几千英尺, 地形以 1~2 英里宽的小山和洼地为主。风暴洋系包括了反照率中到低的火山形状圆丘物质 (dome material) 以及低反照率平缓的月海物质 (mare material)。爱拉托逊系物质包括爱拉托逊纪的溅射毯和角砾岩 (breccia), 反照率中到低。溅射毯主要为破碎的岩石, 它们围绕大大小小的撞击坑形成了几英尺到大约 2 000 英尺厚丘状层; 角砾岩的主要成分也是破碎的岩石, 在撞击坑中可能含有透镜体。哥白尼系物质有 5 类: 暗色溅射物 (dark ejecta)、辐射纹物质 (ray material)、溅射毯、角砾岩和岩屑堆 (talus), 除暗色溅射物反照率低以外, 其他物质单元反照率都高。暗色溅射物可能是玄武质岩石或暗色的火山灰, 辐射纹物质主要是破碎的岩石构成的斑点状的薄层, 岩屑堆是尘埃和岩块大小的碎屑构成的部分分选的堆积体。

##### 3.1.2 Shoemaker 的划分

Shoemaker 和 Hackman 提供了月面历史划分的基本原理和方法, 然而只在 I-355<sup>[70]</sup> 和 I-385<sup>[71]</sup> 两幅地质图中使用过, 同时, 在这两幅地质图中雨海系被划分为亚平宁统 (Apenninian Series) 和阿基米德统 (Archimedean Series)。根据对雨海及其周围地层的影像资料研究, Shoemaker<sup>[5]</sup> 改进了早期的月面地层划分(表 4), 正式将雨海系分为了亚平宁统和阿基米德统, 并且抛弃了风暴洋系, 其他地层单元不变。亚平宁统包括了与雨海盆地形成有关的事件, 最显著的是围绕雨海的环形山如 Apennine、

表 3 月球地层层序的演变

Table 3 Evolvement of lunar stratigraphic sequence

Shoemaker 和 Hackman, 1962	Shoemaker, 1964; McCauley, 1967	Wilhelms, 1970	Stuart-Alexander 和 Wilhelms, 1975	Wilhelms, 1987
哥白尼纪	哥白尼纪	哥白尼纪	哥白尼纪	哥白尼纪
爱拉托逊纪	爱拉托逊纪	爱拉托逊纪	爱拉托逊纪	爱拉托逊纪
风暴洋纪	雨海纪 阿基米德世	雨海纪	雨海纪	雨海纪 晚雨海世
雨海纪	雨海纪 亚平宁世			雨海纪 早雨海世
前雨海纪	前雨海纪	前雨海纪	酒海纪 前酒海纪	酒海纪 前酒海纪

表 4 Shoemaker 的月面历史划分<sup>[5]</sup>Table 4 Lunar time periods are shown according to Shoemaker<sup>[5]</sup>

Period	Epoch	Events
哥白尼纪		形成带辐射纹的坑。
爱拉托逊纪		形成辐射纹已经消失的坑。
雨海纪	阿基米德世 亚平宁世	形成风暴洋群月海物质; 形成老于风暴洋群的撞击坑。 与雨海盆地形成有关的事件。
前雨海纪		未正式划分。

注: 从上到下时间越来越古老。

Caucasus 和 Alps, 丘状地形从盆地内边缘一直向外延伸到比盆地直径更远的地方, 在边缘处丘状物质变得扭曲并相对平缓, 出现了一些覆盖着雨海溅射物月坑, 这些雨海撞击事件的溅射物后来被称为弗拉摩洛建造<sup>[6]</sup>。阿基米德统代表了亚平宁统之后形成的坑物质和月海物质, 早期的风暴洋系被称为风暴洋群, 用以代表阿基米德统后期的月海物质充填。这是最早的“四分法”月面历史划分, 这一划分后来得到了 McCauley<sup>[4]</sup>的支持。

### 3.1.3 Wilhelms 的划分

Hackman<sup>[72]</sup>在编制月球 Apenninus 山脉区域地质图(I-463)时, 对雨海系亚平宁统作了进一步划分, 分为了弗拉摩洛建造(Fra Mauro Formation)和亚平宁阶地建造(Apenninus Bench Formation), 前者包括两个相。弗拉摩洛建造为雨海盆地溅射出的破碎岩石和大型岩块, 亚平宁阶地建造表示地形较平缓的火山物质, 中等反照率, 这两个建造并没有明确定义, 只有 Hackman 在他的地图中采用这种表达。根据 Wilhelms<sup>[6]</sup>的介绍, 弗拉摩洛建造单元最早由 Eggleton 和 Marshall<sup>[73]</sup>识别出来, 在 1963 年 11 月的一个月球编图者会议中, 弗拉摩洛建造才被提出来并作为雨海纪的基本单元, Eggleton<sup>[74]</sup>定义了弗拉摩洛建造, 包括特征区域和精细的物理定义, 但没有发表在公认的出版物中。Wilhelms<sup>[6]</sup>正式定义了弗拉摩洛建造, 它包括了围绕 Apenninus 山附近粗糙的丘状地形部分和更远处中央湾附近平缓的放射状线纹部分。Wilhelms 认为, 之前定义的雨海系的“统”作为物质单元仅仅在 Archimedes 和 Apennine 山附近具有实用意义, 因为只有在这里才能将相应的物质单元划分给它们, 而在其他地方, 平原形式的单元和坑物质相对于亚平宁阶地建造和 Archimedes 坑的相对年龄无法确定, 因此建议放弃这些“统”单元<sup>[6]</sup>。同时, “风暴洋群”因为有时间-地层的涵义而被放弃使用, 它所代表的地层单元用“月海物质”表示<sup>[8]</sup>。弗拉摩洛建造是雨海纪的基本岩石-

