

面向月面原位资源利用的嫦娥五号月壤样品颗粒形态特征研究

李 佳^{1,2}, 王 超^{1,2}, 李志远^{1,2}, 谢 欢^{1,2},
蒋明镜^{1,3}, 晏雄锋^{1,2}, 许 雄^{1,2}, 冯永玖^{1,2}, 童小华^{1,2}

(1. 同济大学上海市航天测绘遥感与空间探测重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 测绘与地理信息学院, 上海 200092;
3. 苏州科技大学 土木工程学院, 江苏 苏州 215001)

摘要: 月壤颗粒形态特征对月面原位挖掘、运输、3D 打印等具有重要影响,我国自主获取的嫦娥五号样品可为月球科研站建设等提供月壤关键参数信息。以月面原位资源利用过程关注的月壤颗粒形态特征为目标,利用体视光学显微镜获取了同济大学获批的嫦娥五号月壤颗粒样品图像,构建了一套图像处理和颗粒识别方法,并提出方向差异指数表征颗粒表面粗糙程度,实现了自动提取颗粒边缘并计算其粒度和形态指标。结果表明,所研究嫦娥五号样品颗粒粒径范围为 4.36~792.30 μm ,均值纵横比为 0.66,均值圆形度为 0.806,均值方向差异指数为 0.111。小粒径颗粒占比大,10 μm 以下颗粒占 44.19%。颗粒方向差异指数呈近似正态分布,表明大量颗粒表面粗糙程度近似,并存在少量表面较为光滑和粗糙的颗粒。小粒径颗粒大小与纵横比、圆形度均呈负相关,与表面粗糙程度相关性低,大粒径颗粒大小与形态没有相关性。研究还发现嫦娥五号样品比 Apollo 11 和 Apollo 15 样品的颗粒的圆形度更小,形态更不规则。

关键词: 嫦娥五号样品;月壤颗粒;粒度分析;形态特征

中图分类号: P691;O341

文献标志码: A

Morphological Characteristics Study of Chang'e-5 Lunar Regolith Particles for In-situ Resource Utilization on Moon

LI Jia^{1,2}, WANG Chao^{1,2}, LI Zhiyuan^{1,2}, XIE Huan^{1,2},
JIANG Mingjing^{1,3}, YAN Xiongfeng^{1,2}, XU Xiong^{1,2},
FENG Yongjiu^{1,2}, TONG Xiaohua^{1,2}

(1. Shanghai Key Laboratory for Planetary Mapping and Remote Sensing for Deep Space Exploration, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China; 3. School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology,

Suzhou 215011, China)

Abstract: The morphological characteristics of lunar regolith particles have a significant impact on in-situ excavation, transportation, 3D printing, and other processes on the Moon. The samples obtained independently by China's Chang'e-5 mission can provide key parameter information for the construction of the lunar research station. This paper focuses on the morphological characteristics of lunar regolith particles that are of concern in the process of in-situ resource utilization on the Moon. Optical microscopy was used to obtain images of the Chang'e-5 lunar regolith particle samples approved by Tongji University, a set of image processing and particle recognition methods were constructed, and a directional difference index was proposed to characterize the roughness of the particle surface. The automatic extraction of particle edges and the calculation of their size and morphological indicators were achieved. The results show that the particle size range of the studied Chang'e-5 samples is 4.36~792.30 μm , with an average aspect ratio of 0.66, an average circularity of 0.806, and an average directional difference index of 0.111. Small particles make up a large proportion, with particles below 10 μm accounting for 44.19%. The directional difference index of the particles is approximately normally distributed, indicating that a large number of particles have similar surface roughness, with a small number of particles having smoother or rougher surfaces. There is a negative correlation between the size and aspect ratio, circularity of small particles, and little correlation with surface roughness. There is no

收稿日期: 2024-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(42221002,42171363)

第一作者: 李佳, 博士生, 主要研究方向为月壤特性及其应用。E-mail: lijia_lw@tongji.edu.cn

通信作者: 王超, 副教授, 博士生导师, 理学博士, 主要研究方向为月球与行星遥感与数值模拟。

E-mail: wangchao2019@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

correlation between the size and morphology of large particles. The study also found that the circularity of the particles in the Chang'e-5 samples is smaller and the morphology is more irregular in comparison with the Apollo 11 and Apollo 15 samples.

