文章编号：1004—5589（2018）01—0302—07

基于粗糙度的雨海地形及撞击坑特征分析

田粉粉，陈圣波，曹一晶，辛欣

吉林大学 地球探测科学与技术学院，长春 130026

摘要：以月球雨海地区为研究区，利用Matlab编程语言，结合分辨率为118 m的DEM数据，得出了该地区的均方根高程及均方根偏差分布图，并在研究区内选取18条剖面线，对其进行多种粗糙度参数计算。结果表明雨海地区粗糙度较大的区域主要分布在环形山和撞击坑等区域，粗糙度较小值则主要分布在被火山熔岩流填充的平原等区域，可以确定在百米尺度上环形山和撞击坑是影响雨海地形粗糙度的重要因素。对单个撞击坑而言，坑壁粗糙度最大，坑缘次之，坑底较为平坦，粗糙度最小。坑底粗糙度增大的现象可初步推断该撞击坑存在中央峰。

关键词：DEM；雨海；粗糙度；撞击坑

中图分类号：**TP**753；**P**184.8　　**文献标识码**：**A**　　**doi**：10.3969/j.issn.1004-5589.2018.01.030

Analysis of Mare lmbrium topography and crater based on roughness

TIAN Fen-fen, CHEN Sheng-bo, CAO Yi-jing, XIN Xin

College of Geo-exploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China

Abstract: Using the MATLAB programming language and DEM data with a resolution of 118 meters, the root mean square elevation and root mean square deviation distribution map of Mare lmbrium is obtained, and a variety of roughness parameters are calculated for the 18 profiles selected in the local study area. The results show that the areas with greater roughness in the Mare lmbrium are mainly distributed in craters and impact craters , while the areas filled with lava flows show smaller value of roughness. Therefore, it can be concluded that the craters and impact craters on the scale of 100 meters are important factors affecting the roughness of Mare lmbrium. For a single impact crater, the roughness of the wall is the highest, followed by the crater margin, and the flat bottom of crater is with the smallest roughness. For the large impact crater with roughness increasing at the base, there might be a central peak.

Key words: DEM; Mare lmbrium; roughness; impact crater

0 引言

地表粗糙度有两种解释划分：一种是从空气动力学的角度定义近地面风速廓线上风速值为零处的某一高度为地表粗糙度；另一种是从地形学理论出发，表明地形凹凸起伏的程度[1]。本文研究的是第二种，将地表粗糙度视为在一定尺度上对特定区域地表起伏状况的数学表达。不同尺度的行星表面粗糙度的定量测量是表达地表地形并推断其地质演化的关键所在，所以粗糙度一直是地质学家所感兴

收稿日期：2017-06-19；**改回日期**：2017-12-22

基金项目：国家自然科学基金项目（41372337、41373068）、863项目可见光谱段月球定标技术（2015AA123704）及高分辨率对地观测系统重大专项（04-Y20A35-9001-15/17）联合资助.

通讯作者：陈圣波（1967-），男，教授，博士生导师，主要从事地质遥感、月球探测等研究. E-mail：chensb0408@126.com

趣的尺度参数。前人对地球或类地行星粗糙度做了大量研究。以地表为参照比较了金星西部艾斯特拉区（Eistla Regio）和北部塞德娜平原（Sedna Planitia）的火山岩特征[2]。另有研究表明金星赤道平原的粗糙度特征与陆地熔岩流的特征相当[3]。Cord 通过研究火星亚米级尺度的不同岩石的粗糙度推断了火星地形的形成过程[4]。对于月球粗糙度的研究更是由来已久[5-7]。相对于地表，月表结构简单，主要由月海和月陆两部分构成。月海是月球上比较低洼的平原，地形起伏不大；月陆区多坑洞，表面凹凸不平，峰峦起伏，山脉纵横，是月球上最古老的地理单元。Rosenburg 使用月球轨道激光高度计（LOLA）数据绘制全月粗糙度图，并提出月表具有明显的“分形”特征，即月海粗糙度低，月陆粗糙度高的特点。Yokotay 和严艳梓等人的研究表明粗糙度对月球表面的物质组成成份以及不同地层单元的地质年龄诊断具有指导意义[8,9]。郭鼎基于粗糙度反演月海玄武岩的演化序列，验证了粗糙度与地层玄武岩相对地质年龄的关系[10]。本文在月表雨海地区进行粗糙度参数计算，进而解译该地区的地形特征和大型撞击坑的特征，为研究撞击坑提供一定的科学依据。