地层单元, 作为雨海盆地的溅射物物质单元, 它代表了雨海纪的起始时间。

### 3.1.4 Stuart-Alexander 和 Wilhelms 的划分

在尝试对月球两翼和背面进行地质填图工作时, 编图人员发现, 需要对早期定义的前雨海纪进行细分以定义这些区域的地层单元年代<sup>[7]</sup>, 实际上当时已经出现非正式地将前雨海纪划分了 3 个地质年代单元的实践<sup>[38, 75-76]</sup>。基于对相对年轻的东海盆地地质单元解译<sup>[77-78]</sup>的类推, Stuart-Alexander<sup>[76]</sup>在作 Rheita 区域地质图(I-649)时, 发现该区域最主要的地质单元是产生酒海多环盆地的撞击沉积物和结构, 于是将它命名为一个独立的岩石-地层单元——詹森建造(Janssen Formation), 作为酒海撞击事件的溅射物沉积。詹森建造与雨海盆地溅射物弗拉摩洛建造和东海盆地溅射物赫韦吕斯建造(Hevelius Formation)具有相同的展布模式和形貌特征, 它们围绕相应的原始盆地向外呈放射状分布; 表面具有线状纹理; 在离盆地近的地方厚且起伏, 向外逐渐变得薄且平缓; 在一定范围之外有一些链状和群状的次级坑。在 NASA 的资助下, Stuart-Alexander 和 Wilhelms<sup>[7]</sup>开展了划分前雨海系的工作, 最终以詹森建造为分界, 正式将前雨海系划分为前酒海系和酒海系, 对应的时间单元是前酒海纪和酒海纪。规定在形成时间上早于詹森建造的地层单元属于前酒海系, 与詹森建造同时形成或晚于詹森建造的形成时间而早于弗拉摩洛建造形成的地层单元属于酒海系。这就是“五分法”的月面历史划分, 包括了从新到老的 5 个地层序列: 哥白尼系、爱拉托逊系、雨海系、酒海系和前酒海系。

### 3.1.5 Wilhelms 等的划分

早在 1971 年美国地质调查局所作的月球正面(I-703)<sup>[75]</sup>、Schiller 区域(I-691)<sup>[79]</sup>、Rheita 区域(I-694)<sup>[76]</sup>和 Rupes Altai 区域(I-690)<sup>[80]</sup>等地质图中, 雨海系就被非正式地划分为了早晚两套地层。Wilhelms 等<sup>[8]</sup>正式定义了雨海系的下雨海统(Lower

Imbrian Series) 和上雨海统 (Upper Imbrian Series), 其对应的地质年代单元为早雨海世 (Early Imbrian Epoch) 和晚雨海世 (Late Imbrian Epoch)。东海盆地的年龄比雨海盆地的年龄小, 但是明显老于附近的月海, 东海盆地的沉积物 (赫韦吕斯建造) 是一个很好的标志性地层单元, 因为它分布广泛且能清楚地识别与其他地层单元的相对年龄关系。Wilhelms 等规定, 下雨海统包括了形成于弗拉摩洛哥建造下界到赫韦吕斯建造上界之间的所有物质, 上雨海统包括赫韦吕斯建造上界以上直到雨海系的上界之间的物质。相应的, 早雨海世开始于雨海撞击事件发生终止于赫韦吕斯建造形成, 晚雨海世开始于赫韦吕斯建造形成终止于定义为雨海系上界的月海物质固结。这个改进将月海盆地的形成期和大规模月海玄武岩泛滥时期进行了区分, 既符合月球演化的规律又为开展月球地质研究提供了方便, 是“五分法”月面历史划分的重要改进 (表 5)。爱拉托逊纪除了形成无辐射纹的撞击坑以外, 还延续了雨海纪玄武岩喷发事件, 但此时的玄武岩一般具有更高的 Ti 含量, 可能是因为需要更多放射性元素产热以保持更长的熔融时间<sup>[8, 81]</sup>。Wilhelms 等完成的月球地层层序 (图 8) 比较全面地表达了已知的月球地质历史过程, 是现在国际上通用的月球地层划分标准。

### 3.2 绝对年龄

在不断完善月球相对年代序列的同时, 随着 Apollo 计划和 Luna 计划在月表各区采样返回, 许多地层单元的绝对年龄也得到了精确的测定。固体月球表面物质最老的年龄可能为 45.2 亿年<sup>[55, 82]</sup>, 这是前酒海纪的年龄下限。酒海盆地的年龄是根据 Apollo 16 样品的放射性年龄推定的, 选取与酒海溅射可能有关的丘陵沟槽状笛卡尔建造的样品, 年龄变化于 38.4~41.4 亿年<sup>[12]</sup>, Wilhelms 等<sup>[8]</sup>将酒海盆地的年龄确定为 39.2 亿年, 因为与他的月坑产率假设最为匹配, 但也有许多

