

基于CE-1数据的数字月海分形刻画及其动力学意义

吉 玮¹, 杨瑞霞¹, 李 超², 骆 磊¹, 王心源¹

(1. 中国科学院遥感与数字地球研究所数字地球重点实验室, 北京 100094;

2. 山东省建设发展研究院, 济南 250022)

摘要: 月海是月球表面的主要地理单元。对月海地貌特征的研究能够认识月表起伏及其动力学成因。依据CE-1影像图和全月球数字高程模型数据, 提取了南北半球不同纬度地区、不同填充岩性的典型月海范围, 运用盒维数法、立方体覆盖法和多重分形 q - D_q 语言对月海边界及其地形表面的地貌特征进行了线和面的描述和研究。结果表明: ① 分形方法可以有效地描述月球地貌的复杂程度。月海边界的分维值介于1.065~1.100之间, 平均值为1.086, 标准差为0.014, 在双对数坐标下5个月海区边界复杂度拟合的直线都近似平行。② 月海地形表面的分维值介于2.704~2.852之间, 5个月海地形表面的分维值标准差为0.051, $\ln \delta - \ln N(\delta)$ 图也近似平行, 但截距的离散程度相较于月海边界的高。③ 月海地貌多重分析的 q - D_q 曲线图总体呈现非递增趋势, D_q 值在 $q=-10$ 和 $q=0$ 时基本达到饱和, 但差异较小。④ 从线、面单分形以及多重分形可见, 5个月海均具有分形特征, 但彼此之间差异较小。其动力学意义在于它们在形成之后, 内动力作用基本停止或很小, 与分形特征基本一致; 而外力主要由陨石撞击作用少量地改变着月表的面貌, 导致在分形特征上表现出差异性。

关键词: 月海; 分形理论; 地貌特征; CE-1

DOI: 10.11821/dlyj201406004

1 引言

月球表面总体上可以分为月海和高地两大地理单元^[1]。月海是雨海事件后由月球内部玄武岩喷发并泛滥填充低洼月表而形成的宽广平原, 其总面积约占月表面积的17%, 且绝大多数都集中分布在近地一侧。分形理论作为处理地貌系统非线性和复杂性研究的有力工具, 能够对系统演变过程中的复杂性、不规则性及不均匀性进行度量, 并已经在地貌学中得到了广泛应用。艾南山等^[2,3]研究了分形地貌并提出了分形地貌学的概念, 还以分形理论为基础对地表现象进行了描述, 并以分维数为参数建立了地貌现象及其内部机制之间的联系。

基于特定地貌的单分形研究主要集中在海岸地貌、流水地貌和喀斯特地貌等方面^[4-7]。在地貌多重分形研究方面, 李锰等^[8]认为多重分形是地学研究的主体, 利用标准偏差法和固定质量法对新疆天山地区3种不同构造地貌单元地形剖面进行了分形与多重分形特征的研究, 认为地貌表面的分维值与地貌形成的内外力地质作用方式和强度密切相关。曹汉强等^[9]采用多重分形谱进行了地形特征的分析。结果表明多重分形的奇异谱函数

收稿日期: 2014-03-08; 修订日期: 2014-04-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271427); 中国科学院战略先导性科技专项资助项目(XDA04077200)

作者简介: 吉玮(1986-), 男, 江苏海安人, 研究实习员, 研究方向为地理信息系统与遥感应用。E-mail: jiwei@radi.ac.cn

通讯作者: 王心源(1964-), 男, 安徽六安人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为遥感考古。E-mail: xywang@ceode.ac.cn

比简单的分形维数能提供更多的信息，地形的结果更为符合实际情况。Bird等^[10]基于土壤剖面二维影像显示的孔隙度，计算了试验区土壤密度和孔隙度的分维数和多重分形谱，指出这是一种表征土壤孔隙结构和扩展复杂和多尺度多孔隙介质建模的替代方法。

目前，撞击坑是国内外学者研究月表形貌与构造特征的主要对象，包括撞击坑形貌演化、月表相对地质年龄估算、月球演化等^[11-14]，尚缺乏对月表基本地理单元的形貌学研究。本文结合CE-1探月卫星获取的月表地形数据，基于分形理论使用盒维数法、立方体覆盖法和多重分形经典Rényi定义法对部分月海边界和月海地形表面的地貌特征进行研究，定量刻画典型月海的分形地貌特征。月表形貌特征是内外营力长期综合作用的结果，对月海地貌特征的研究可以反映月球地表的高低起伏及其动力学成因，并有助于进一步解析月球的内部结构及其演化历史^[15]。