1　数据来源及研究区概况

选取月球雨海地区采用 LOLA 获取的高程数据制作的 DEM 模型，分辨率为 118 m。雨海（图 1）是 3.9 Ga 前由小天体冲击月表开凿而成，是典型的盆地构造。作为月球上最大的一个月海，雨海南北长约 1 200 km，东西长约 1 500 km，地理位置在 15°～50°N，10°E～40°W 之间，西邻风暴洋，东接澄海，北部与冷海相望，南部同以哥白尼环形山为中心的高地和伸向陆地的暑湾毗连。这种典型的环形结构就造就了雨海外围海拔高、地势高耸，内部被月海玄武岩填充，地形相对平缓的特征，包含勒韦里耶、赫利孔、德利尔及阿基米德等多个撞击坑。

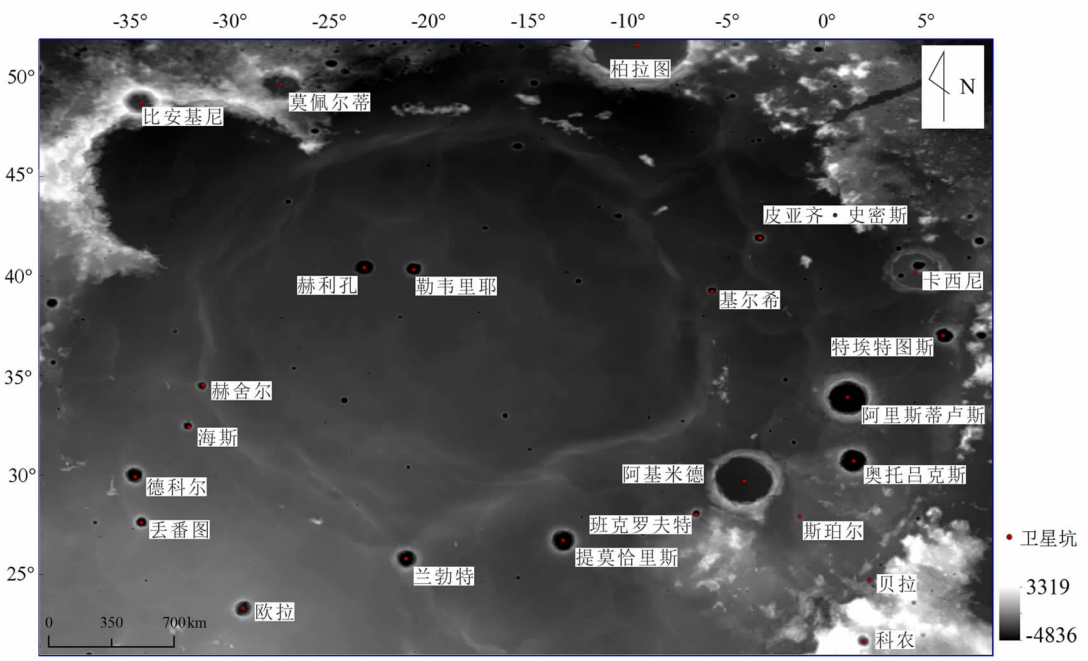


图 1　DEM 及撞击坑分布数据

Fig. 1　Data of DEM and craters

3　研究方法

地形学上的粗糙度是表征一定范围内地表高低起伏程度的指标，其分析原理与方法可以延伸到月表粗糙度中。月表地形没有地球表面复杂多样，但单一的指标参数仍然难以全面表征其形态特征。另

外，Hurst 指数通常是用于指示地形的粗糙度特征的分形测量[11,12]。然而，Hurst 指数的稳定性并不能得到很好的保证，RMS 斜率亦然[13]。为此，Shepard 等提出多种参数作为衡量月表粗糙度的指标[11]，最常见的表征表面粗糙度的参数有 4 种。