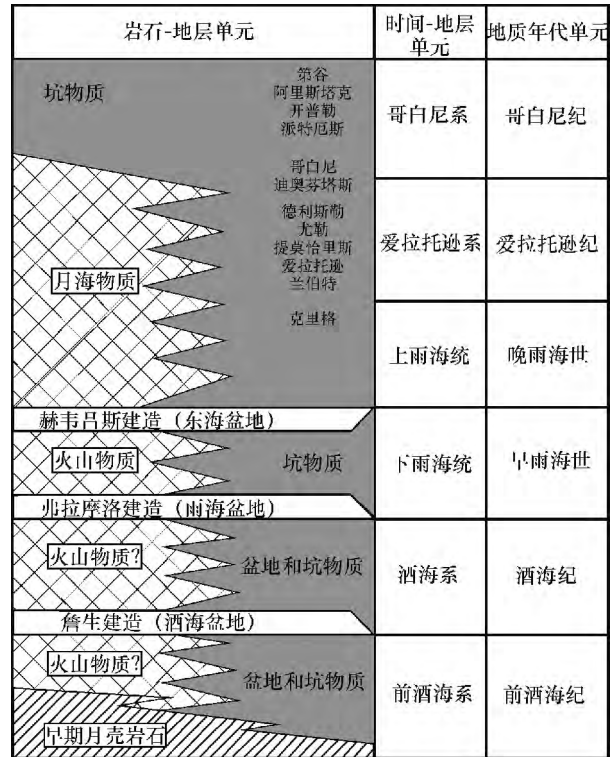


图 8 月球层序柱及其岩石-地层单元、时间-地层单元和地质年代单元 (引自文献<sup>[8]</sup>)

Fig. 8 The lunar stratigraphic column with rock-stratigraphic, time-stratigraphic and geologic time units

支持 38.5 亿年的观点<sup>[83]</sup>。雨海盆地的沉积在 Apollo 14、Apollo 15、Apollo 16 3 个登陆点采到了样品, 根据连续雨海溅射物——弗拉摩洛哥建造的测年分析结果, 雨海盆地的形成年代大概为 38.5 亿年<sup>[84, 85]</sup>。东海盆地是月球上最年轻的多环盆地, 但是没能根据测定的年龄直接确定它的绝对年龄, 因为在任何登陆点上都未能以任何的确定性认定与东海有关的样品<sup>[12]</sup>。然而, 东海盆地肯定形成于雨海 38.5 亿年和最老的晚雨海世月海玄武岩 37.2 亿年之间, 结合月坑密度, Wilhelms 等<sup>[8]</sup>提出了东海的推定年龄为 38 亿年。与其他系相比, 雨海系-爱拉托逊系的确定界线并不清楚,

表 5 现用的月球年代划分表

Table 5 The presently used lunar chronology subdivisions

地质年代单元	年龄界限/Ga	主要事件	
哥白尼纪	0~0.8	形成具有辐射纹的新鲜撞击坑。	
爱拉托逊纪	0.8~3.16	高钛月海玄武岩喷发; 形成无辐射纹的撞击坑。	
雨海纪	晚雨海世	3.16~3.80	剧烈的玄武岩喷发。
	早雨海世	3.80~3.85	形成雨海、东海等多环盆地。
酒海纪	3.85~3.92	形成了酒海盆地等 12 个大型撞击盆地, 以及严重退化的撞击坑。	
前酒海纪	3.92~4.52	月表固化, 形成斜长质月壳; 形成包括南极艾肯盆地在内的可识别的 30 个大型盆地。	

尤其是下界, 根据 Apollo 12 采集的爱拉托逊系附近钛铁矿玄武岩样品定年分析, 其平均年龄为 31.6 亿年<sup>[8]</sup>。爱拉托逊系-哥白尼系界线也没有准确的地层单元, 因此其界线年龄存在很多种说法, 如 20 亿年<sup>[33]</sup>、15 亿年<sup>[30]</sup>、12 亿年<sup>[8]</sup>, 如果以哥白尼坑自身的年龄作为这个界线年龄, 则其时间为 8 亿年<sup>[12]</sup>。有了各地质单元的绝对年龄之后, 就形成了更为完整的月球地层序列表(表 5)。

#### 4 基于动力学演化过程改进的月面历史划分

考虑到月球演化过程驱动力的差异, 我们可以将月球的演化划分为 3 个阶段: 第一个阶段以内动力地质作用为主, 时间从月球形成到岩浆洋演化结束后月表开始形成有记录的撞击事件痕迹, Apollo 16 样品 67955 测到的熔融角砾岩年龄为  $(4.22 \pm 0.01)$  Ga<sup>[86]</sup>, 推测是目前已知的最古老的盆地撞击事件的年龄; 第二个阶段是内外动力地质作用混合作用的时期, 主要的事件包括形成大型撞击盆地的撞击事件以及月海玄武岩泛滥; 第三个阶段以外动力地质作用为主, 主要是约 30 亿年前月球进入宁静期后直到当前时期, 这期间月球的内动力地质作用基本结束, 主要是规模不大的撞击事件。这 3 个时期可以分别表示为冥月宙、古月宙和新月宙, 这种划分最初是由张福勳等<sup>[87]</sup>提出的。