2 研究方法 with 数据来源

2.1 研究数据

利用CE-1探测器上的三线阵CCD立体相机获取的图像数据制作的全月球影像图是中国第一幅覆盖全月球的遥感影像图。数据获取于2007年11月20日~2008年7月1日，CCD立体相机采用线阵推扫方式获取图像，像元空间分辨率为120 m，幅宽60 km，相邻轨道影像数据的重叠率>40%。考虑到投影变形的影响，全月影像图的图幅以70°为界分为两部分，南北纬70°之间采用了正轴墨卡托割35°投影，极区采用了方位等角割70°投影^[16]。全月DEM模型制作使用的是CE-1上搭载的激光高度计于2007年11月28日~2008年12月4日获取的约912万个探测数据。数据处理中，单轨滤波采用地学统计法，区域滤波采用移动曲面滤波法，数据插值采用克里金算法。DEM模型的空间分辨率为500m，平面定位精度为445 m，高程测量精度为60 m^[17]。

由于当前对月球地貌的自动提取方法主要集中在撞击坑上^[18,19]，而月海和高地的自动提取方法无法扩展到整个月球^[15]，因此本研究结合全月影像图和全月DEM模型通过ArcGIS软件手工矢量化的方式在遥感影像上进行手动提取；考虑到澄海、静海、酒海等月海形成了狭长的月海带，会影响多重分形计算结果的有效性，所以分别提取了南北半球中低纬度地区、不同填充岩性的危海、洪保德海、云海、东海和汽海范围来进行研究（表1、图1）。

2.2 研究方法

2.2.1 单分形分析 Mandelbort在20世纪60年代建立的分形理论作为研究和探索自然界复杂的不规则形体的数学理论^[20]，已经在很多领域得到了广泛应用。在实际应用中通常通过分形维数来达到对分形定量分析、描述的目的。分形维数的定义有多种方式，目前

表 1 本文研究选取的月海详细信息^[1]
Tab. 1 The detailed information of the selected mares in this study

中文名	英文名	纬度	经度	最大直径/km
危海	Mare Crisium	17.0N	59.1E	418
洪保德海	Mare Humboldtianum	56.8N	81.5E	273
云海	Mare Nubium	21.3S	16.6W	715
东海	Mare Orientale	19.4S	92.8W	327
汽海	Mare Vaporum	13.3N	3.6E	245

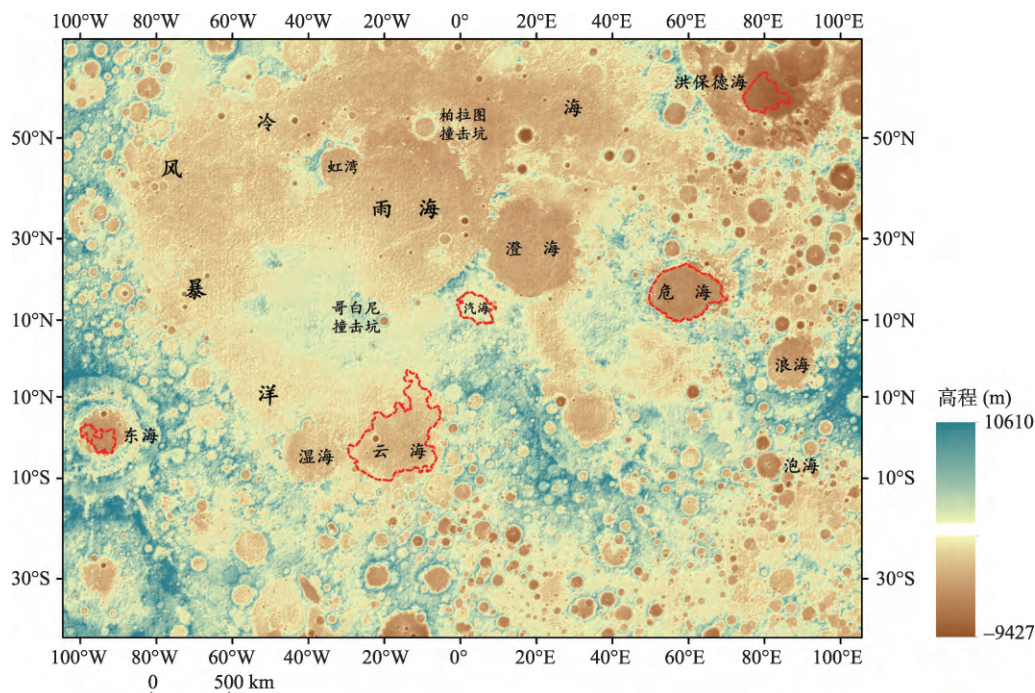


图1 月海分布示意图 (其中红色虚线为研究区)

