

基于DEM的月球雨海地区粗糙度研究

严艳梓, 汤国安, 熊礼阳, 方 炫

(南京师范大学虚拟地理环境教育部重点实验室, 南京 210023)

摘要: 月球表面粗糙度是揭示月表地貌形态空间分异特征的重要指标,并在一定程度上映射月表地貌的形成与演化机理。运用基于中国“嫦娥一号”卫星获取的DEM数据,提取月球雨海地区的月表粗糙度,并在月球正面地质图数据辅助下,分析月表粗糙度分布特征及其与地质单元岩性以及地质年龄的关系。结果显示:月球雨海地区的粗糙度与地质单元岩性存在较强相关关系,且随着地质年龄的增长,玄武岩单元的粗糙度呈现增大的趋势。此外,在小于7 km的尺度范围内,雨海地区受持续撞击作用的影响,Hurst指数分布在0.7~0.9之间,地形较为粗糙;在更大尺度上,由于受到火山熔岩流充填机制的控制,Hurst指数不断减小,地形不断趋于平缓。

关键词: 粗糙度;月球雨海地区;地质单元岩性;地质年龄;撞击作用;火山作用

DOI: 10.11821/dlyj201408005

1 引言

行星科学家认为月球是一个端元星体,由于在长期月球地质时代内,其岩石圈是相对冷的、刚性和完整的(“单板块”行星),且表层一直没有受到板块活动、大气圈、水或生命的影响,从而月球保存着近40亿年的月球地质作用记录^[1]。地表粗糙度是一种地形学意义上的粗糙度,是指在一定研究范围的分析尺度下对地表起伏状况的一种数学表达,反映了地表的起伏程度。月球表面粗糙度应用了地表粗糙度^[2]的分析原理与方法,对于深入揭示月球表面岩浆作用、沉降和隆升等作用在月球表面留下的记录,推断其相对地质年龄^[3],揭示月表地貌形态特征及其演化过程具有重要的意义。同时,还可为勘测航天器在月表适宜地形的软着陆场的寻找提供重要的参考依据^[4]。此外,月表粗糙度是影响月球表面热辐射状况的重要因素,因而也成为光学与微波遥感关注的焦点^[5-7]。

随着月表探测技术的发展,人们实现了对月球cm级到 μm 级别波长的电磁波探测。这些探测技术为微观研究月表粗糙度提供了坚实的数据支撑。近年来,月球数字高程模型获取技术不断改进^[8,9],基于DEM的数字地形分析技术^[10]以及辅助地质信息的DEM地学应用不断完善与拓展^[11,12],为宏观研究月表粗糙度提供了数据与方法支持。目前,已有许多学者对不同分析尺度^[13](下文涉及到的“尺度”,也指分析尺度)下的月表粗糙度进行剖析,探讨月表粗糙度(以下简称为粗糙度)的影响及作用机制,主要可以归纳为:
① 在 μm 级别尺度下,Johnson等研究发现该尺度下粗糙度对物质组成不敏感^[7],且有研

收稿日期: 2013-11-15; 修订日期: 2014-03-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171320); 江苏省高校自然科学研究项目(13KJA170001)

作者简介: 严艳梓(1991-),女,福建莆田人,硕士,主要从事DEM数字地形分析研究。

E-mail: yanyanzi519@gmail.com

通讯作者: 汤国安(1961-),男,浙江宁波人,教授,博士生导师,主要从事DEM数字地形分析研究。

E-mail: tangguoan@njnu.edu.cn

究发现, 当不考虑物质组成差异时, 物质平均粒度越小, 地形越粗糙^[14]。②在mm至cm级别尺度下, Helfenstein等对月土成熟度与粗糙度的关系研究表明两者呈负相关关系^[15]。③在dm级别尺度下, Helfenstein等研究认为粗糙度与光学反照率有关^[16]。④在m至km级别尺度下, 相关研究认为粗糙度与高程、表面年龄、月土的积累和改造过程、退化或沉积过程、早期地质事件(如撞击、火山和构造等活动)等有关^[9,15,17-20]。综上所述, 已有 μm 、mm至cm、dm级别的尺度上, 皆有考虑岩性与粗糙度的关系, 包括从物质组成、物质成熟度、物质光学反照率等方面研究粗糙度特征。然而, 在m至km级别尺度下的月表粗糙度研究, 尚没有从岩性的角度探讨其与月表粗糙度的关系。再者, 处于不同地质时期的相同岩性地质单元, 其表面的粗糙度可能不同^[19,21,22]。以月海玄武岩为例, 目前大都是以大型盆地整体作为研究对象, 研究月海玄武岩表面粗糙度与地质年龄的关系。然而, 这些研究都没有剖析盆地内部沉积的火山平原被不同时期的熔岩流逐层充填的粗糙度特征^[19,20]。虽然奚晓旭等运用Hurst指数分析了虹湾内部不同地质年龄的玄武岩单元的粗糙度分异特征^[23], 但因其研究涉及的分析尺度过小(最大分析尺度仅有3 km), 所选取的地形剖面都只呈现单一的分形特征。而事实上, 月海地形大多是呈双线性分形或复杂分形特征的^[19], 因此, 有必要从更大的分析尺度上, 更为全面地分析月海内部充填的不同地质年龄的玄武岩单元的粗糙度特征。

在雨海纪晚期大撞击终止以后, 持续喷出的月海玄武岩能够残存在月球表面。因此, 雨海盆地较好地保留了自雨海事件以来月球的地质作用记录, 是月表上形态发育较为“成熟”的区域, 在其表面进行粗糙度研究, 是研究雨海事件和后雨海的关键。因此, 选取月球雨海地区作为研究区域, 以月球数字高程模型为基础数据, 结合月球地质图, 研究雨海地区地质单元岩性与其粗糙度的分布关系, 并深入剖析雨海内部不同时期的相同岩性玄武岩单元的粗糙度分布特征与其地质年龄之间的关系。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

2.1.1 地貌特征 选取以雨海盆地为中心、南北长约1200 km、东西长约1500 km的矩形区域为研究区(图1、图2)。雨海是月球上的第二大月海, 地处广阔的月海区域, 东靠澄海, 西接风暴洋, 北邻冷海。研究区内, 雨海撞击事件围绕雨海中心形成了若干正断层, 并演化为雨海盆地的第二层环形山脉^[24]。雨海纪该区内发生的“重轰击”造就了虹湾、柏拉图和阿基米德三个大型撞击坑, 后被月海玄武岩充填, 因此, 雨海外围有海拔较高的环形山, 其内部地势整体比较低、且地形较为平缓。雨海盆地发生的岩浆活动可以分为不同期次, 主要集中在晚雨海世到爱拉托辛纪期间。雨海内部的玄武岩地势变化呈现出一定规律性, 即由南向北地形总体上呈现出阶梯状逐渐降低趋势^[25-27]。

2.1.2 岩性特征 雨海地区是克里普岩的重要分布区域, 其主要特征是月海

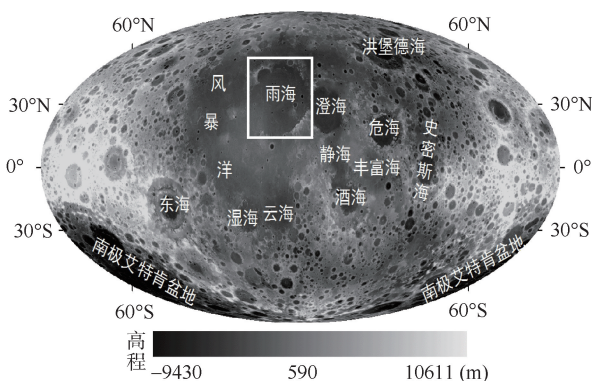


图1 研究区(雨海)位置示意图

Fig. 1 The location of research area (Mare Imbrium)