Keywords: Chang'e-5 samples; lunar regolith particles; particle sizing analysis; morphological characteristics

月球表面覆盖着一层由微小颗粒组成的月壤,这些颗粒不仅记录了月球表面环境的演化历史,也是未来月球探测和资源利用的关键材料^[1-2]。自20世纪60年代以来,人类对月壤样品的研究已经取得了大量进展^[3-5]。中国嫦娥五号探月任务首次带回了月球上未被人类探索过的较高纬度和更年轻的地质单元的月壤样品^[6],为深化月表风化层月壤特性认识和未来建设国际月球科研站提供新的知识储备和研究视角。

月壤颗粒粒度和形态决定了月壤的密度、孔隙率和力学行为,这些物理性质对月球探测任务中的着陆、挖掘和建筑建造具有直接影响^[7],尤其是颗粒形态直接决定了月壤的可流动性,对月面建筑材料运输和3D打印输送粉影响重大。因此,有必要开展真实月壤颗粒形态学研究,其中月壤颗粒的粒径大小、圆形度、粗糙度等是月面原位3D打印较为关注的颗粒形态特征。月壤样品颗粒粒度研究主要通过直接筛分^[4]和图像观测^[8-10]两种方式,得到颗粒尺寸的统计分布和级配。月壤样品颗粒形态研究可以通过不同设备进行成像观测。颗粒形态特征的描述指标较为多样,计算方法也有所差别^[4,8,11],常用指标包括拟合椭圆的长短轴、纵横比、圆形度等,这些指标能够较好地反映颗粒整体形状与规则圆形的相似程度^[9,12-13],但对颗粒表面粗糙程度反映不足。颗粒的粗糙表面是阻碍颗粒之间发生相互转动的一个重要影响因素,进而影响月壤的物理和力学性质^[14-15]。在统计常用形态特征指标之外,本文提出一种能够表征颗粒表面粗糙程度的形态特征指标,为月壤模拟物制备和月壤数值模拟等工程应用提供更丰富的粒形信息。

本文以月面原位3D打印需关注的月壤颗粒形态为目标,利用同济大学获批的嫦娥五号月壤样品CE5C0300YJFM002GP,以体视光学显微镜和数字成像系统作为观测设备并获取样品图像,建立了一套自动化图像处理和颗粒识别流程和方法,获得了样品所有颗粒的边缘,在此基础上提取每个颗粒的

粒度与形态特征描述指标,包括颗粒的等效粒径、级配、拟合椭圆的长短轴、纵横比和新提出的方向差异指数,并与已有嫦娥五号样品和Apollo样品颗粒特征进行对比研究,分析了月壤颗粒大小和形态特征分布及其之间相关性,为进一步认识月表风化层颗粒特性和未来工程应用提供新参考。

1 样品与方法

1.1 月壤样品与观测仪器

嫦娥五号月壤样品采集区域位于月球风暴洋东北部(经度51.9°W和纬度43.1°N)^[16]。本文使用的月壤样品是嫦娥五号探测任务以铲取方式采集的月表风化层粉末状的样品,编号为CE5C0300YJFM002GP,如图1所示,该样品由国家航天局提供。粉末状的月壤样品被封存在直径约25mm,厚度约7.5mm的圆柱形环氧树脂材料中,经打磨和抛光制成了可重复使用的光片样品^[17]。该类型的粉末状月壤光片样品存在大量粒度较小的颗粒,没有颗粒较大的岩屑。光片样品中的颗粒呈分散状固化分布在圆柱形材料内部,为观察单颗粒形态提供条件。

体式光学显微镜被用于观测嫦娥五号月壤光片样品,并利用系统配套的图像采集软件获取样品颗粒二维图像,最小成像分辨率为 $2\mu\text{m}\cdot\text{pixel}^{-1}$,用于颗粒形态研究。由于粉末状光片样品包含的颗粒数量非常大,手工提取和分析颗粒形态耗时巨大,因此有必要建立基于图像的月壤颗粒自动识别和分析方法,实现月壤颗粒的粒径分布、级配、形态特征及其分布的统计和分析。