Fig. 1 The distribution of mares (The red dashes are the study areas.)

表面轮廓分形维数计算的常用方法有尺度法、盒维数法、结构函数法和谱维数法等。而计算三维表面分形维数的方法主要有三角形棱柱表面积法、投影覆盖法、立方体覆盖法及分数布朗函数表面统计法^[21,22]。考虑到月球表面的实际情况及计算和程序实现等多方面的因素,本文采取盒维数法来进行月海边界的分形维数计算;而立方体覆盖法由于在计算过程中没有近似过程,也不存在随机性,对地形表面分形近似计算的偏差具有较好的抑制作用,因此采取此方法对月海地形表面进行计算。具体计算方法如下:

(1) 盒维数法

盒维数法也称覆盖法,可用于计算边界的形态维数。即用边长为 $\delta \times \delta$ 的正方形格子覆盖待求盒维数的边界,记录下完全覆盖边界所需的最少盒子数,利用不断变化边长的正方形重复上述操作,每个边长 δ 都有一个相对应的最少盒子数 $N(\delta)$,把覆盖过程中所得的 (δ, N) 数据画成双对数图做最小二乘法回归,得到直线的斜率 k ,则 $2-k$ 即为曲线的盒维数 $D^{[23]}$ 。

(2) 立方体覆盖法

将研究区的离散曲面 S 用间距为 r 的平行平面沿水平、垂直两方向切割 S , 得到包含 S 所需的最小盒子数 N , 则有:

$$N \propto \frac{1}{r^D} \quad (1)$$

式中: D 即为曲面的分维值。

为方便计算,将 (x, y) 坐标利用公式 $(x-x_{\min})/(x_{\max}-x_{\min})$ 进行归一化处理。设 x 方向序列为 $[0, \dots, i, i+1, \dots]$, y 方向序列为 $[0, \dots, j, j+1, \dots]$, 则对于 $\{[i, i+1], [j, j+1]\}$ 区间的立方体柱而言, 4 个角对应的高度分别为 $z(i, j)$ 、 $z(i+1, j)$ 、 $z(i, j+1)$ 、 $z(i+1, j+1)$, 覆盖地形表面的立方体个数为:

$$N_{ij}(r) = \frac{\max[z(i,j), z(i+1,j), z(i,j+1), z(i+1,j+1)] - \min[z(i,j), z(i+1,j), z(i,j+1), z(i+1,j+1)]}{r} + 1 \quad (2)$$

则覆盖整个研究区地表的立方体个数为:

$$N(r) = \sum_{i,j=1}^{n-1} N_{ij} \quad (3)$$

与求单一曲线的方法类似, 根据不同的尺度得到一系列 N 值, 分别求出 $\ln r$ 和 $\ln N$, 运用线性回归在双对数坐标下拟合直线, 斜率即为分维数 $D^{[24]}$ 。

2.2.2 多重分形分析 单分形对所研究的对象只能作整体性的、平均性的描述与表征, 无法反映不同区域、不同层次、不同局域条件形成的各种复杂的分形结构全面精细的信息, 不能完全的揭示出产生相应分形结构的动力学过程, 为此人们提出了多重分形 (Multi-fractal) 的概念, 用多个维数来描述非均匀的复杂几何体, 以此来全面刻画其特征。多重分形也称为多标度分形, 是定义在分形结构上的由多个不同标度指数的概率子集组成的非均匀分形测度的集合。它刻画了动力学系统的长期演化和自相似行为。目前有两种多重分形的描述语言: α - $f(\alpha)$ 语言和 q - D_q 语言。本文采用 q - D_q 语言对月海地貌的多重分形进行描述, 计算方法如下^[25]:

(1) 高程分布概率的计算。用尺度为 ε 的盒子覆盖单个月海 DEM, 统计每个盒子内所有像元高程值的总和 H_{ij} , 除以所有盒子内像元高程值的总和 $\sum H_{ij}$, 得到每一个盒子内的高程分布概率 $P_{ij}(\varepsilon)$, 新序列的归一化测度之和为 1。

(2) 配分函数 $\chi(q, \varepsilon)$ 的计算。配分函数 $\chi(q, \varepsilon)$ 是反映测度不均匀性的统计量, 可根据公式计算:

$$\chi(q, \varepsilon) = \sum_{i=1}^{n_\varepsilon} P_{ij}(\varepsilon)^q \quad (4)$$

式中: n_ε 是尺度为 ε 时盒子的个数。计算时 q 值依次从 ± 10 取到 10, 步长为 1, 它提供了对测度不同区域奇异性的微观探测。当 $q > 1$ 时, $\chi(q, \varepsilon)$ 放大测度的强奇异性区域; 当 $q = 1$ 时, $\chi(q, \varepsilon)$ 复制原来的测度; 当 $q < 1$ 时, $\chi(q, \varepsilon)$ 则强调测度的弱奇异性区域。若高程分布具有多重分形特征, 则配分函数 $\chi(q, \varepsilon)$ 在某无标度区间存在 $\chi(q, \varepsilon) \propto \varepsilon^{\tau(q)}$ 的幂律关系。式中 $\tau(q)$ 为质量指数, 根据 $\ln \varepsilon \sim \ln \chi(q, \varepsilon)$ 双对数曲线中的点采用最小二乘回归拟合来估算。

(3) q - D_q 曲线的计算。根据公式:

$$D_q = \begin{cases} \frac{\tau(q)}{q-1} & q \neq 1 \\ \tau'(1) & q = 1 \end{cases} \quad (5)$$

即可得出 q - D_q 曲线。当 $q \gg 1$ 时, D_q 描述分形体中测度最集中区域的标度行为; 当 $q \ll 1$ 时, D_q 描述分形体中测度最稀疏区域的标度行为。

3 结果分析

3.1 月海边界分形特征

盒维数法的实质是将扫描盒子的尺寸逐步趋近于 0 计算极限的过程, 然而在实际计

算过程中所选定的盒子数总是有限的, 因此一般选择DEM栅格数据图层像元尺度的整数倍。本文依次使用了 2×2 、 3×3 、 \cdots 、 22×22 (即1000 m、1500 m、 \cdots 、11000 m), 共21个盒子尺寸来进行扫描。图2为5个研究区边界 $\ln\delta$ - $\ln N(\delta)$ 关系图, 表2为月海边界的分维值计算结果。从图2和表2可以看出, 5个月海边界在1000~7000 m标度范围内的双对数图上均显示出很好的线性关系, 相关系数均在0.99以上, 因此可以认定月海边界具有统计分形特征。从表2比较得出, 5个研究区中危海的分维值最大为1.1, 其次是云海、洪保德海、东海, 汽海的分维值最小为1.065, 平均值为1.086, 标准差为0.014。分维值越大表明边界的复杂度越高。