3.1 均方根高程（Root mean square elevation）

均方根高程（RMS）σ，亦称取均值的标准方差高程，该参数反映了月表高度偏离平均高度的程度，月表粗糙度越大，其值越高。另外，为消除传感器偏移误差对计算结果的影响，参与计算的剖面需进行“去趋势处理”，即剖面线减去一个最优拟合的线性函数，使得这条剖面上的高程平均值为零：

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

式中：n 是剖面中样本点的个数；h_i 是第 i 个点的高程值；$\bar{h}$是剖面高程的平均值。

3.2 均方根偏差（Root mean square deviation）

均方根偏差 v，亦称艾伦偏差，与变异函数、构结构函数及水平步长（Δx）有关，表征地表高度在水平方向的变化：

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

式中：Δx 是水平方向步长。

3.3 均方根坡度（Root mean square slop）

均方根坡度 S_{RMS}是在步长 Δx 范围内平分均方根偏差，通常以“度”表示：

$$S_{RMS} = \frac{v(\Delta x)}{\Delta x} \tag{3}$$

$$\theta_{RMS} = \arctan(S_{RMS}) \tag{4}$$

3.4 Hurst 指数

Hurst 指数亦称 hausdorff 维数，取值在 0～1 之间，是一个尺度参数。据前人的研究[14]，月表具有“分形特征”，Hurst 指数不仅可以刻画这种特征，也可以作为一种参数表征月表粗糙度。较小的 Hurst 指数值代表随尺度的增大地表趋于平缓，通常地质年龄较大的区域，地表因为长期的沉降侵蚀等作用，地质构造趋于简单，在大研究尺度下地形会相对平缓，Hurst 指数较小；研究尺度不断增大而地表粗糙度仍保持在一个稳定水平的地形则对应较大 Hurst 指数值，说明地表构造样式较为复杂。Hurst 指数为 1 的地形被称为“自相似地形”，随着水平尺度的变化，垂直尺度以与之相当的程度变化；Hurst 指数为 0.5 的地形被称为“布朗地形”，即一种“随机地形”；Hurst 指数较小时说明大尺度范围内地形属性消失或者被削弱，这种地形被称为“静态地形”。

均方根偏差与步长满足：

$$v(\Delta x) = v_0\left(\frac{\Delta x}{\Delta x_0}\right)^H \tag{5}$$

式中：H 是 Hurst 指数；v_0 是（单位尺度）内均方根偏差。步长的选择不能大于剖面线长度的 1/10[11]。

公式（5）可表达为：

$$\lg\frac{v(\Delta x)}{v_0} = H\lg\left(\frac{\Delta x}{\Delta x_0}\right) \tag{6}$$

令

$$p = \lg\frac{v(\Delta x)}{v_0} \tag{7}$$

$$q = \lg\left(\frac{\Delta x}{\Delta x_0}\right) \tag{8}$$

Hurst 指数可通过 p，q 双线性拟合得到。

4 结果分析

选取月球雨海地区（38°W～8°E，22°～52°N）为研究区，利用上述参数公式和该地区的 DEM 数据，计算该区域粗糙度参数。

利用 MATLAB 编程语言以 3×3 窗口滑动平均计算区域内均方根高程值（图 2），以 9 个水平栅格为采样点计算均方根偏差（图 3）。由公式（3）可知，均方根坡度和均方根偏差表现形式一致，故只从均方根高程及均方根偏差两个参数分析粗糙度对雨海地区地形的表现状况。均方根高程及均方根偏差值越大，代表该地区粗糙度越大。由图 2、图 3 可知，粗糙度较大的区域主要分布在环形山和撞击坑等区域，粗糙度较小值则主要分布在被火山熔岩流填充的平原等区域。图 2、图 3 对地形变化的

表征力度相近。对单个撞击坑而言，坑壁粗糙度最大，坑缘次之，坑底较为平坦，粗糙度最小。从成图效果来看，均方根高程比均方根偏差的地形表征更加明显直观。根据不同年代地质绘制雨海地区直径 >5 000 m 的撞击坑坑物质类型结构图（图 4）可知，研究区内比安基尼、赫舍尔、欧拉、勒韦里耶、兰勃特、提莫恰里斯以及阿里斯蒂卢斯撞击坑均存在中央峰。而图 2 显示除勒韦里耶撞击坑外上述撞击坑坑底均出现均方根高程增大的情况，由此可通过一定区域的均方根高程初步推断撞击坑坑底是否存在中央峰。