1.2 图像处理与颗粒提取

调节显微镜的光照条件、放大倍率和焦点,达到清晰的月壤样品成像状态,利用图像采集系统获取彩色图像,月壤样品颗粒为分散分布的大小不一的深色颗粒,背景为透明或半透明浅色,如图2a所示。首先,图像中颗粒和背景有较明显的颜色深浅差异且无其他异物,将彩色图像转换为灰度图像,为图像二值化做准备,结果如图2b所示。其次,对图像进行二值化处理,将背景与月壤颗粒分开,结果如图2c所示。然后,由于光片表面本身不平整产生的少量噪点,以及样品本身存在面积非常小、成像模糊的粉末状小颗粒无法被识别,所以对图像进行噪点去除,结果如图2d所示。这一步会造成一定程度的过小粉末颗粒被忽略不计,对颗粒数量和级配统计可能产生一定影响,颗粒过小无法形成清晰准确的边缘,

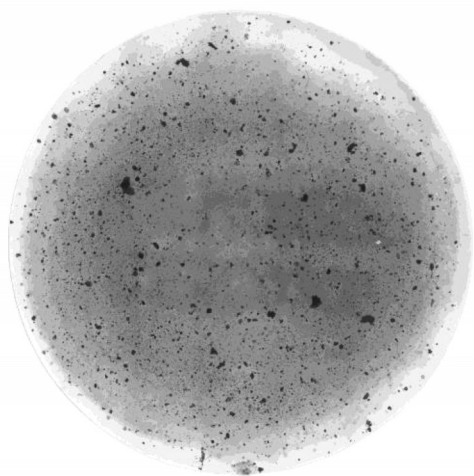


图1 本文所用嫦娥五号月壤样品(CE5C0300YJFM002GP)

Fig.1 Chang'e-5 lunar soil sample used in this paper (CE5C0300YJFM002GP)

为后续颗粒形态的统计分析排除了小颗粒干扰。再次,一些胶结物颗粒内部存在孔洞,为避免将孔洞误识别为颗粒,进行颗粒内部孔洞填充,结果如图2e所示,其中红框中为被填充的颗粒示例。最后,用修正摩尔邻点跟踪算法自动提取颗粒边缘,获得每个颗粒边缘像素点位置坐标,为颗粒粒度和形态特征分析做准备。

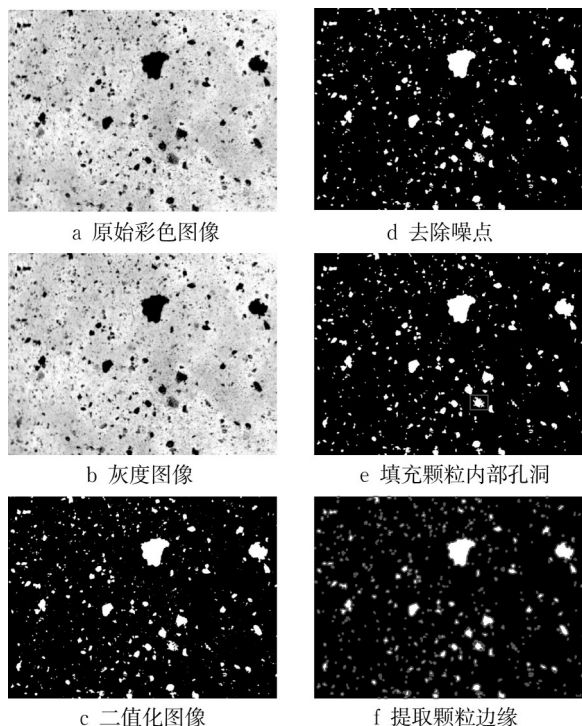


图2 图像处理与颗粒边缘提取流程

Fig.2 Flow of image processing and particle edge extraction

1.3 月壤颗粒粒度与形态特征

颗粒粒度指颗粒的大小,对于不规则的月壤颗粒,用其边缘的最小外接圆直径作为等效粒径来反映颗粒大小。在测量得到样品中所有的颗粒大小后,进一步统计月壤样品级配,分析月壤的粒径分布情况。颗粒形态特征描述参数包括拟合椭圆的长轴、短轴、纵横比、圆形度、形状指数、方向差异指数。其中,本研究提出的方向差异指数,能够从不同方向更准确地描述颗粒不规则性。