玄武质熔岩流丰富，仅地形高耸地区（如雨海盆地边缘）未被熔岩流覆盖。该区内分布有八种基本地质单元^[28]，分别为：撞击盆地单元（Circumbasin Materials）、暗平原单元（Dark Materials）、直径大于 10 km 的撞击坑单元（Materials of Main-Sequence Craters）、物质来源分明的亮平原单元（Distinctive Materials）、物质来源复杂的亮平原单元（Nondistinctive Materials）、不规则形状的撞击坑单元（Irregular-Crater Materials）、次级撞击坑单元（Materials of Crater Chains and Clusters）以及无法辨别的撞击坑单元（Undivided Crater Materials）（图 3），这八种地质单元的岩性差异体现在其成因或物质成分的差异（表 1）。因不规则形状的撞击坑单元、次级撞击坑单元以及无法辨别的撞击坑单元占研究区的面积比例之和不足 1%，文中不予考虑。

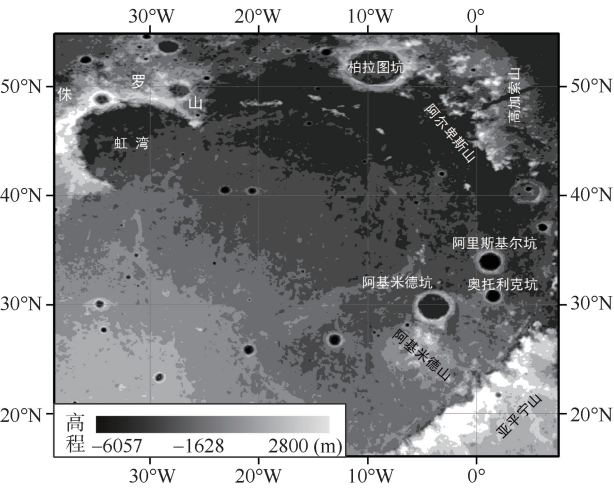


图 2 雨海地区地势图（DEM 分层设色）
Fig. 2 DEM based topographic map of Mare Imbrium

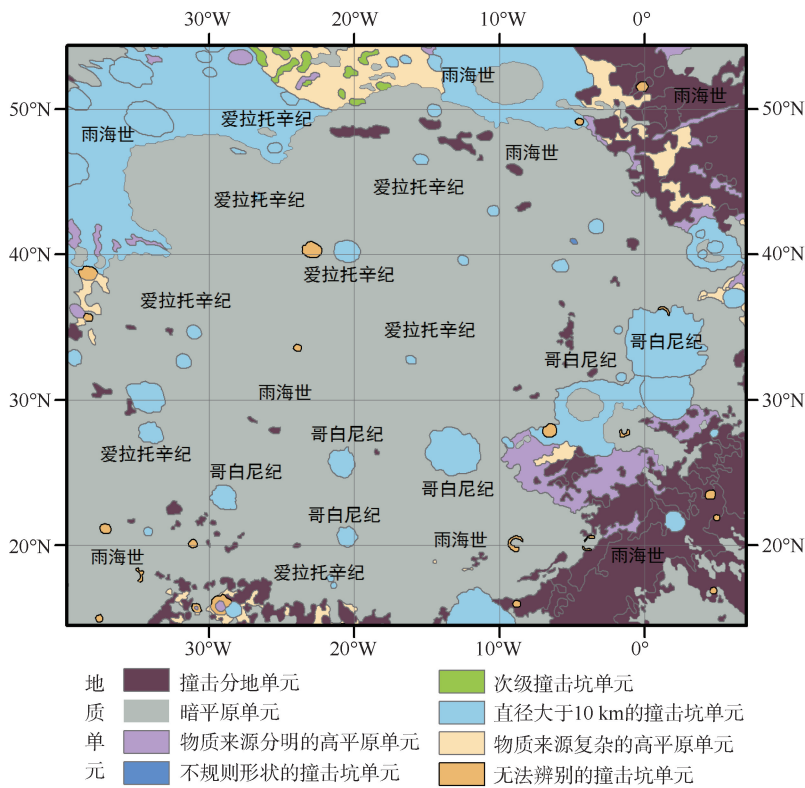


图 3 雨海地区的地质单元分布^[28]
Fig. 3 Map of geologic units in Mare Imbrium

表1 雨海地区内八种地质单元岩性特征^[28-33]
Tab. 1 Lithological conditions of eight geologic units in Mare Imbrium

地质单元类型 及面积比例	成因	单元组成	物质组成
撞击盆地（12.2%）	雨海世大撞击作用	If（弗拉摩罗建造）	多元角砾岩和撞击熔融岩
		Ial（阿尔卑斯建造）	前雨海纪基岩、雨海溅射物
		Iap（亚平宁建造）	与火山KREEP岩相关
		pIr（前雨海纪地形崎岖不平的地质单元）	可能与火山玻璃相关的火成碎屑沉积
暗平原（65.73%）	由火山作用喷发玄武质熔岩流所充填	Im（雨海纪平原）	雨海纪玄武质熔岩流、火成物质
		Em（爱拉托辛纪平原）	爱拉托辛纪熔岩流、火成物质
直径大于10km的 撞击坑单元 （15.34%）	规模较小的陨石撞击作用	Ic（雨海纪撞击坑）	多元角砾岩和撞击熔融岩
		Ec（爱拉托辛纪撞击坑）	多元角砾岩和撞击熔融岩
		Cc（哥白尼纪撞击坑）	多元角砾岩和撞击熔融岩
物质来源分明的亮平原（2.32%）	高地火山作用	Ip（雨海纪平原）	主要为火山物质组成
物质来源复杂的亮平原（3.43%）	冲击侵蚀作用和沉积作用	It（雨海纪高地）	可能由原生溅射物、当地物质、火山作用物混合组成
不规则形状的撞击坑单元（0.01%）	斜撞击作用		—
次级撞击单元（0.55%）	溅射物撞击作用		—
无法辨别的撞击坑单元（0.41%）	微陨石撞击或已严重退化		—

2.2 数据来源与处理

基础数据为中国嫦娥一号卫星获取的500 m分辨率月表DEM^[34,35] (<http://moon.bao.ac.cn/>)。该DEM是由CE-1三线阵CCD推扫式相机获取的影像数据经数字摄影测量技术处理后获得的，其高程基准面是在半径为1737.4 km的GCS_Moon_2000正球体的基础上建立的，空间分辨率为500 m，平面中误差192 m，高程中误差120 m，投影方式为简单圆柱投影。另外，采用美国地质勘探局制作的不同比例尺的月球地质图为基本信息源，分析月表粗糙度与不同地质单元岩性及地质年龄的关系。

2.3 粗糙度研究方法

由于地形的复杂性，采用单一的粗糙度指数难以对其进行全面表达。Shepard等提出若干个量化行星表面粗糙度的参数^[4]。这些参数通常都是在二维高程剖面线的基础上定义的。其中，最常用、最简单的参数是均方根高程和均方根偏差。均方根高程反映了地表高度偏离平均高度的程度，是垂直方向上的度量；均方根偏差引入结构函数，能够表达高度在水平方向上的变化。然而，这两个参数都是依赖于廓线长度和采样间距的，当廓线长度固定时，这两个参数随着采样间距的变化，呈现“分形”特征；当采样间距不变时，这两个参数随着廓线长度的变化，同样表现出“分形”特征。而Hurst指数不仅可以刻画这种分形特征，同时其本身也是粗糙度参数的一种。因此，选取均方根高程、均方根偏差、Hurst指数分析雨海地区的粗糙度。为了最大程度地反映地形的真实特征，在计算这三个参数时，应选取足够的样本量，以避免因选取的样本不具代表性或出现异常值而影响对总体地形特征的准确判断。