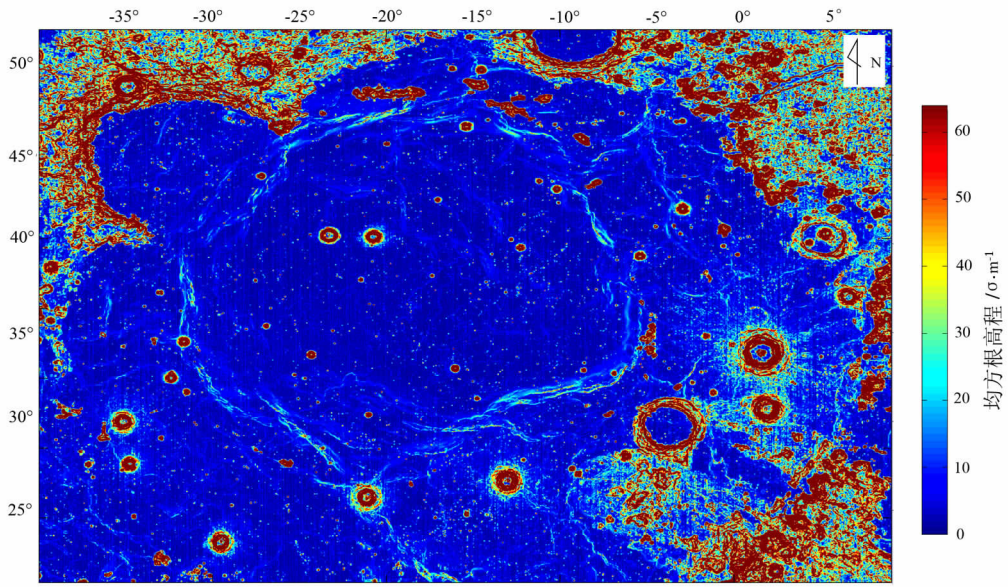


图 2　均方根高程值

Fig. 2　Root mean square elevation

在雨海地区选取嫦娥三号登陆点附近作为第二研究区，在该区域选取 18 条剖面线（从北向南依次为剖面线 1，剖面线 2，……，剖面线 18），从剖线角度再次分析粗糙度对地形的表征作用，剖面线长度均为 175.22 km（图 5）。

以剖面线 6 为例，其剖面模型如图 6 所示，选取 1 km、2 km、3 km、4 km、5 km、6 km、7 km 为步长分别计算剖面线的均方根高程、均方根坡度、均方根偏差以及 Hurst 指数。随着步长的增大，采样点越来越少，少量的采样点将不具有统计意义，故根据实际情况，最大步长设为 7 km。通过 p－q 拟合（图 7）得到 Hurst 指数值，拟合的幂函数为 $v = 0.06x^{0.7517}$，SRMS = 0.06 $(\triangle x)^{-0.248}$，拟合优度均 >0.094，$H = 0.7517$，精度符合 Sheppard 提出的 ±0.05 的允许误差[11]。

计算结果表明，剖面线 1、2、13、17、18 的均方根高程明显高于其他剖面线，对应的均方根偏差及均方根坡度值也相应较大。剖面线 3 至剖面线 16 之间整体地形起伏不大，均方根高程在 30～90 km 之间，Hurst 指数集中在 0.5～0.75 之间，也表明了内部地区地形平缓、地貌简单的地貌特征。数据表明均方根偏差与步长呈正相关关系，均方根坡度与之成负相关关系。剖面线 1 位于雷克蒂山脉边缘，剖面线 2、13 分别穿过皮科和勒韦里耶撞击坑，剖面线 17 和 18 同时穿过赫利孔和勒韦里耶两大撞击坑，剖面线的均方根高程较其他剖面线值大幅度增大。剖面线 1、2、17、18 的 Hurst 指数集中在 0.69～0.82 之间。由此可知，撞击坑是影响内部地形起伏状况的重要因素。