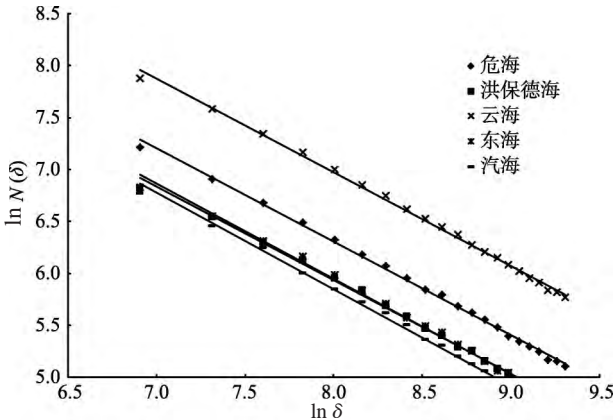


图2 月海边界 $\ln\delta$ - $\ln N(\delta)$ 图

Fig. 2 Relation of $\ln\delta$ with $\ln N(\delta)$ of boundary of mares

3.2 月海地形表面的分形特征

由于月海大多是负地形, 高程为负值且月表南北纬 70° 之间最低点高程为-9427 m, 为方便计算将5个研究区的月海高程都加上9427 m使之成为正地形。考虑到洪保德海的最大高程为5758 m, 本文依次使用 $2\times 2\times 2$ 、 $3\times 3\times 3$ 、 \cdots 、 $12\times 12\times 12$ (即1000 m、1500 m、 \cdots 、6000 m), 共11个小立方体尺寸来进行扫描。图3为5个研究区地形表面的 $\ln\delta$ - $\ln N(\delta)$ 关系图, 表4为月海表面的分维值计算结果。从图3和表3可以看出, 月海地形表面在1000~6000 m标度范围内的双对数图上显示出显著的线性关系, 相关系数均在0.99以上, 同样据此可以认定月海地形表面具有统计分形特征。

从表3可以看出, 5个研究区中地形表面的分维值依次为洪保德海>汽海>危海>云海>东海, 平均值为2.777, 标准差为0.051。分维值大小的不同即表明每个样区的实际地貌发育及复杂程度不同, 分维值越大说明地表越复杂, 反之亦然。分维值最小的东海是“类月海”, 其底部没有被玄武质熔岩填充可能是导致其复杂程度低于其他月海的原因。

3.3 月海地貌的多重分形特征

从前述3.1和3.2可见, 月海边界线和地形表面都具有分形特征。为了进一步刻画月海这一非均匀的复杂几何体, 引入多重分形来阐述其动力学特征。将5个研究区高程数据归一化之后, 依次使用 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ 、 $1/32$ 、 $1/64$ 和 $1/128$ 七个尺度分割覆盖单个研究区的尺度为 ε 的盒子, 得到每个盒子内的高程分布概率; 再通过配分函数 $\chi(q, \varepsilon)$

表2 月海边界的分维值计算结果 (标度范围1000~11000 m)

Tab. 2 The calculations of fractal dimension for mares boundary (Scale range is 1000~11000 m.)

研究区	参数				
	D	截距	R^2	分维值均值	分维值标准差
危海	1.100	13.507	0.998	1.086	0.014
洪保德海	1.094	13.178	0.997		
云海	1.097	14.197	0.998		
东海	1.076	13.329	0.995		
汽海	1.065	13.323	0.996		

的计算得到质量指数 $\tau(q)$; 最后根据 $\tau(q)$ 和 D_q 的关系式得出研究区的 Rényi 维数 q - D_q 曲线 (图 4 所示)。 R^2 在 $q=0$ 时取得最大值, 随着 q 值的变大或变小而减小。5 个月海的 Rényi 维数都显示很好的线性关系 ($q=0$ 时, $R^2 > 0.991$; $q=-10$ 时, $R^2 > 0.830$; $q=10$ 时, $R^2 > 0.930$)。

一般来说, 如果地貌具备多重分形的话, D_q 是一个非递增函数^[26,27]。如图 4 所示, 5 个研究区总体上都呈现非递增趋势, 其中汽海是严格意义上的非递增函数。其余 4 个月海在 $0 < q < 10$ 区间所出现的弱递增趋势可能是由于 DEM 的分辨率较低而导致的误差增大, 但仍可以表明月海高程是多重分形分布的。

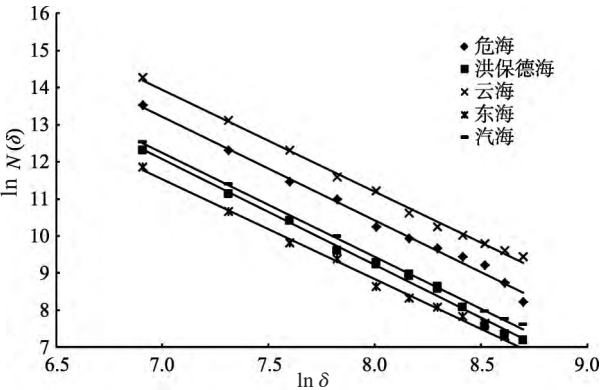


图 3 月海地形表面 $\ln \delta$ - $\ln N(\delta)$ 图
Fig. 3 Relation of $\ln \delta$ with $\ln N(\delta)$ of surfaces of mares

表 3 月海地形表面的分维值计算结果 (标度范围 1000~6000 m)
Tab. 3 The calculations of fractal dimension for mares surfaces (Scale range is 1000~6000 m.)