2.3.1 均方根高程 在获取均方根高程前，剖面线需经过“去趋势处理”来消除传感器在获取数据时产生的偏移对后期计算产生的影响^[4]。均方根高程 σ 是高程观测样本集的

标准差, 计算公式^[4]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n [h_i - \bar{h}]^2} \quad (1)$$

式中: n 为剖面线中观测样本点个数; h_i 为在给定剖面线的位置 i 处高程值; \bar{h} 为所有观测样本的平均高程。一般情况下, 地表越粗糙, 均方根高程越大。

剖面线不能完全地覆盖地表, 由此获得的粗糙度无法全面地反映地表的起伏状况。并且, 均方根高程具有尺度依赖性^[4,19,36], 因此, 在量化过程中合理选取步长尤为关键。为此, 采用 Rosenburg 等提出的窗口分析方法^[19], 通过 $1^\circ \times 1^\circ$ ($30 \text{ km} \times 30 \text{ km}$) 的窗口, 统计求取均方根高程。通过窗口分析, 能够直观地展现研究区粗糙度的整体分布情况, 实现从垂直方向上衡量不同岩性特征情况下粗糙度的分异特征。

2.3.2 均方根偏差 雨海地区月海玄武岩的充填活动为多期逐层充填, 每期月海玄武岩的充填流动大体上保持由南向北方向, 并且活动规模逐渐减小^[37]。这种玄武岩流动和充填过程造成较年轻玄武岩在雨海地区南部分布较多, 较老玄武岩在较北部地区出露。总体上, 随着月海玄武岩单元年龄不断变小, 其平均海拔呈现一定的增高趋势^[37]。采用均方根偏差来分析在南北方向上雨海地区玄武岩单元的年龄与其粗糙度的关系。

均方根偏差与变异函数、结构函数有关, 与所选择的水平步长 (Δx) 密切相关, 定义如下^[4]:

$$v(\Delta x) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [h_i - h_{i+\Delta x}]^2} \quad (2)$$

通常情况下, 均方根偏差与步长满足^[4]:

$$v(\Delta x) = v_0 \left(\frac{\Delta x}{\Delta x_0} \right)^H \quad (3)$$

式中: v_0 是在 Δx_0 , 即单位尺度内 (最小步长) 的均方根偏差; 根据 Shepard 等^[4]的研究, 步长的选取不能大于剖面线长度的 $1/10$; H 为 Hurst 指数, 取值在 $0 \sim 1$ 之间。

关于均方根偏差参数的获取, 不采用窗口分析方法, 即在全局区域内不考虑不同岩性特征下粗糙度在水平方向的分异。其原因是: 如采用窗口分析方法统计求取, 步长选择需小于 3 km ^[4], 即小于 6 个栅格。但当步长为 3 km 时, 样本对过少。若要使样本对数量满足条件, 需减小步长, 这样不仅计算量较大, 而且样本间距过小, 对其进行采样统计将失去意义。

为此, 采用基于剖面线分析方法获取均方根偏差参数, 剖面选取成为关键。从研究目的出发, 剖面选择应考虑三点: 一是剖面所在区域具有明显的地形变化; 二是考虑撞击坑的分布; 三是覆盖不同地质时期的玄武岩。因此, 选择 $30^\circ \text{ N} \sim 45^\circ \text{ N}$ 、 $30^\circ \text{ W} \sim 20^\circ \text{ W}$ 的范围作为剖面样区, 样区内包含勒·维尼尔 (Le Verrier) 撞击坑、赫利康 (Helicon) 撞击坑和卡林尼 (Carlini) 撞击坑三个典型撞击坑。考虑玄武岩单元年龄的纬向特征, 沿南北方向等 25 km 间隔选取 20 条等长剖面 (340 km) 进行均方根偏差计算^[38], 具体剖面位置如图 4 所示。

2.3.3 Hurst 指数 Hurst 指数可以度量复杂的自仿射形体的不规则性, 通常用于间接获取分形维数, 是地表粗糙度的直观表达。Hurst 指数值小, 代表随着分析尺度的增大地表随之变得平缓, 说明地表构造样式简单; 相反, Hurst 指数值大, 代表在研究尺度不断变大时地表粗糙度仍保持在一个稳定的水平, 说明地表构造样式丰富。Hurst 指数为 1 的地形被称为“自相似地形”; Hurst 指数为 0.5 的地形被称为“布朗地形”, 即一种“随机”地形。

研究表明,并非所有的粗糙表面都具有分形特性^[39-41],因此,对剖面的研究应首先确定其是否具有分形特征。根据公式(3),均方根偏差与步长也可满足:

$$\lg \frac{v(\Delta x)}{v_0} = H \lg \left(\frac{\Delta x}{\Delta x_0} \right) \quad (4)$$

$$\text{令: } p = \lg \frac{v(\Delta x)}{v_0}, q = \lg \left(\frac{\Delta x}{\Delta x_0} \right) \quad (5)$$

式(4)中:Hurst指数可以通过双对数图拟合得到。在 p 与 q 坐标图上,如果 p 与 q 呈线性关系,且直线的斜率 k_j 满足 $0 \leq k_j \leq 1$,则该剖面是分形的;否则剖面是不分形的,即Hurst指数在此无意义。

地形变化是复杂多样的, p - q 曲线可呈现不同特征。在有些情况下, p - q 曲线仅呈现单一的线性相关(图5a),即具有严格分形特征。而在有些情况下, p - q 曲线显示为双线性特征(图5b),即Hurst指数在双线交点(转折点)对应的尺度下发生转变。这种现象通常被认为:以转折点为尺度界线,地表在该界线内外的尺度上,其形成与改造过程发生变化^[4,19]。此外,在小于转折点所指示的尺度下, p 随着 q 的增大变化较快,而在大于转折点所对应的尺度下, p 随着 q 的增大变化减小,其变化速率将逐渐趋于0。此外, p - q 曲线也会出现复杂的形态特征(图5c)。

实验中,求算不同步长下的均方根偏差参数需基于同一样本集,同时,应尽可能地从小步长开始,从而保证所拟合Hurst指数的准确性^[4]。拟合Hurst指数时,仅针对存在明显线性特征的部分。当 p - q 曲线存在明显的双线性特征时,拟合线段的首尾端点的确定具有一定的主观性和不确定性。实验允许拟合出的Hurst指数存在 ± 0.05 的误差,且转折点对应的尺度处在20%的误差范围内^[4]。

3 结果分析

3.1 粗糙度提取

使用30 km×30 km的分析窗口计算雨海地区的均方根高程,结果如图6示。粗糙度的较大值主要分布在由构造作用产生的环形山脉、撞击坑等区域,粗糙度的较小值则主要分布在被火山熔岩流充填的平原等区域。

计算20条剖面线的均方根偏差参数中,选取1 km、2 km、3 km、……、32 km、33 km、34 km共34种步长分别进行计算,做出 p - q 曲线,并在此基础上求算Hurst指数,如图7所示(由北向南依次按照剖面顺序求得)。总体上看,每条剖面线都在一定的无标度区内, p - q 曲线呈线性特征,且斜率满足 $0 \leq k_j \leq 1$,表明月球表面存在分形特征。奚晓旭等研究^[23,38]也发现雨海西北部的虹湾地区具有分形特征。

表2给出了各剖面线的粗糙度参数值。其中,Hurst 1和Hurst 2分别指 p - q 曲线可能拟合出的两条具有明显分形特征曲线的Hurst指数值,其对应的分形特征转折点的尺度分