5　结论

（1）雨海地区粗糙度较大的区域主要分布在环形山和撞击坑等区域，粗糙度较小值则主要分布在被火山熔岩流填充的平原等区域。对单个撞击坑而言，坑壁粗糙度最大，坑缘次之，坑底较为平坦，粗糙度最小。根据撞击坑坑底粗糙度增大的情

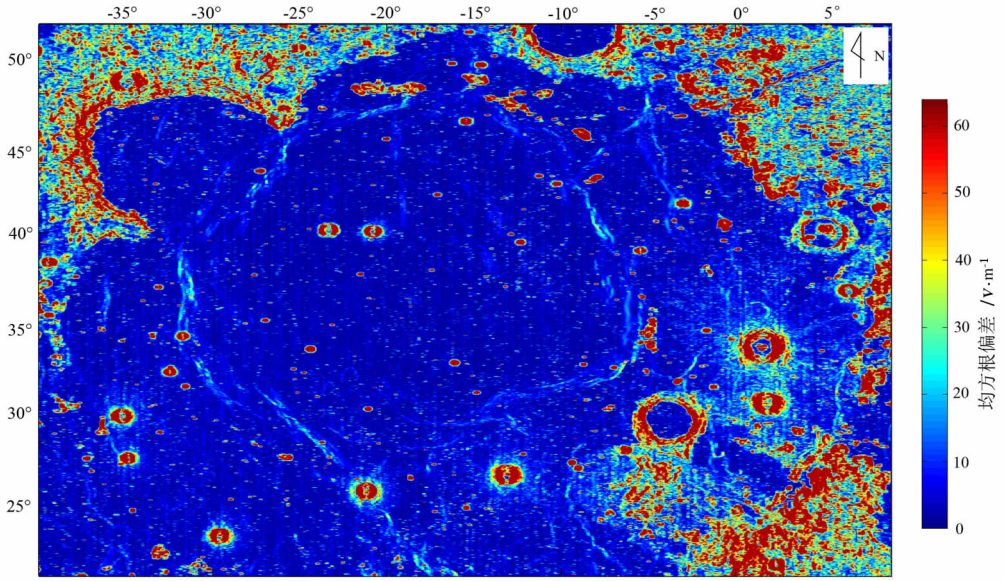


图 3 均方根偏差值

Fig. 3 Root mean square deviation

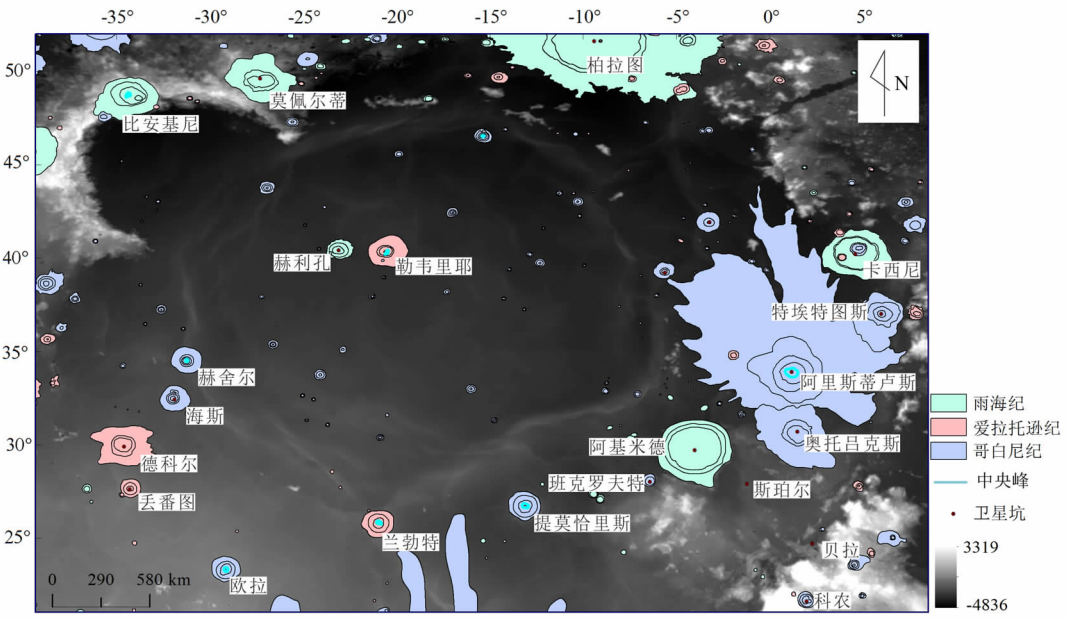


图 4 雨海撞击坑坑物质图

Fig. 4 Material map of impact crater

况可作为初步推断该撞击坑存在中央峰。

（2）相同的剖面线长度，不经过撞击坑的剖面线均方根高程在 30 ~ 90 km 之间，经过撞击坑的剖面线，均方根高程在 140 ~ 509 km 之间。结合雨海地区均方根高程图可以确定在百米尺度上环形山和撞击坑是影响雨海地形粗糙度的重要因素。