年代划分方案是月球地质编图的重要表达内容之一<sup>[88]</sup>。在现用的月球年代划分中, 前酒海纪的事件主要包括两个部分: (1) 月表固化, 形成原始的斜长质月亮; (2) 形成已识别的 30 个盆地。从动力学角度来看, 前酒海纪的第一个事件以月球内动力地质作用为主, 属于月球动力学演化的第一个阶段; 而对于前酒海纪的第二个事件, 它是内外动力地质作用混合作用的时期, 即月球动力学演化的第二个阶段。因此, 月球演化过程中内动力地质作用为主的时期和内外动力地质作用并重阶段的早期过程被置于一个年代单元之中, 为了更清晰地表达月球演化的动力学过程, 我们建议将前酒海纪划分为两个年代单元, 分别表示内动力地质作用为主的斜长质月亮形成时期和内外动力地质作用并重的盆地形成期的早期阶段。

为了将前酒海纪分割, 需要找到两个时期的分界, 既识别出留有痕迹的最古老的外动力地质作用痕迹。在前酒海纪的 30 个撞击盆地中, 南极艾肯(South Pole-Aitken, SPA) 盆地是已确认的月球上最古老的撞击盆地<sup>[8]</sup>, 因此可以认为这次盆地形成事件是月球上外动力地质作用被记录的时期的起点, 可以此作为界线分隔前酒海纪。按照惯例, 我们可以将从 SPA 盆地形成到酒海纪的时间单元称为南极艾肯纪, 简称为艾肯纪, 而在此之前的时期称为前艾肯纪。月球背面主要是年代古老的斜长岩高地地体和南极艾肯地体<sup>[89]</sup>, 高地斜长岩是月球岩浆洋演化形成的原始月壳的成分, 属于前艾肯系, 南极艾肯地体属于艾肯系, 因此这两个地质年代单元的建立更有助于月球背面的地质研究。

为了清楚地划分前艾肯纪-艾肯纪界限, 需借助于可以代表 SPA 盆地撞击事件的岩石-地层单元, 即建立一个该区域的标准剖面。SPA 盆地不仅是最古老的撞击盆地, 而且还是月球上最大的撞击盆地, 一般认为直径达到了 2 000~2 600 km (表 6)。根据 Petro 和 Peiters<sup>[90]</sup> 的模型预测, SPA 盆地的撞击溅射物基本覆盖了全月表, 虽然遭受了许多后期作用的破坏, 但是在靠近盆地边缘的溅射物覆盖层较厚而局部受侵蚀较少的区域应该还有保留, 在 USGS 所编的月球南极地区地质图中就表达了可能是 SPA 盆地溅射物的地图单元<sup>[91]</sup>。通过各种技术手段, 如果能准确地识别出 SPA 盆地的溅射物地层单元, 以这个建造为基本地层单元就可以建立艾肯系和前艾肯系, 形成时间早于 SPA 盆地溅射物建造的地层属于前艾肯系, 主要应该是斜长岩地层单元, 形成时间与 SPA 盆地溅射物建造同时或更晚但早于酒海盆地詹森建造的地层属于艾肯系, 这两个系对应的地质年代单元分别就是前艾肯纪和艾肯纪。

将现存的前酒海纪替换为前艾肯纪和艾肯纪以强调月球演化的动力学过程既有实践的必要性又有操作的可行性, 因此我们推荐一个新的月球相对年代划分(表 7)。在这里, 我们将月球的演化历史划分为“三宙六纪”, 改变以往在划分月面历史时只重视月球外动力地质作用而忽视了内动力地质作用的认识, 将获得月球演化的全新的动力学模型。

表 6 南极艾肯盆地的外环直径和中心

Table 6 The diameter and center of outer ring of the South Pole-Aitken basin

参考资料	外环平均直径/km	外环中心坐标	
		经度/(°)	纬度/(°)
Stuart-Alexander (1978) <sup>[92]</sup>	2 000	180	50 S
Wilhelms 等(1979) <sup>[91]</sup>	2 500	180	56 S
Wood 和 Gifford (1980) <sup>[93]</sup>	2 600	180	60 S
Leikin 和 Sanovich (1985) <sup>[94]</sup>	2 200	176.5 E	41.5 S
Petro 和 Pieters (2002) <sup>[95]</sup>		170 E	56 S
Hiesinger 和 Head (2004) <sup>[96]</sup>	2 400	174 W	55 S
Shevchenko 等(2007) <sup>[97]</sup>	3 500	180	40 S
Garrick-Bethell 和 Zuber(2009) <sup>[98]</sup>	2 400	169 W	53 S

表 7 一个推荐的月球相对年代划分

Table 7 A recommended moon relative chronology subdivisions

地质年代单元		主要事件
新月宙	哥白尼纪	形成具有辐射纹的新撞击坑。
	爱拉托逊纪	高钛月海玄武岩喷发; 形成无辐射纹的撞击坑。
古月宙	晚雨海世	剧烈的玄武岩喷发。
	雨海纪	形成雨海、东海等多环盆地。
	早雨海世	形成了酒海盆地等 12 个大型撞击盆地, 以及严重退化的撞击坑。
	酒海纪	形成了酒海盆地等 12 个大型撞击盆地, 以及严重退化的撞击坑。
	艾肯纪	形成包括南极艾肯(SPA)盆地在内的可识别的 30 个盆地。
冥月宙	前艾肯纪	月表固化, 形成斜长质月亮。