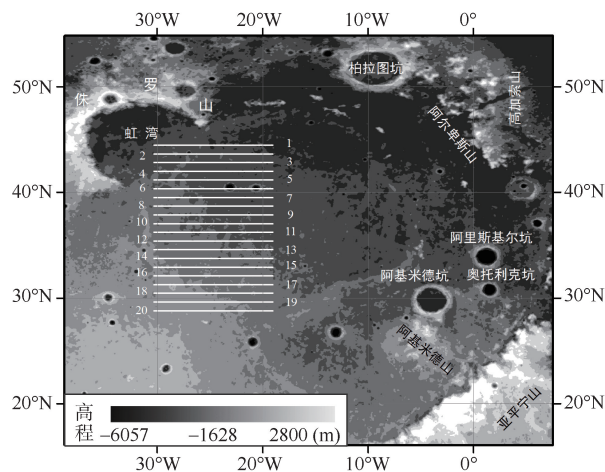


图4 剖面位置

Fig. 4 Location of sampling profiles

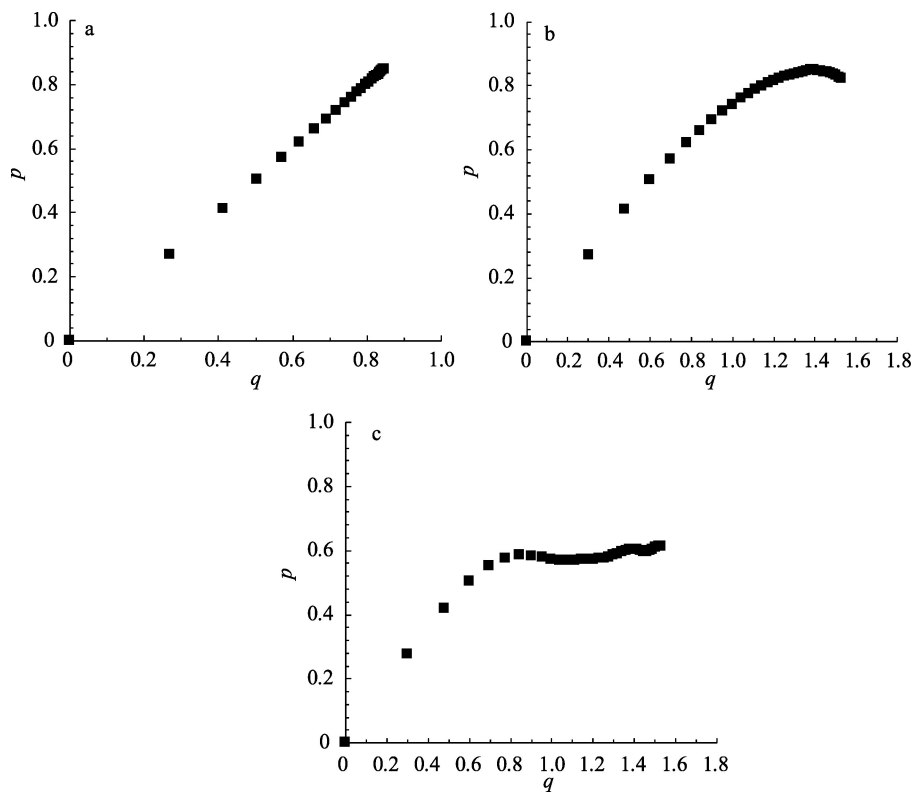


图5 p - q 曲线图

Fig. 5 Deviogram shapes of p - q

注:a表示 p - q 曲线呈单一线性相关;b表示 p - q 曲线呈双线性特征;c表示 p - q 曲线呈复杂形态

别记录为转折点1和转折点2。同时,表2还记录了 p 最大值出现的尺度以及 p - q 曲线的形态类型。单线性的 p - q 曲线,记为M (Monofractal);双线性的,记为B (Bilinear);复杂性的,则记为C (Complicated)。

由表2可知,对于每一条剖面线,均方根偏差随着步长的增大呈增大趋势。对于同一步长,除剖面h 6、h 14以外,其他剖面的均方根偏差由北向南无明显的变化趋势。由此可以推断,在东西方向上,相同间隔距离的高程差异由北向南差异不大。剖面h 6、h 14的均方根偏差相比于其他剖面呈现异常大值,这可能与剖面h 6经过赫利康撞击坑和勒·维尼尔撞击坑,剖面h 14经过卡林尼撞击坑有关。可见,撞击坑可对地形表面粗糙度存在较大的影响。

各剖面的 p - q 曲线,大部分具

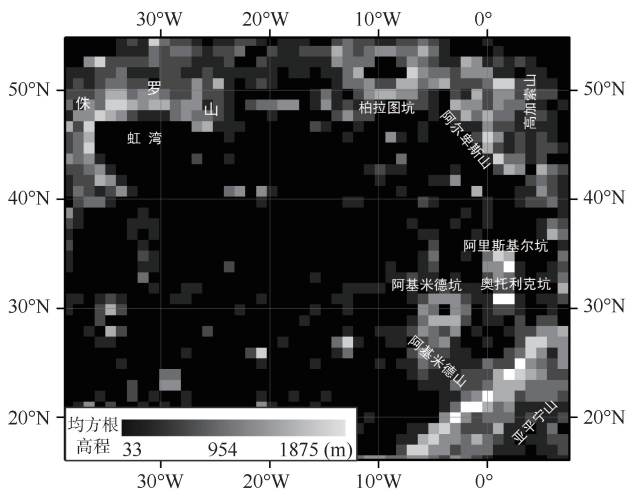
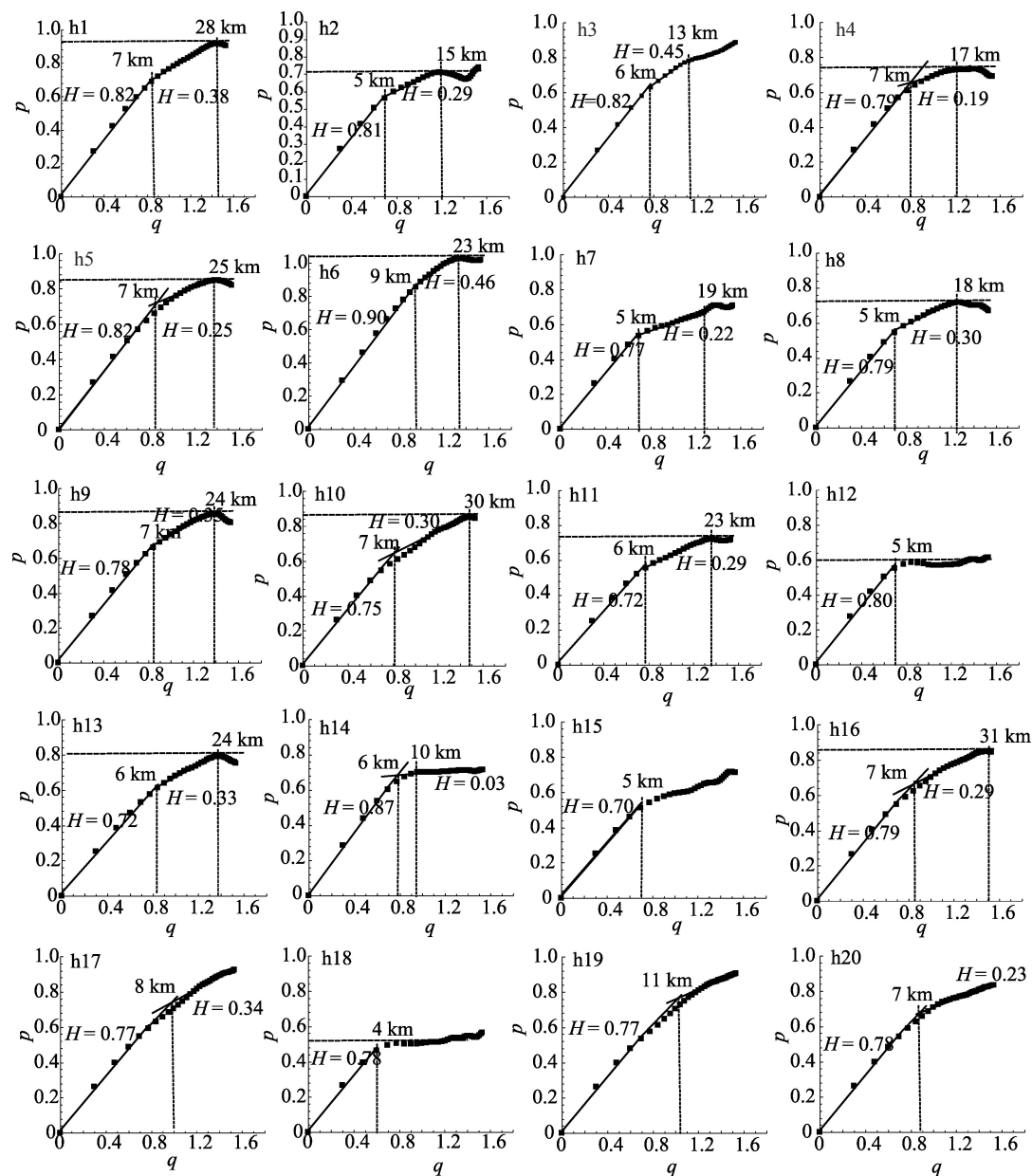