参考文献：

[1] 吕悦来，李广毅. 地表粗糙度与土壤风蚀［J］. 土壤学进展，1992，20（6）：38-42.

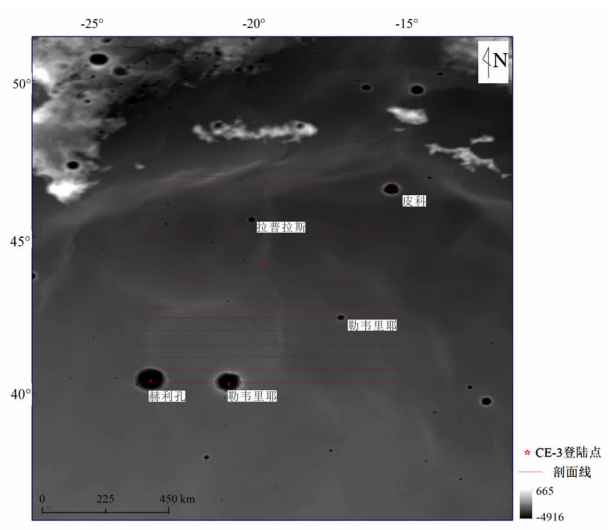


图 5　雨海内部地区剖面线图

Fig. 5　Contour map of Mare Imbrium

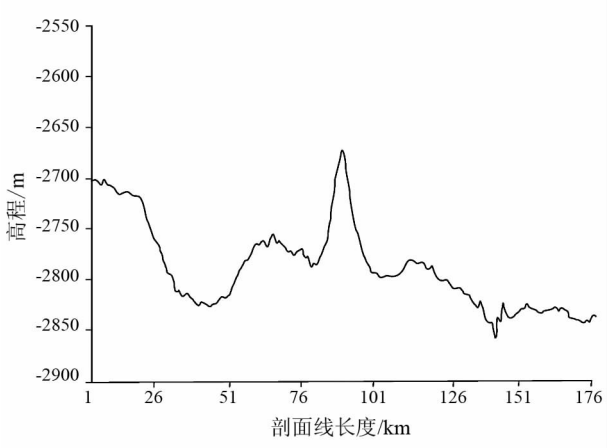


图 6　剖面线 6 的模型

Fig. 6　Model of line 6

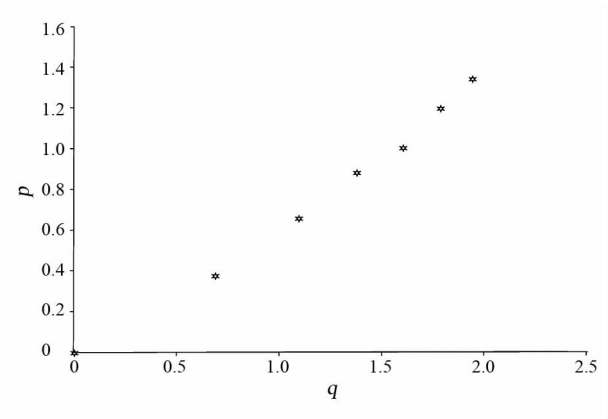


图 7　p－q 双对数图

Fig. 7　p－q double logarithmic plot

LYU Yue-lai, LI Guang-yi. Surface roughness and soil erosion [J]. Soil Science Progress, 1992, 20 (6): 38-42.