注: 冥月宙表示月球以内动力地质作用为主的演化阶段, 古月宙表示月球内外地质作用并重的演化阶段, 新月宙表示月球外动力地质作用为主的演化阶段。

## 5 总结

月球的相对定年方法主要有 4 种: (1) 地层叠置法是最易于操作的, 应用也最为广泛, 近年来有了高分辨率的月球影像数据, 该方法更容易实现, 同时, 月表成分数据等多源数据的融合也为我们提供了地层叠置关系新的观察角度; (2) 利用月坑的形态学来定义相对年龄的操作方法有很多, 但使用最为可行的是 Soderblom 和 Lebofsky 建立的  $D_L$  方法, 既可以单独用于划分相对年代也可以作为辅助手段检验其他方法的划分结果; (3) 利用月壤光学成熟度划分相对年代的可靠性依赖于一个可靠的月壤成熟规律, 然而月壤成分的差异性构成了十分复杂的月壤成熟过程, 此外, 后期的撞击挖掘作用和月壤迁移作用可能会影响对月壤的原始位置和月表暴露时间的确定; (4) 利用原生的撞击坑统计定年需选择该撞击坑直径未饱和区域, 对于底图应尽量选择较大的太阳高度角, 尤其要注意对准确性影响最大的二次撞击坑和内生坑的剔除。SFD 定年的研究已经比较成熟, 对于月球和其他行星来说, 在缺失叠置关系的情况下(如单元之间互不接触), 利用月坑密度作

为推定相对年龄的方法技术, 就变成了一个标准。

月球的绝对定年主要有同位素测年和基于撞击坑统计的月球成坑计年: (1) 利用月球样品的同位素定年是最直接最准确定年方法, 针对不同的样品和研究目的选择合适的同位素定年方法是获得可靠年龄的前提, 对于放射性年龄的解释还需对样品的地质环境进行分析; (2) 月球成坑计年借助于月球样品的放射性年龄与样品所代表的月表区域撞击坑数目所建立的函数关系确定绝对年龄, 是对样品同位素定年结果的扩展, 可确定没有采到样品的区域的绝对年龄, 同样的, 在使用的过程中需谨慎处理次级坑和内生坑造成的影响。

月球的时间-地层单元采用了以岩石建造——“组”为基础单元的划分方法和以“系”为基础单元的表达方式, 仅在雨海系分出了上下两个“统”, 相应的基础地质年代单元分别表达为“纪”和“世”。现在用的月球年代划分表起源于 1962 年 Shoemaker 和 Hackman 的基础框架和划分标准, 之后主要经历了四次改动并最终给出了各自的年龄界限。在划分中, 较老的地层单元以特殊盆地形成时的撞击溅射物沉积为分界地层, 如詹森建造、弗拉摩洛哥建造、赫韦吕斯建造, 而雨海纪以后的年轻地层单元都没有



被精确定义, 仅仅是依据相对退化程度确定的(图8)。由于雨海纪-爱拉托逊纪和爱拉托逊纪-哥白尼纪不存在岩石地层界线, 在定年的实际操作引入了很多不确定性。

根据月球演化驱动力的差异, 可以将月球历史划分为从老到新的3个阶段: 冥月宙、古月宙和新月宙。为了将月球内动力地质作用为主的阶段和外动力地质作用加入月球演化的阶段分开, 我们建议以月球上最古老的撞击盆地——南极艾肯盆地的形成为界将前酒海纪划分为较老前艾肯纪和相对年轻的艾肯纪, 建立更符合月球动力学演化逻辑的月球年代划分, 同时这也是更有助于开展月球背面地质研究的年代划分。而南极艾肯盆地巨大的撞击规模可能留下了保存至今的溅射物地层单元, 如果能够准确的识别出来可以将它作为划分新时间-地层单元的基本岩石-地层单元。

月球的年代学研究是一项长期和艰苦的工作, 一套新的地层划分的确立既是对已掌握的月球演化和月球地质信息的提炼和升华, 也是对未来开展月球地质研究工作的指引, 所以要审慎合理, 有前瞻性。“三宙六纪”的划分方式利用最新的数据资料, 建立更加合理的月面历史划分, 将会为开展月球地质研究提供方便, 但其正式的建立还有赖于确立一个准确可靠的基本岩石-地层单元。