图6 窗口分析统计出的均方根高程结果

Fig. 6 The result of RMS height computed for each $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ cell

图7 各剖面的 p - q 曲线图Fig. 7 p - q shape of each sampling profile

有双线性特征, 少数具有复杂性形态, 说明研究区地形变化较为复杂。复杂形态的 p - q 曲线仅在5 km以内呈线性特征, 而在5 km以后, p 随着 q 的增大呈现无规律的增长。双线性特征的 p - q 曲线第一次发生转折的尺度几乎都是在7 km左右。在大于7 km时, p - q 曲线的线性特征发生改变, 且除h 17、h 19和h 20外, p 都能在 $q < 34$ km内取得最大值。复杂形态和双线性特征的 p - q 曲线, 均存在一个转折尺度, 即存在转折点1对应的尺度(约为7 km)。在小于7 km时, Hurst指数最大, 其值分布在0.7~0.9之间, 中位数为0.78 (在 ± 0.05 的误差允许范围内, 该值与Rosenburg等^[19]得出的0.76值基本吻合), 说明在小

表2 水平方向剖面的粗糙度参数值
Tab. 2 Roughness parameters of horizontal sampling profiles

剖面编号	纬度(°)	均方根偏差			Hurst 1	Hurst 2	转折点1 (km)	转折点2 (km)	<i>p</i> 最大值 (km)	类型
		5 km	15 km	25 km						
h 1	44.48	0.07	0.12	0.14	0.82	0.38	7	28	28	B
h 2	43.65	0.12	0.16	0.15	0.81	0.31	5	15	—	C
h 3	42.83	0.06	0.10	0.11	0.82	0.45	6	13	—	C
h 4	42	0.07	0.10	0.10	0.79	0.19	7	17	17	B
h 5	41.18	0.08	0.14	0.15	0.82	0.25	7	25	25	B
h 6	40.36	0.35	0.72	0.80	0.90	0.46	9	23	23	B
h 7	39.53	0.07	0.09	0.1	0.77	0.22	5	19	—	C
h 8	38.71	0.09	0.12	0.12	0.79	0.3	5	18	18	B
h 9	37.88	0.07	0.11	0.13	0.78	0.35	7	24	24	B
h 10	37.06	0.06	0.1	0.12	0.75	0.3	7	30	30	B
h 11	36.24	0.06	0.09	0.1	0.72	0.29	6	23	23	B
h 12	35.41	0.14	0.14	0.15	0.8	—	5	—	—	C
h 13	34.58	0.06	0.1	0.12	0.72	0.33	7	24	24	B
h 14	33.76	0.29	0.36	0.37	0.87	0.03	6	10	10	B
h 15	32.94	0.07	0.09	0.1	0.7	—	5	—	—	C
h 16	32.11	0.07	0.12	0.14	0.79	0.29	7	31	31	B
h 17	31.29	0.08	0.15	0.18	0.77	0.34	8	—	—	B
h 18	30.46	0.15	0.15	0.16	0.78	—	4	—	—	C
h 19	29.60	0.07	0.13	0.15	0.77	0.25	11	—	—	B
h 20	28.8	0.08	0.13	0.14	0.78	0.24	7	—	—	B

于 7 km 内，地形较为粗糙。当尺度大于 7 km 时，Hurst 指数减小，以存在转折点 2 为例，当尺度介于转折点 1 和转折点 2 之间，Hurst 指数值分布在 0.1~0.5 之间，中位数为 0.30，说明在大于 7 km 时，地形较为平缓。此外，对于双线性特征的 *p-q* 曲线，尽管取得最大值的尺度不同，但是 *p* 在达到最大值后，基本上保持稳定，Hurst 指数近似为 0，如剖面 h 6。而当步长接近剖面线长度的 10% 时，样本量急剧减少，部分剖面的 *p* 在达到最大值后，随着 *q* 的增大开始减小，Hurst 指数出现负值，如 h 9 和 h 13。同时，由于剖面线长度的限制，剖面 h 17、h 19 和 h 20 虽具有明显的双线性特征，但 *p* 在 *q*<34 km 内未能取得最大值。

分析四条经过撞击坑的剖面，即剖面 h 6、h 12、h 14、h 18，其穿过撞击坑的最长长度分别大约为 23 km、6 km、10 km、5 km。四条剖面线地形由复杂趋于平缓的转折尺度分别大约是 23 km、5 km，10 km 及 4 km，这与其穿过撞击坑的长度非常相近。由此推断，在小于 34 km 情况下，撞击作用是地形起伏状况的主要因素。

从上述分析可知，在小于 34 km 的尺度内，剖面样区内地貌改造和演化过程主要受到撞击作用下月土的积累和改造过程控制^[20]。部分地区在小于 7 km 和大于 7 km 表现不同的地形特征，其原因可能是撞击规模不同，前者受到相对较小撞击作用影响，后者则受到较大规模的撞击作用影响。月土被这些持续撞击作用“耕耘”或深翻，最上部均匀化程度不一，因此在月海表面很少见到具有严格分形特征的地形^[19]。在大于 34 km 及更大尺度上，剖面样区表面形态特征受火山作用产生的熔岩流充填控制，地形较为平缓。

3.2 粗糙度与岩性

为了探究雨海地区粗糙度的分布特征与地质单元岩性的关系,将均方根高程数据与地质单元数据进行叠置分析(表3)。

表3 不同地质单元的粗糙度信息统计

Tab. 3 Statistics of roughness of each geologic unit

地质单元类型	最小值(m)	最大值(m)	中位数(m)	平均值(m)	标准差(m)
撞击盆地单元	56.17	1875.22	272.92	358.13	284.48
暗平原单元	32.94	1875.22	96.96	156.71	168.46
物质来源分明的亮平原单元	65.05	1548.70	218.11	291.01	240.82
直径大于10 km的撞击坑单元	47.05	1382.23	259.45	335.80	257.01
物质来源复杂的亮平原单元	62.12	1194.72	226.75	304.16	215.15