[2] Campbell B A , Campbell D B. Analysis of volcanic surface morpholopy on Venus from comparison of Arecibo, Magellan, and terrestrial airborne radar data [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 16293-16314.

[3] Plaut J J, Arvidson R E. Comparison of goldstone and Magellan radar data in the equatorial plains of Venus [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97: 16279-16292.

[4] 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 [J]. Icarus, 2007, 191 (1): 38-51.

[5] Daniels F B. Radar determination of the root mean square slope of the Lunar surface [J]. Journal of Geophysical Research, 1963, 68 (2): 449-453.

[6] Rosenburg M A, Aharonson O, Head J W, et al. Global surface slopes and roughness of the Moon from the Lunar Orbiter Laser Altimeter [J]. Journal of Geophysical Research, 2011, 116 (2): 2001.

[7] Hayne P O, Aharonson O, Bandfield J L, et al. The surface roughness of the Moon from diviner infrared observations [C] //Lunar and Planetary Institute Science Conference Abstracts, 2012, 43: 2829.

[8] Yokota Y, Haruyama J, Honda C, et al. Lunar topography: statistical analysis of roughness on a kilometer scale [J]. Advances in Space Research, 2008, 42 (2): 259-266.

[9] 严艳梓，汤国安，熊礼阳，等，基于 DEM 的月球雨海地区粗糙度研究 [J]. 地理研究，2014，33 (8)：1442-1456.
YAN Yan-zi, TANG Guo-an, XIONG Li-yang, et al. Lunar surface roughness of Mare imbrium based on DEMs [J]. Geographical Research, 2014, 33 (8): 1442-1456.

[10] 郭鼎. 粗糙度在月海玄武岩地层年龄研究中的作用探讨：硕士学位论文 [D]. 北京：中国地质大学，2015.
GUO Ding. The role of roughness in mare basalts dating research: master's degree thesis [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.

[11] Shepard M K, Campbell B A, Bulmer M H, et al. The roughness of natural terrain: a planetary and remote

sensing perspective [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (12): 32777-32795.

[12] Orosei R, Bianchi R, Coradini A, et al. Self-affine behavior of martian topography at kilometer scale from mars orbiter laser altimeter data [J]. Journal of Geophysical Research, Geophys. Res. 2003, 108 (4): 8023-8032. http://dx. doi. org/10. 1029/2002JE001883.

[13] 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 [J]. Icarus, 2013, 266 (1): 52-66.

[14] 程婧, 杨瑞琰, 黄定华, 等. 月球表面粗糙度的分形表征 [J]. 中国空间科学技术, 2010, 30 (2): 9-14.
CHENG Jing, YANG Rui-yan, HUANG Ding-hua, et al. Fractal characterization of Lunar surface roughness [J]. Chinese Space Science and Technology, 2010, 30 (2): 9-14.

(上接223页)

[8] Zhdanov M S, Liu X, Wilson G. Potential field migration for rapid imaging of gravity gradiometry data [J]. Geophysical Prospecting, 2011, 59 (6): 1052-1071.

[9] Zhdanov M S, Liu X, Wilson G. Rapid imaging of gravity gradiometry data using 2D potential field migration [C]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2010: 1132-1136.

[10] Zhdanov M S, Liu X, Wilson G. Potential field migration for rapid 3D imaging of entire gravity gradiometry surveys [J]. First Break, 2010, 28: 1052-1071.

[11] Zhdanov M S, Cai H, Wilson G A. Migration transformation of two-dimensional magnetic vector and tensor fields [J]. Geophysical Journal International, 2012, 189 (3): 1361-1368.

[12] 李红雨, 杨长保, 吴燕冈, 等. 小波变换在位场资料去噪和位场分离中的应用 [J]. 世界地质, 2014, 33 (1): 200-208.
LI Hong-yu, YANG Chang-bao, WU Yan-gang, et al. Application of wavelet transform for de-noising and potential field separation in gravity and magnetic data processing [J]. Global Geology, 2014, 33 (1): 200-208.