1.3.1 粒度分析

由于光片样品存在一定厚度,较浅厚度的颗粒边缘清晰、易于提取,较深厚度的颗粒边缘模糊。为了尽可能准确地得到月壤样品级配,采用分层提取方法识别出多个厚度层面上的颗粒。本文对样品分三层进行提取,提取部分结果如图3所示。不同层提取到的颗粒存在重复,需要把不同层提取到的相同颗粒去除。具体判断方法为,利用颗粒边缘的最大内接圆的中心作为颗粒中心位置,当分别处于两层的颗粒中心位置之间的距离小于该颗粒的最大内接圆的直径,则被判别为重复的颗粒,从其中一层中去除。去除重复颗粒后,再进行后续颗粒粒度分析。

根据不规则颗粒边缘的最小外接圆,测量和记录每个颗粒的等效粒径。其次,统计颗粒的总数量和所有颗粒的等效粒径,绘制形成该月壤样品的级配曲线。月壤级配曲线是由月壤中不同粒径的颗粒所占的比例绘制形成的曲线,反映了各级别颗粒组的组合和颗粒数量分布情况,是判断月壤均匀性和配制模拟月壤的重要参考指标。级配曲线较陡,表示粒径大小相对集中,土壤颗粒较均匀;级配曲线较缓,表示粒径大小相差悬殊,土壤颗粒不均匀。

1.3.2 颗粒形态特征描述

颗粒的不规则性主要反映在两方面,一方面是颗粒整体形状特征与圆形的差异;另一方面是颗粒表面的凹凸特征。一个整体非常接近圆形的颗粒,表面也可能非常粗糙,在之前研究中颗粒的这方面特征通常被描述的不够充分。综合以往对月壤颗粒特征描述的研究^[8-9,11,13],本文采用以下5种参数作为月壤颗粒形态描述指标:长轴、短轴、纵横比、圆形度和方向差异指数。为了能够更加准确地描述月壤颗粒形态特征,对光片样品进行分区观测,提取每个颗粒边缘,计算形态特征描述指标。

(1)长轴、短轴、纵横比

利用提取的颗粒边缘坐标数据进行椭圆拟合,进一步得到拟合椭圆的长轴 a 、短轴 b 、纵横比 b/a ,

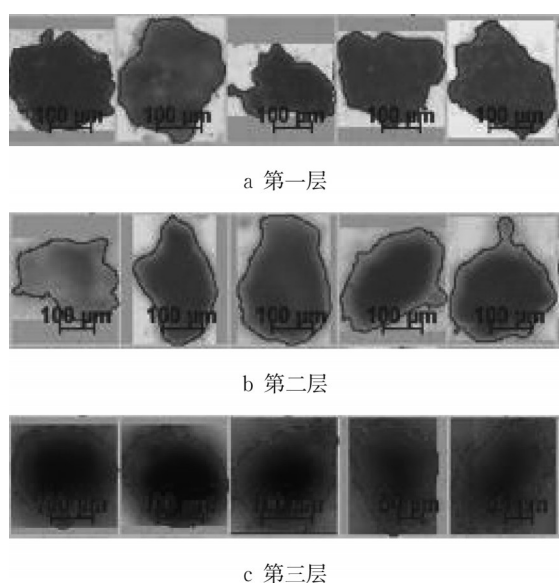


图3 分层提取颗粒边缘

Fig.3 Hierarchically extracted grain edges

如图4a所示。颗粒纵横比的取值范围为(0,1)。纵横比越大,表明颗粒形状越接近圆形;纵横比越小,表明颗粒形状越细长。纵横比在一定程度上有效地反映了颗粒整体形状与圆形的差异程度。