从表3中可以看出:①暗平原单元的均方根高程除了最大值外,其他统计参数均小于其余四种地质单元。这是因为暗平原主要是由火山作用形成的熔岩流或火喷泉喷发等的玄武质产物充填形成。其地形较为平缓,因此粗糙度较小。同样,由于五种地质单元都含有火山作用物,因此,五种地质单元的最小粗糙度值均较小且相近。②除了暗平原单元外,撞击盆地单元的均方根高程的相关统计参数值较大于其他三种地质单元,这是由于撞击盆地形成时,因其撞击规模较大,通常伴随有大型环形山脉的隆起,与周围地形产生了强烈的地势差。而暗平原单元的均方根高程最大值与撞击盆地单元的最大值相同。这是因为实验利用窗口分析方法计算均方根高程时,窗口可能同时覆盖了撞击盆地单元和暗平原单元。③尽管撞击盆地单元的均方根高程统计最大值与直径大于10 km的撞击坑单元的最大值相差甚大,二者均方根高程统计得的中位数、平均值和标准差却接近。其原因在于:虽然二者均由撞击作用产生,其物质组成也多是多元角砾岩和撞击熔融岩,但其所经历的构造运动与火山活动不同。撞击盆地形成年代较早,内部沉积有来自雨海纪和爱拉托辛纪的熔岩流,使得盆地周围环形山脉与盆地内部的地势差相比于盆地形成时的小。因此,除个别地区地形起伏剧烈外,盆地整体的地形起伏变小了。而来自哥白尼纪的撞击坑,如阿里斯基尔坑和奥托利克坑,其产生年代晚,由于火山作用在哥白尼纪业已终止,因此其月坑内几乎没有沉积由火山作用形成的熔岩流。所以,尽管雨海纪后期大撞击终止,但哥白尼纪时期所形成的撞击坑,其所在区域的地形起伏也有可能雨海纪时期形成的撞击盆地相差不大,从而出现二者的均方根高程统计得的平均值、中位数和标准差接近的情况。④物质来源分明的“亮平原”被认为是高地火山作用的产物,这些平原形成于最后一次盆地规模的撞击事件与月海的就位之间^[1],且大部分地形平坦,但在某些区域内地形也有一定的起伏。组成这些平原的火山作用物,其光谱反照率比月海玄武岩质高,比盆地和其他地形的组成物质低。因此,物质来源分明的“亮平原”单元,其均方根高程的相关统计值都介于暗平原单元和撞击盆地单元,或直径大于10 km的撞击坑单元之间。⑤物质来源复杂的“亮平原”,其组成成分复杂,包含撞击角砾岩、当地来源物和火山作用物。从这点分析,物质来源复杂的“亮平原”,其均方根高程的相关统计值也应介于暗平原单元和撞击盆地单元,或直径小于10 km的撞击坑单元之间。

综上所述,以火山物质为主要物质组成成分的地质单元粗糙度较小,以撞击角砾岩或撞击熔融岩为主要物质组成成分的地质单元粗糙度较大,而由火山物质和撞击作用产物(撞击角砾岩、撞击熔融岩等)混合组成的地质单元粗糙度介于前两者之间。由此可

以得出, 雨海地区粗糙度的分布与地质单元岩性相关。

3.3 粗糙度与玄武岩单元的地质年龄

比较图3与图6可见: 不同地质时期而相同岩性的地质单元, 从垂直方向上衡量的粗糙度值无明显差异。如: 早雨海世的柏拉图坑单元和哥白尼纪的阿里斯基尔坑单元, 两者的粗糙度相差不大, 都处在同一粗糙度级别。这是因为, 在大尺度上, 柏拉图坑和阿里斯基尔坑同属于直径大于10 km的撞击坑单元, 两者的地形起伏差异较小。由表2可知: 岩性特征一致, 即均由火山作用形成的玄武岩质产物充填; 但在小尺度上, 每条剖面所反映出的地形特征并不完全一致。而许延波等通过撞击坑尺寸—频率分布法获取雨海地区玄武岩单元年龄, 得出位于本实验样区内的玄武岩单元年龄, 由南往北分别是1.91 Ga、2.08 Ga、2.64 Ga^[37]。鉴于该样区内玄武岩单元年龄的纬向分布特征即年龄由南向北逐渐增大, 本研究在此剖析剖面样区粗糙度是否在纬向上也具有一定规律, 其是否与地质年龄存在相关关系。

由3.1节的分析可知, 20条剖面几乎都在小于7 km的尺度内(个别小于5 km)具有分形特征。通过拟合 Hurst 1、Hurst 2 及 Hurst 1 和 Hurst 2 的平均值与其相应剖面所在纬度的关系(图8、图9、图10)可以得到: ① 剖面h 14和h 6因经过典型撞击坑, 其地形起伏变化较大, 因而Hurst 1相比其他剖面呈现异常大值; 剖面h 11-h 15几乎属于同一地质年龄, 地形起伏变化较小, 其中剖面h 11、h 13、h 15的Hurst 1值较小, 剖面h 12、h 14因经过撞击坑Hurst 1值大。除这5个剖面外, 其余15条剖面得到的Hurst 1值均紧密地分布在图8中拟合直线的两侧, 且随着纬度的增大略有增大的趋势, 这说明在小于7 km的尺度内, 样区南部较为年轻的玄武岩单元粗糙度较北部较老的玄武岩单元小, 且在纬向上随着年龄的增长, 粗糙度增大的速率较小。② Hurst 2值的计算具有较大的主观性和不确定性, 实验容许Hurst 2值的误差为 ± 0.05 。各剖面Hurst 2值均较为离散地分布在拟合直线两侧, 彼此差值大约为 ± 0.05 , 因而, 这种离散分布可能是由于Hurst 2值的计算误差导致的。但

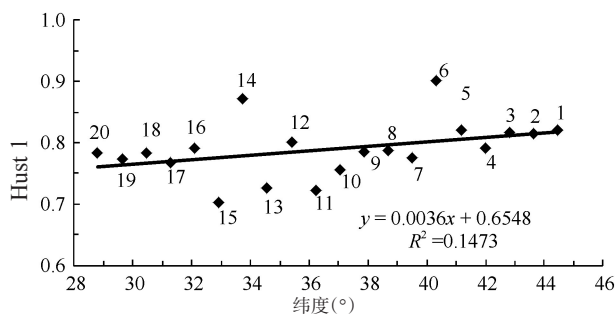


图8 Hurst 1的变化趋势

Fig. 8 The tendency of Hurst 1

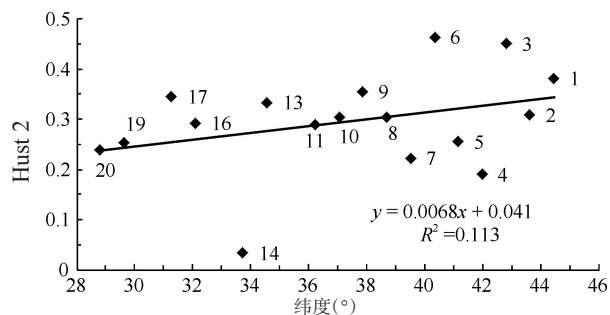


图9 Hurst 2的变化趋势

Fig. 9 The tendency of Hurst2

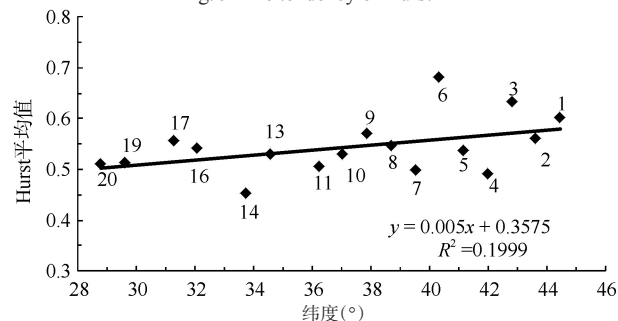


图10 Hurst平均值的变化趋势

Fig. 10 The tendency of mean Hurst exponent

从整体上看, Hurst 2值随着纬度的增大略有增大。这表明在大于7 km的尺度, 样区玄武岩单元随着年龄的增长, 其粗糙度略微增大。③对Hurst 1值和Hurst 2值求取平均值, 不仅能够较好地减弱计算Hurst 2产生误差的影响, 同时也能从整体上表达每条剖面的粗糙度特征。从图10中可知, 除剖面h 6和剖面h 14外, 各剖面的Hurst平均值均较好地分布在拟合直线的两侧, 且粗糙度随着纬度的变化趋势与上述Hurst 1与Hurst 2的变化趋势一致。