研究区	参数				
	D	截距	R^2	分维值均值	分维值标准差
危海	2.784	32.699	0.992	2.777	0.051
洪保德海	2.852	32.041	0.994		
云海	2.740	33.118	0.996		
东海	2.704	30.461	0.991		
汽海	2.804	31.873	0.997		

由多重分形谱的物理意义可以得知, D_q 值在 $q < 0$ 区与 $q > 0$ 区差值的大小, 标志着地形高程或高程差分布的相对不均匀程度。多重分形谱曲线变陡, D_q 值的变化增大, 表明了空间点集或物理量分布不均匀性的增加, 这种复杂性的增加成为我们定量描述复杂地貌形态的一个重要指标。从图 4 可以看出, 对于 5 个月海而言, D_q 值在 $q=-10$ 和 $q=0$ 时已基本达到饱和且相同地貌类型的不同研究区分形谱形态差异主要体现在 $q < 0$ 区 (概率密集区), 但差异较小, 具体为云海>危海>汽海>东海>洪保德海。

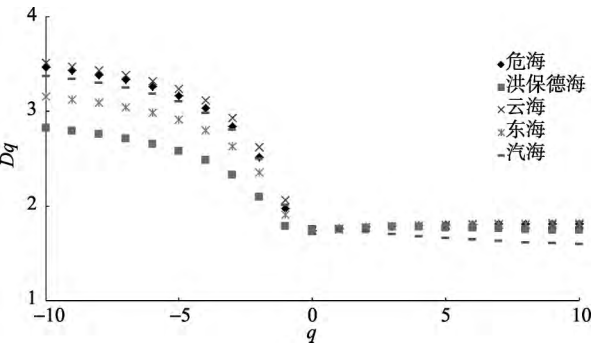


图 4 不同研究区的 q - D_q 曲线
Fig. 4 The q - D_q curves of different study areas

3.4 动力学意义

从 5 个月海边界在 $\ln \delta$ - $\ln N(\delta)$ 图上拟合的直线近似平行可知其动力学意义是由于月球在大约 30 亿年前就停止了一切活动, 开始冷却和固化, 现在的月球基本保持了凝结时的状态, 月海的边界后来一直没有受到大的改变, 各自处于共同的演化方式之中。而 5 个月海地形表面在双对数图上拟

合的直线同样近似平行, 可知月海在形成之后没有受到更多的动力作用来改变月表的高程变化。

此外, 由于地貌表面多重分形谱在地貌学中的意义表明了外营力地貌作用类型和强度在空间上分布的不均匀程度, 由此可以推断月面的形成动力学演化比月海边界线的更为复杂, 这更可以用月面遭受陨石的撞击致使月面分形复杂度更高来解释, 而不同月海之间的微小差异则可能是月球停止活动之前内部的地质活动等内营力造成的。

4 结论与讨论

本文从单分形和多重分形两个角度出发, 运用盒维数法、立方体覆盖法和多重分形 $q-D_q$ 语言对月海边界及其地形表面的地貌特征进行了分析研究。表明月海边界及地形表面具有统计分形特征, 月海高程分布具有多重分形特征, 且分形方法可以有效地描述月球地貌的复杂程度。从月海边界分形特征可见, 5个月海边界曲折程度相近似, 表明月海形成之后受到了相似的外力作用。但从月海地形表面分形特征可见月海边界与月面复杂程度的分形刻画并非一致, 月面的复杂程度更高, 因为分异更明显。这表现在月海地形表面分维值的标准差0.051比边界分维值的标准差0.014大将近4倍, 且月海地形表面 $\ln\delta-\ln N(\delta)$ 图截距的离散程度相较于月海边界的高。不同地区月海的三种计算结果都很接近, 共同佐证了现在的月球基本上保留了停止一切活动之后冷却、凝结时的状态, 而月海地貌表面的起伏则主要是由陨石的外力撞击造成的, 不同月海之间的微小差异可能是由发生在停止活动之前月球内部的地质活动等内营力所造成的。

参考文献(References)