## 参考文献

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2005: 194-205.
- [2] Shoemaker E M, Hackman R J. Stratigraphic basis for a lunar time scale[M]//Kopal Z, Mikhailov Z K. The Moon. IAU Symposium 14. New York: Academic Press, 1962: 289-300.
- [3] Hackman R J. Stratigraphy and Structure of the Montes Apenninus Quadrangle of the Moon[R]. Washington DC: United States Geological Survey, 1964: 1-8.
- [4] Mccauley J. The nature of the lunar surface as determined by systematic geologic mapping[M]//Mantles of the Earth and Terrestrial Planets. London: Interscience Publishers, 1967: 431.
- [5] Shoemaker E M. The geology of the moon[J]. Scientific American, 1964, 211(6): 38-47.
- [6] Wilhelms D E. Summary of Lunar Stratigraphy: Telescopic Observations[M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1970: 1-45.
- [7] Stuart-Alexander D E, Wilhelms D E. The Nectarian system, a new lunar time-stratigraphic unit[J]. Journal of Research of the US Geological Survey, 1975, 3(1): 53-58.
- [8] Wilhelms D E, Mccauley J F, Trask N J. The Geologic History of the Moon[M]. Washington DC: US Government Printing Office, 1987: 1-281.
- [9] 萨尔瓦多. 国际地层指南[M]. 北京: 地质出版社, 2000: 1-171.
- [10] 梅冥相, 高金汉. 岩石地层的相分析方法与原理[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 1-33.
- [11] 汪新文. 地球科学概论[M]. 北京: 地质出版社, 1999: 56-63.
- [12] Jolliff B L, Wieczorek M A, Shearer C K, et al. New Views of the Moon[M]. Chantilly, Virginia: Mineralogical Society of America, 2006: 519-596.
- [13] McGill G E. Craters as “fossils”: The remote dating of planetary surface materials[J]. Geological Society of America Bulletin, 1977, 88(8): 1102-1110.
- [14] Arvidson R E, Boyce J, Chapman C, et al. Standard techniques for presentation and analysis of crater size-frequency data[J]. Icarus, 1979, 37(2): 467-474.
- [15] Neukum G, König B, Arkani-Hamed J. A study of lunar impact crater size-distributions[J]. The Moon, 1975, 12(2): 201-229.
- [16] Young J. A statistical investigation of diameter and distribution of lunar craters[J]. Journal of the British Astronomical Association, 1940, 50(9): 309-326.
- [17] Brown H. The density and mass distribution of meteoritic bodies in the neighborhood of the earth's orbit[J]. Journal of Geophysical Research, 1960, 65(6): 1679-1683.
- [18] Öpik E J. The lunar surface as an impact counter[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1960, 120(5): 404-411.
- [19] Kreiter T J. Dating lunar surface features by using crater frequencies[J]. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 1960, 72: 393-398.
- [20] Shoemaker E M, Hackman R J, Eggleton R E. Interplanetary correlation of geologic time[M]//Advances in the Astronomical Sciences. New York: Plenum Press, 1963: 70-89.
- [21] Palm A, Strom R G. The craters in the lunar walled plain ptolemaeus[J]. Planetary and Space Science, 1963, 11(2): 125-134.
- [22] Dodd R T, Salisbury J W, Smalley V G. Crater frequency and the interpretation of lunar history[J]. Icarus, 1963, 2(5/6): 466-480.
- [23] Hartmann W K. On the distribution of lunar crater diameters [J]. Communications of the Lunar and Planetary Laboratory, 1964, 2(1): 197-204.
- [24] Chapman C R, Haefner R R. A critique of methods for analysis of the diameter-frequency relation for craters with special application to the Moon [J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 72(2): 549-557.