4 结论

基于“嫦娥一号”卫星获取的DEM数据, 结合相应地质图, 以粗糙度为切入点, 研究了月球雨海地区粗糙度与岩性、地质年龄之间的关系, 可望揭示月表地貌形态的空间分异特征, 并在一定程度上映射月表地貌的形成与演化机理。

雨海地区的粗糙度与地质单元岩性密切相关。由玄武岩充填的暗平原单元, 粗糙度较小; 由撞击作用形成、物质组成多是多元角砾岩和撞击熔融岩的撞击盆地单元和撞击坑单元, 粗糙度较大; “亮平原”单元的物质组成因可能混杂了火山物质和撞击作用产物, 其粗糙度大小介于前两者之间。月表粗糙度与地质单元岩性之间的这种相关关系反映了地质作用对月表地貌形成与演化过程的影响。

雨海地区的粗糙度与地质年龄也存在一定的相关关系。雨海地区北部较老的玄武岩单元, 其粗糙度比南部较年轻的玄武岩单元大, 且由南向北随着地质年龄的增长, 玄武岩单元粗糙度呈略微增大趋势。同时, 在研究雨海地区粗糙度与地质年龄的纬向分布特征时发现, 在小于7 km的尺度范围内, 雨海地区受持续撞击作用的影响, Hurst指数分布在0.7~0.9之间, 地形较为粗糙; 而在更大尺度上, 由于受到火山熔岩流充填机制的控制, Hurst指数不断减小, 地形不断趋于平缓。值得注意的是, 本研究仅是推断玄武岩单元间的相对地质年龄, 而不是绝对地质年龄。因此, 粗糙度与绝对地质年龄关系研究还有待进一步深入。

参考文献(References)

- [1] Jolliff B L, Gaddis L R, Ryder G, et al. *New Views of the Moon: Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. Washington: Mineralogical Society of America, 2006.
- [2] 江冲亚, 方红亮, 魏珊珊. 地表粗糙度参数化研究综述. 地球科学进展, 2012, 27(3): 292-303. [Jiang Chongya, Fang Hongliang, Wei Shanshan. Review of land surface roughness parameterizations study. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(3): 292-303.]
- [3] Cord A, Baratoux D, Mangold N, et al. Surface roughness and geological mapping at subhectometer scale from the High Resolution Stereo Camera onboard Mars Express. *Icarus*, 2007, 191(1): 38-51.
- [4] Shepard M K, Campbell B A, Bulmer M H, et al. The roughness of natural terrain: A planetary and remote sensing perspective. *Icarus*, 2001, 106(E12): 32777-32795.
- [5] Spencer J R, Lebofsky L A, Sykes M V. Systematic biases in radiometric diameter determinations. *Icarus*, 1989, 78(2): 337-354.
- [6] Bastin J A, Gough D O. Intermediate scale lunar roughness. *Icarus*, 1969, 11(3): 289-319.
- [7] Johnson P E, Vogler K J, Gardner J P. The effect of surface roughness on lunar thermal emission spectra. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 1993, 98(E11): 20825-20829.
- [8] Li Chunlai, Ren Xin, Liu Jianjun, et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model. *Science China: Earth Sciences*, 2010, 53(11): 1582-1593.
- [9] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Initial observations from the Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA). *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(18): L18204.

- [10] 杨昕, 汤国安, 刘学军, 等. 数字地形分析的理论、方法与应用. 地理学报, 2009, 64(9):1058-1070. [Yang Xin, Tang Guoan, Liu Xuejun, et al. Digital terrain analysis: Theory, method and application. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(9): 1058-1070.]
- [11] Xiong Liyang, Tang Guoan, Li Fayuan, et al. Modeling the evolution of loess-covered landforms in the Loess Plateau of China using a DEM of underground bedrock surface. *Geomorphology*, 2014, 209: 18-26.
- [12] 熊礼阳, 汤国安, 袁宝印, 等. 基于DEM的黄土高原(重点流失区)地貌演化的继承性研究. 中国科学: 地球科学, 2014, 44(2): 313-321. [Xiong Liyang, Tang Guoan, Yuan Baoyin, et al. Geomorphological inheritance for loess landform evolution in a severe soil erosion region of Loess Plateau of China based on digital elevation models. *Science China: Earth Science*, 2014, 44(2): 313-321.]
- [13] Grohmann C H, Smith M J, Riccomini C. Multiscale analysis of topographic surface roughness in the Midland Valley, Scotland. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, 2011, 49(4): 1200-1213.
- [14] Dollfus A. Lunar surface imaging polarimetry: Roughness and grain size. *Icarus*, 1998, 136(1): 69-103.
- [15] Helfenstein P, Shepard M K. Submillimeter-scale topography of the lunar regolith. *Icarus*, 1999, 141(1): 107-131.
- [16] Helfenstein P, Veverka J. Photometric properties of lunar terrains derived from Hapke's equation. *Icarus*, 1987, 72(2): 342-357.
- [17] Smith D E, Zuber M T, Neumann G A, et al. Topography of the Moon from the Clementine lidar. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1997, 102(E1): 1591-1611.
- [18] Kreslavsky M A, Head J W. Kilometer-scale slopes on Mars and their correlation with geologic units: Initial results from Mars Orbiter Laser Altimeter (MOLA) data. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 1999, 104(E9): 21911-21924.
- [19] Rosenburg M A, Aharonson O, Head J W, et al. Global surface slopes and roughness of the Moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(E2): E2001.
- [20] Kreslavsky M A, Head J W, Neumann G A, et al. Lunar topographic roughness maps from Lunar Orbiter Laser Altimeter (LOLA) data: Scale dependence and correlation with geologic features and units. *Icarus*, 2013, 226(1): 52-66.
- [21] Farr T G. Microtopographic evolution of lava flows at Cima volcanic field, Mojave Desert, California. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978-2012), 1992, 97(B11): 15171-15179.
- [22] Kreslavsky M A, Head J W. Kilometer-scale roughness of Mars: Results from MOLA data analysis. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E11): 26695-26711.
- [23] 奚晓旭, 刘少峰, 韦蔚, 等. 月表虹湾Hurst指数分析. 地学前缘, 2012, 19(6): 137-143. [Xi Xiaoxu, Liu Shaofeng, Wei Wei, et al. Hurst exponent analysis of the Sinus Iridum of the Moon. *Earth Science Frontier*, 19(6): 137-143.]
- [24] 王敏沛, 陈建平. 月球雨海北部陆地区域构造及其含义. 现代地质, 2012, 26(1): 191-197. [Wang Minpei, Chen Jianping. Regional structure of the northern land of the Lunar Mare Imbrium and the implication. *Geoscience*, 2012, 26(1): 191-197.]
- [25] Hiesinger H, Jaumann R, Neukum G, et al. Ages of mare basalts on the lunar nearside. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2000, 105(E12): 29239-29275.
- [26] Hiesinger H, Head J W, Wolf U, et al. Ages and stratigraphy of mare basalts in Oceanus Procellarum, Mare Nubium, Mare Cognitum, and Mare Insularum. *Journal of Geophysical Research: Planets* (1991-2012), 2003, 108(E7): 1-27.
- [27] Bugiolacchi R, Guest J E. Compositional and temporal investigation of exposed lunar basalts in the Mare Imbrium region. *Icarus*, 2008, 197(1): 1-18.
- [28] Wilhelms D E, McCauley J F. Geologic map of the near side of the Moon: US Geol. Survey Misc Geol. Inv. Map I-703. <http://pubs.usgs.gov/imap/0703/report.pdf>, 2013-09-15.
- [29] Gancarz A J, Albee A L, Chodos A A. Petrologic and mineralogic investigation of some crystalline rocks returned by the Apollo 14 mission. *Earth and Planetary Science Letters*, 1971, 12(1): 1-18.
- [30] Cuttitta F, Rose Jr H J, Annell C S, et al. Chemistry of twenty-one igneous rocks and soils returned by the Apollo 15 mission. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1973, 2(s4): 1081-1096.
- [31] Schmitt H H. Apollo 17 report on the Valley of Taurus-Littrow. *Science*, 1973, 182(4113): 681-690.
- [32] Oberbeck V R. The role of ballistic erosion and sedimentation in lunar stratigraphy. *Reviews of Geophysics*, 1975, 13(2): 337-362.
- [33] Herrick R R, Forsberg Taylor N K. The shape and appearance of craters formed by oblique impact on the Moon and Venus. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(11): 1551-1578.
- [34] 欧阳自远. 嫦娥一号卫星的初步科学成果与嫦娥二号卫星的使命. 航天器工程, 2010, 19(5): 1-6. [Ouyang Ziyuan. Science results of Chang'e-1 Lunar Orbiter and mission goals of Chang'e-2. *Spacecraft Engineering*, 2010, 19(5): 1-6.]