- [1] 欧阳自远. 月球科学概论. 北京: 中国宇航出版社, 2005. [Ouyang Ziyuan. Introduction to Lunar Science. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2005.]
- [2] 艾南山, 李后强. 从曼德尔布罗特景观到分形地貌学. 地理学与国土研究, 1993, 9(1): 13-17. [Ai Nanshan, Li Houqiang. From Madelbrott landscapes to fractal geomorphology. Geography and Territorial Research, 1993, 9(1): 13-17.]
- [3] 艾南山, 陈嵘, 李后强. 走向分形地貌学. 地理学与国土研究, 1999, 15(1): 92-96. [Ai Nanshan, Chen Rong, Li Houqiang. Fractal physiognomy. Geography and Territorial Research, 1999, 15(1): 92-96.]
- [4] 张捷, 包浩生. 分形理论及其在地貌学中的应用: 分形地貌学研究综述及展望. 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.]
- [5] 高义, 苏奋振, 周成虎, 等. 基于分形的中国大陆海岸线尺度效应研究. 地理学报, 2011, 66(3): 331-339. [Gao Yi, Su Fenzheng, Zhou Chenghu, et al. Scale effects of China mainland coastline based on fractal theory. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 331-339.]
- [6] 金德生, 陈浩, 郭庆伍. 河道纵剖面分形—分线性形态特征. 地理学报, 1997, 52(2): 154-162. [Jin Desheng, Chen Hao, Guo Qingwu. A pereliminary study on non-linear properties of channel longitudinal profiles. Acta Geographica Sinica, 1997, 52(2): 154-162.]
- [7] 熊波, 王健力, 张天文. 渝东南岩溶山区耕地利用变化下土壤颗粒体积分形特征研究. 中国岩溶, 2011, 30(3): 295-301. [Xiong Bo, Wang Jianli, Zhang Tianwen, et al. Study on volume fractal features of soil particle under different land use types in southeast karst mountain of Chongqing. Carsologica Sinica, 2011, 30(3): 295-301.]
- [8] 李猛, 朱令人, 龙海英. 不同类型地貌的各向异性分形与多重分形特征研究. 地球学报, 2003, 24(3): 237-242. [Li Meng, Zhu Lingren, Long Haiying. On fractal and multifractal properties for different types of landforms. Acta Geoscientia Sinica, 2003, 24(3): 237-242.]
- [9] 曹汉强, 朱光喜, 李旭涛, 等. 多重分形及其在地形特征分析中的应用. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(12): 1182-1185. [Cao Hanqiang, Zhu Guangxi, Li Xutao. Multi-fractal and its application in terrain character analysis. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(12): 1182-1185.]