- [25] Strom R G. Origin and relative age of lunar and mercurian intercrater plains[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1977, 15(2): 156-172.
- [26] Hartmann W K, Strom R G, Weidenschilling S J, et al. Chronology of planetary volcanism by comparative studies of planetary cratering[M]//*Basaltic Volcanism on the Terrestrial Planets*. New York: Pergamon Press, 1981: 1049-1127.
- [27] Neukum G, Ivanov B A, Hartmann W K. Cratering records in the inner solar system in relation to the lunar reference system[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 96: 55-86.
- [28] Hartmann W K, Ryder G, Dones L, et al. The time-dependent intense bombardment of the primordial Earth/Moon system[M]//Canup R M, Righter K. *Origin of the Earth and Moon*. Tucson: University of Arizona Press, 2000: 493-512.
- [29] Neukum G. Meteoritenbombardement und Datierung Planetarer Oberflächen[D]. Bavaria: University of Munich, 1983: 1-186.
- [30] Neukum G, Ivanov B A. Crater size distributions and impact probabilities on Earth from lunar, terrestrial-planet, and asteroid cratering data [M]//Gehrels T G. *Hazards Due to Comets and Asteroids*. Tucson: University of Arizona Press, 1994: 359-416.
- [31] 肖智勇, 曾佐勋. 撞击坑统计技术在行星表面定年应用中的误区[J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2013, 38(增刊 1): 146-160.
- [32] Xiao Z Y, Strom R G. Problems determining relative and absolute ages using the small crater population [J]. *Icarus*, 2012, 220(1): 254-267.
- [33] Stoffler D, Ryder G. Stratigraphy and isotope ages of lunar geologic units: Chronological standard for the inner solar system[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 96: 9-54.
- [34] Baldwin R B. *The Face of the Moon*[M]. Chicago: The University of Chicago Press, 1949: 1-191.
- [35] Arthur D, Agnieray A P, Horvath R A, et al. The system of lunar craters, quadrant I[J]. *Communications of the Lunar and Planetary Laboratory*, 1964, 2: 71-78.
- [36] Trask N J, Rowan L C. Lunar orbiter photographs: Some fundamental observations [J]. *Science*, 1967, 158: 1529-1535.
- [37] Ronca L B, Green R R. Large-scale evolution of the lunar surface[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1969, 3(4): 564-578.
- [38] Pohn H A, Offield T W. Lunar Crater Morphology and Relative-Age Determination of Lunar Geologic Units-Part 1. Classification[R]. Geological Survey Professional Paper. US Geological Survey Publication, 1970: 153-162.
- [39] Soderblo L A, Lebofsky L A. Technique for rapid determination of relative ages of lunar areas from orbital photography [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 77(2): 279-296.
- [40] McGill G E, Wise D U. Regional variations in degradation and density of martian craters[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1972, 17(14): 2433-2441.
- [41] McGill G E. Morphology of lunar craters: Test of lunar erosional models[J]. *Icarus*, 1974, 21(4): 437-447.
- [42] Basilevskii A. On the evolution rate of small lunar craters [C]//*Proceedings of the 7th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1976: 1005-1020.
- [43] Boyce J M, Dial A L Jr. Relative ages of flow units in Mare Imbrium and Sinus Iridum[C]//*Proceedings of the 6th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1975: 2585-2595.
- [44] Wilhelms D E. *Stratigraphy of Part of the Lunar Near Side* [M]. Washington, DC: US Government Printing Office, 1980: 1-67.
- [45] Lucey P G, Blewett D T, Taylor G J, et al. Imaging of lunar surface maturity[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E8): 20377-20386.
- [46] Grier J A, McEwen A S, Lucey P G, et al. Optical maturity of ejecta from large rayed lunar craters[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2001, 106(E12): 32847-32862.
- [47] Cirlin E H, Housley R M, Goldberg I B, et al. Ferromagnetic resonance as a method for studying regolith dynamics and breccia formation[C]//*Proceedings of the 5th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1974: 121-122.
- [48] Pearce G W, Strangway D W, Gose W A. Magnetic properties of Apollo samples and implications for regolith formation [C]//*Proceedings of the 5th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1974: 2815-2826.
- [49] Housley R M, Cirlin E H, Goldberg I B, et al. Ferromagnetic resonance as a method of studying the micrometeorite bombardment history of the lunar surface[C]//*Proceedings of the 6th Lunar Science Conference*. New York: Pergamon Press, 1975: 3173-3186.
- [50] Nettles J W, Staid M, Besse S, et al. Optical maturity variation in lunar spectra as measured by Moon Mineralogy Mapper data [J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2011, 116(E00G17): 1-12.
- [51] Stöffler D, Knöll H-D, Marvin U B, et al. Recommended classification and nomenclature of lunar highland rocks: A committee report[C]//*Proceedings of the Conference on the Lunar Highlands Crust*. New York and Oxford: Pergamon Press, 1980: 51-70.
- [52] Heiken G H, Vaniman D T, French B M. *Lunar Sourcebook: A User's Guide to the Moon*[M]. London: Cambridge University Press, 1991: 1-650.
- [53] Touboul M, Kleine T, Bourdon B, et al. Tungsten isotopes in ferroan anorthosites: Implications for the age of the Moon and lifetime of its magma ocean[J]. *Icarus*, 2009, 199(2): 245-249.
- [54] Touboul M, Kleine T, Bourdon B, et al. Late formation and prolonged differentiation of the Moon inferred from W iso-