- [35] 欧阳自远, 李春来, 邹永廖, 等. 嫦娥一号的初步科学成果. 自然杂志, 2010, 32(5): 249-254. [Ouyang Ziyuan, Li Chunlai, Zhou Yongliao, et al. The primary science results from the Chang'e-1 Probe. Chinese Journal of Nature, 2010, 32(5): 249-254.]
- [36] 刘学军, 卢华兴, 仁政, 等. 论DEM地形分析中的尺度问题. 地理研究, 2007, 26(3): 433-442. [Liu Xuejun, Lu Huaxin, Ren Zheng, et al. Scale issues in digital terrain analysis and terrain modeling. Geographical Research, 2007, 26(3): 433-442.]
- [37] 许延波, 颜丹平, 俞天石, 等. 雨海地区晚雨海世—爱拉托逊纪月海玄武岩充填过程研究. 地质学报, 2012, 86(8): 1306-1319. [Xu Yanbo, Yan Danping, Yu Tianshi, et al. The filling process of mare basalts from late Imbrian to Eratosthenian in Mare Imbrium. Acta Geologica Sinica, 2012, 86(8) 1306-1319.]
- [38] 奚晓旭, 刘少峰, 吴志远, 等. 基于粗糙度的月表虹湾地区地形地貌解译. 国土资源遥感, 2012, (1): 95-99. [Xi Xiaoxu, Liu Shaofeng, Wu Zhiyuan, et al. The interpretation of the land form of Sinus Iridum on the Moon based on the roughness. Remote Sensing for Land & Resources, 2012, (1): 95-99.]
- [39] Mark D, Aronson P. Scale-dependent fractal dimensions of topographic surfaces: An empirical investigation, with applications in geomorphology and computer mapping. Journal of the International Association for Mathematical Geology, 1984, 16(7): 671-683.
- [40] 张捷, 包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用. 地理研究, 1994, 13(3): 104-112. [Zhang Jie, Bao Haosheng. Fractal geomorphology: Review and prospect. Geographical Research, 1994, 13(3): 104-112.]
- [41] 艾南山, 朱治军, 李后强. 外营力地貌作用随机特性和分形布朗地貌的稳定性. 地理研究, 1998, 17(1): 23-30. [Ai Nanshan, Zhu Zhijun, Li Houqiang. On the stochastic nature of exogenic process and the stability of fractal Brownian landscape. Geographical Research, 1998, 17(1): 23-30.]

Lunar surface roughness of Mare Imbrium based on DEMs

YAN Yanzi, TANG Guoan, XIONG Liyang, FANG Xuan

(Key Laboratory of Virtual Geographical Environment, Ministry of Education, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: Surface roughness, as discussed in this paper, is defined as the topographic expression of surface on a kilometer scale. The lunar terrain reflects its geologic histories. Quantitative measurements of lunar surface roughness can be a powerful tool for interpreting spatial variations of lunar morphology, and contribute significantly to understanding surface formation and evolution process of the Moon. Previous work shows that surface roughness variations of the Moon often correspond to tectonic and volcanic process, while ignoring the possible effects of lithological conditions of geologic units and geologic ages of identical geologic unit on a moderate scale. Mare Imbrium has preserved important clues for lunar geologic histories from the Imbrian Period, a period of the Late Heavy Bombardment of the Moon, to the present day. Thus, analysis of lunar surface roughness of Mare Imbrium could be crucial to learn the Imbrium events and the profound effects on the subsequent and the present appearance of the Moon. Therefore, in this paper, Mare Imbrium is taken as the test area to analyse the possible influences of lithological conditions and geologic ages on distributions of lunar surface roughness respectively. DEMs, produced by three-line digital photogrammetric technology based on the imagery acquired by Chang'E-1 CCD camera, are applied to extract lunar surface roughness. A number of roughness parameters have been employed to quantify surface roughness. Here, three common and simple indicators, i.e. root-mean-square height (RMS height), root-mean-

square deviation (RMS deviation) and Hurst exponent are used in investigating the signatures of surface roughness. Root-mean-square height is the standard deviation of heights about the mean, a description of vertical change of heights of sample points. RMS deviation is related to the structure function, measuring horizontal variation of heights. However, both of these two parameters exhibit dependence of scale. Hurst exponent not only describes the behavior of scale dependence, but also is a roughness parameter. Firstly, we use 30-km windows for surface roughness calculation, spaced 30 km apart. Then the results are overlapped with 1:5,000,000 geologic map of the test area to analyse the distribution of surface roughness grouped by different lithological conditions. Finally, to find out the variation of surface roughness with geologic ages, surface roughness is computed from each 20 east-west profiles with a length of 340 km, sampled in a region at latitudes 30°-45°N and longitudes 30°-20°W. The experimental results show: (1) The higher surface roughness are found in the highlands within crater walls and the rims of large basin, caused by tectonic uplift, while the lower one in dark plains is dominated by flow emplacement mechanisms of volcanic process. (2) Surface roughness can be closely related to lithological conditions of geologic units. There are five geologic units considered. Surfaces of dark materials consisting of lava flows are rough. Surfaces of circumbasin materials and materials of main-sequence craters comprising of impact breccia and/or impact molten rocks are roughest. Consequently, surface of distinctive materials and nondistinctive materials are rougher because of its compound of impact breccia and/or impact molten rocks and lava flows. (3) Surface roughness is higher where lava flows is older. It is indicated that young flows in south are smooth while successively older flows in the north increase slightly in roughness. But, such a trend is not universal. Young lava flows would become rougher than old flows when modified by impact craters. (4) Mare Iridum is roughest at the smallest scale and smoother at large scale. Topography is rougher at small scale with Hurst exponent ranging from 0.7 to 0.9 and a median value of 0.78, while smoother at large scale relative to small scale with Hurst exponent decreasing (even decreasing to 0).

Key words: surface roughness; Mare Imbrium; lithological conditions; geologic ages; impact cratering process; volcanic process