- [10] Bird N, Díaz M C, Saa A, et al. Fractal and multifractal analysis of pore-scale images of soil. *Journal of Hydrology*, 2006, 322: 211-219.
- [11] Neukum G, König B, Arkani-Hamed J. A study of lunar impact crater size-distributions. *The Moon*, 1975, 12(2): 201-229.
- [12] 岳宗玉, 吴淦国, 刘建忠, 等. 地月系统不同成因环形构造及其影像特征. *矿物学报*, 2007, 26(4): 441-447. [Yue Zongyu, Wu Ganguo, Liu Jianzhong, et al. Circular structures of different formation mechanisms and their image features in the earth-moon system. *Acta Mineralogica Sinica*, 2006, 26(4): 441-447.]
- [13] 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. *地学前缘*, 2012, 19(6): 47-59. [Li Ke, Chen Jianping, Xi Xiaoxu, et al. Research on dating of the mare basalts based on the automatic identification of impact craters in the northern region of Mare Imbrium on the Moon(LQ-4). *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 47-59.]
- [14] 何妹珺, 陈建平, 李珂, 等. 月表典型区撞击坑形态分类及分布特征. *地学前缘*, 2012, 19(6): 83-89. [He Shujun, Chen Jianping, Li Ke, et al. The morphological classification and distribution characteristics of the craters in the LQ-4 Area. *Earth Science Frontiers*, 2012, 19(6): 83-89.]
- [15] 周增坡, 程维明, 周成虎, 等. 基于“嫦娥一号”的月表形貌特征分析与自动提取. *科学通报*, 2011, 56(1): 18-26. [Zhou Zengpo, Cheng Weiming, Zhou Chenghu, et al. Characteristic analysis of the lunar surface and automatically extracting of the lunar morphology based on CE-1. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(1): 18-26.]
- [16] 李春来, 刘建军, 任鑫, 等. 嫦娥一号图像数据处理与全月球影像制图. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3): 294-306. [Li Chunlai, Liu Jianjun, Ren Xin, et al. The global image of the moon by the Chang'E-1: Data processing and lunar cartography. *Science China Earth Science*, 2010, 53(8): 1091-1102.]
- [17] 李春来, 任鑫, 刘建军, 等. 嫦娥一号激光测距数据及全月球DEM模型. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(3): 281-293. [Li Chunlai, Ren Xin, Liu Jianjun, et al. Laser altimetry data of Chang'E-1 and the global lunar DEM model. *Science China Earth Science*, 2010, 53(11): 1582-1593.]
- [18] Sawabe Y, Matsunaga T, Rokugawa S. Automated detection and classification of lunar craters using multiple approaches. *Advanced in Space Research*, 2006, (37): 21-27.
- [19] Luo L, Wang X Y, Ji W, et al. Automated detection of lunar craters based on Chang'E-1 CCD data. *The 4th International Congress on Image and Signal Processing and The 4th International Conference on BioMedical Engineering and Informatics*, Shanghai, 2011.
- [20] Mandelbrot B B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension. *Science*, 1967, 156 (3775): 636-638.
- [21] Klinkenberg B. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features. *Mathematical Geology*, 1994, 26(1): 23-46.
- [22] Zhou H W, Xie H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock. *Surface Review and Letters*, 2003, 10(5): 751-762.
- [23] 潘威. 基于分形理论的1915-2000年渭河泾河口-潼关段河道演变研究. *沉积学报*, 2011, 29(5): 946-952. [Pan Wei. Study on the morphology of Wei River (Jing River Estuary-Tongguan) based on the fractal geometry, 1915-2000A.D. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 946-952.]
- [24] 周宏伟, 谢和平, Kwasniewski M A. 粗糙表面分维计算的立方体覆盖法. *摩擦学报*, 2000, 20(6): 456-459. [Zhou Hongwei, Xie Heping, Kwasniewski M A. Fractal dimension of rough surface estimated by the cubic covering method. *Tribology*, 2000, 20(6): 456-459.]
- [25] Anh V V, Lam K C, Leung Y, et al. Multifractal analysis of Hong Kong air quality data. *Environmetrics*, 2000, 11(2): 139-149.
- [26] Scheuring I, Riedi R H. Application of multifractals to the analysis of vegetation pattern. *Journal of Vegetation Science*, 1994, (5): 489-496.
- [27] Wang D, Fu B J, Lu K S, et al. Multifractal analysis of landuse pattern in space and time: A case study in the Loess Plateau of China. *Ecological Complexity*, 2010, (7): 487-493.

The fractal and dynamic characterizations on digital mares based on CE-1 data

JI Wei¹, YANG Ruixia¹, LI Chao², LUO Lei¹, WANG Xinyuan¹

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS, Beijing 100094, China; 2. Shandong Construction Development Research Institute, Jinan 250022, China)

Abstract: Since mare is one of the major geographic units of lunar surface, the landscape features of mares can provide a direct reflection of the ups and downs of lunar surface and its geodynamic mechanisms. This paper extracts the scopes of the typical mares with different fill lithology at different latitudes by manual vectorization based on the image of moon and the global lunar DEM model by Chang'E-1. The geomorphological features of mare borders and their terrain surfaces are estimated by using box-counting dimension method, cubic-covering method and q - D_q language of multi-fractal method. The results demonstrate that: (1) The complexity of lunar landscape can be described effectively by fractal methods. The values of fractal dimension of five mares' borders range from 1.065 to 1.100 while the average is 1.086, and the standard deviation is 0.014. The border lines fitted in the double logarithmic coordinates are approximately parallel. (2) The values of fractal dimension of mares' terrain surfaces range from 2.704 to 2.852, and the standard deviation is 0.051. The graph of $\ln\delta$ - $\ln N(\delta)$ also shows an approximately parallel pattern, but the dispersion degree is higher than that of the mare borders. (3) The q - D_q graph of multi-fractal analysis of mare landscape indicates an overall trend of non-increase. Although the D_q values reach saturation when $q=-10$ and $q=0$, the differences are small. (4) Analysis of the results of line and surface single fractal and multi-fractal dimensions shows that the five mares have their fractal features, while the differences among each other are little. In the view of dynamics, after the formation, the internal forces stopped or become feeble, which can be concluded that their fractal characteristics are almost the same. In addition, external impact of meteorites changed the lunar surface slightly, resulting in the differences on the fractal characteristics.

Key words: lunar mare; fractal theory; geomorphological features; Chang'E-1