- topes in lunar metals[J]. *Nature*, 2007, 450: 1206-1209.
- [55] Lee D C, Halliday A N, Snyder G A, et al. Age and origin of the moon[J]. *Science*, 1997, 278: 1098-1103.
- [56] Carlson R W, Boyet M. Short-lived radionuclides as monitors of early crust-mantle differentiation on the terrestrial planets [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 279 (3): 147-156.
- [57] 周琴, 吴福元, 刘传周. 月球同位素地质年代学与月球演化 [J]. *地球化学*, 2010, 39(1): 37-49.
- [58] Boyet M, Carlson R W. A new geochemical model for the Earth's mantle inferred from  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  systematics[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2006, 250(1/2): 254-268.
- [59] Nyquist L E, Wiesmann H, Bansal B, et al.  $^{146}\text{Sm}$ - $^{142}\text{Nd}$  formation interval for the lunar mantle[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1995, 59(13): 2817-2837.
- [60] Rankenburg K, Brandon A D, Neal C R. Neodymium isotope evidence for a chondritic composition of the Moon[J]. *Science*, 2006, 312: 1369-1372.
- [61] Boyet M, Carlson R W. A highly depleted moon or a non-magma ocean origin for the lunar crust[J]? *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, 262(3/4): 505-516.
- [62] 李珂, 陈建平, 奚晓旭, 等. 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.
- [63] Hartmann W K. Paleocratering of the Moon: Review of post-Apollo data[J]. *Astrophysics and Space Science*, 1972, 17 (1): 48-64.
- [64] Neukum G, König B, Fechtig H, et al. Cratering in the Earth-Moon system; Consequences for age determination by crater counting[C]//*Proceedings of the 6th Lunar Science Conference*. New York; Pergamon Press, 1975; 2597-2620.
- [65] Neukum G, König B. Dating of individual lunar craters[C]//*Proceedings of the 7th Lunar Science Conference*. New York; Pergamon Press, 1976; 2867-2881.
- [66] Durda D D, Greenberg R, Jedicke R. Collisional models and scaling laws; A new interpretation of the shape of the main-belt asteroid size distribution[J]. *Icarus*, 1998, 135(2): 431-440.
- [67] Ivanov B A, Neukum G, Wagner R. Size-frequency distributions of planetary impact craters and asteroids[M]//*Marov M Y, Rickman H. Collisional Processes in the Solar System*. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 2001; 1-34.
- [68] Hartmann W K, Neukum G. Cratering chronology and the evolution of Mars[J]. *Space Science Reviews*, 2001, 96: 165-194.
- [69] Michael G G, Neukum G. Planetary surface dating from crater size-frequency distribution measurements; Partial resurfacing events and statistical age uncertainty[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, 294(3/4): 223-229.
- [70] Hackman R J. Geologic map and sections of the Kepler region of the Moon, scale, 1:1000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1962; 1-355.
- [71] Marshall C H. Geologic map and sections of the Letronne region of the Moon, scale, 1:1000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1963; 1-385.
- [72] Hackman R J. Geologic map of the Montes Apenninus region of the Moon, scale, 1:1000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1966; 1-463.
- [73] Eggleton R E, Marshall C H. Notes on the Apenninian series and pre-Imbrian stratigraphy in the vicinity of Mare Humorum and Mare Nubium[R]//*Astrogeologic Studies Semianual Progress Report*. Washington DC: NASA, 1962; 132-137.
- [74] Eggleton R E. Preliminary geology of the Rhipaeus quadrangle of the Moon and definition of the Fra Mauro Formation [R]//*Astrogeologic Studies Annual Progress Report*. Washington DC: NASA, 1964; 46-63.
- [75] Wilhelms D E, McCauley J F. Geologic map of the near side of the Moon, scale 1:5000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1971; 1-703.
- [76] Stuart-Alexander D E. Geologic map of the Rheita quadrangle of the Moon, scale 1:1000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1971; 1-694.
- [77] McCauley J F. Geologic map of the Hevelius region of the Moon, scale 1:1000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1967; 1-491.
- [78] McCauley J F. Geologic results from the lunar precursor probes[J]. *The American Institute of Aeronautics and Astronautics Journal*, 1968, 6(10): 1991-1996.
- [79] Offield T W. Geologic map of the Schiller quadrangle of the Moon, scale 1:1000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1971; 1-691.
- [80] Rowan L C. Geologic map of the Rupes Altai quadrangle of the Moon, scale 1:1000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1971; 1-690.
- [81] Taylor S R. *Planetary Science: A Lunar Perspective*[M]. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1982.
- [82] Halliday A N. Terrestrial accretion rates and the origin of the Moon[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 176 (1): 17-30.
- [83] Stoffer D, Bischoff A, Borchardt R, et al. Composition and evolution of the lunar crust in the descartes highlands, Apollo-16[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(Suppl 2): C449-C506.
- [84] Stadermann F J, Heusser E, Jessberger E K, et al. The case for a younger Imbrium Basin: New  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  ages of Apollo-14 rocks[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1991, 55 (8): 2339-2349.
- [85] Dalrymple G B, Ryder G.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  age spectra of Apollo 15 impact melt rocks by laser step-heating and their bearing on

- the history of lunar basin formation[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1993, 98(E7): 13085-13095.
- [86] Norman M D, Nemchin A A. A 4.2 billion year old impact basin on the Moon: U-Pb dating of zirconolite and apatite in lunar melt rock 67955[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, 388: 387-398.
- [87] 张福勤, 李春来, 邹永廖, 等. 月球的构造演化-嫦娥月图解释的理论基础[J]. *地球化学*, 2010, 39(2): 110-122.
- [88] 丁孝忠, 韩坤英, 韩同林, 等. 月球虹湾幅(LQ-4)地质图的编制[J]. *地学前缘*, 2012, 19(6): 15-27.
- [89] Jolliff B L, Gillis J J, Haskin L A, et al. Major lunar crustal terranes: Surface expressions and crust-mantle origins[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E2): 4197-4216.
- [90] Petro N E, Pieters C M. The lunar-wide effects of basin ejecta distribution on the early megaregolith[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2008, 43(9): 1517-1529.
- [91] Wilhelms D E, Howard K A, Wilshire H G. Geologic map of the south side of the Moon, scale 1:5000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1979: 1-1162.
- [92] Stuart-Alexander D E. Geologic map of the central far side of the Moon, scale 1:5000000[M]//*Geologic Atlas of the Moon*. Washington DC: US Geological Survey, 1978: 1-1047.
- [93] Wood C A, Gifford A W. Evidence for the lunar big backside basin[C]//Merrill R B, Schultz P H. *Proceedings of Conference on Multi-ring Basins: Formation and Evolution*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 1980: 121-123.
- [94] Leikin G A, Sanovich A N. Origin of the southern basin on the far side of the Moon[J]. *Astronomicheskii Vestnik*, 1985, 19: 113-119.
- [95] Petro N E, Pieters C M. Reconstructing the stratigraphy of the ancient south pole-aitken basin interior[C]//*The Moon Beyond 2002: Next Steps in Lunar Science and Exploration*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2002: 47.
- [96] Hiesinger H, Head J W. Lunar South Pole-Aitken impact basin: Topography and mineralogy[C]//*Proceedings of the 35th Lunar and Planetary Science Conference*. New York: Pergamon Press, 2004: 1164.
- [97] Shevchenko V V, Chikmachev V I, Pugacheva S G. Structure of the South Pole-Aitken lunar basin[J]. *Solar System Research*, 2007, 41(6): 447-462.
- [98] Garrick-Bethell I, Zuber M T. Elliptical structure of the lunar South Pole-Aitken basin[J]. *Icarus*, 2009, 204(2): 399-408.