(2)圆形度

圆形度是描述不规则颗粒与圆形差异性的最常用的指标之一,被众多学者用来描述月壤颗粒的不规则程度^[8,13-14,21]。颗粒圆形度的取值范围为(0,1)。圆形度越大,颗粒形状越接近圆形。本文对该样品的圆形度进行计算和统计,以便于对比分析。圆形度表示为 ϕ ,定义如下:

$$\phi = \sqrt{\frac{a \times b}{a^2}} \quad (1)$$

其中, a 、 b 分别为拟合椭圆的长轴和短轴。

(3)方向差异指数

当一个颗粒的整体形状(即拟合椭圆)接近或为圆形时,颗粒的形状也可能是非常不规则的。如图4d所示,颗粒表面与相应的拟合虚线圆相比,在两个45°倾斜方向上呈现明显凹陷状,在水平和竖直两个方向上呈现相对凸出状。对于这样的颗粒,拟合椭圆为圆形,其纵横比和圆形度均为1,与图4c的圆形颗粒形状是完全一样的,所以这两个形状描述指标不能反映颗粒不规则形状的特征。因此,需要一种颗粒形状描述指标,能够在颗粒整体形状接近圆形时仍能评价颗粒表面凹凸带来的不规则性。针对这一问题,本文提出了一种从多方向角度反映颗粒表面凹凸差异性的形状描述指标,称为方向差异指数。

方向差异指数是指颗粒内部在多个方向上边缘两端之间距离的方差,如图4b所示。方向差异指数越小,颗粒形状越规则,表面越光滑。圆形的方向差异指数为0。方向线间隔角度 α 的取值可根据颗粒表面粗糙程度的实际情况而确定。方向线间隔角度越小,方向差异指数对颗粒表面粗糙情况反映的越精细,但计算更复杂。方向差异指数表示为 S_d ,计算公式如下:

$$S_d = \frac{(d_1 - d)^2 + \dots + (d_n - d)^2}{n} \quad (2)$$

式中: $d_1 \dots d_n$ 为每个方向上方向线与颗粒边缘两个交点之间的距离, d 为 $d_1 \dots d_n$ 的均值; n 为方向线的数量。

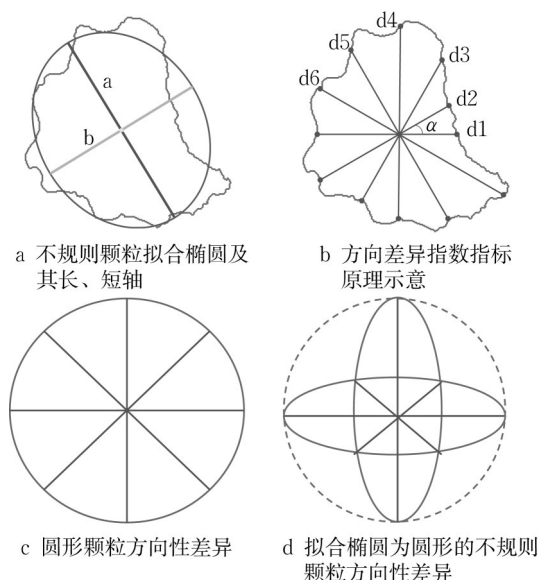


图4 颗粒形状特征指标原理示意图

Fig.4 Schematic diagram of the principle of particle morphological characteristic indexes

2 结果与讨论

2.1 月壤样品颗粒数量与粒径分布

针对月壤样品 CE5C0300YJFM002GP, 去除不同观测层重复颗粒后, 颗粒总数量为 30 533 个, 最小粒径为 4.36 μm , 最大粒径 792.30 μm , 均值粒径 19.19 μm , 中值粒径 11.36 μm 。在统计的所有颗粒中, 小粒径的颗粒数量最多, 有 13 493 个颗粒的粒径小于 10 μm , 占颗粒总数的 44.19%, 粒径大于 100 μm 的颗粒数量为 565, 仅占颗粒总数的 1.85%。表 1 是多个粒径范围的颗粒数量统计结果, 表明本研究的嫦娥五号月壤光片样品主要由细小粉末状颗粒组成, 存在少量粒径较大的颗粒。

图 5 是由级配曲线反映月壤粒径分布情况,以及 Apollo 系列探月任务采样返回样品的级配上下限。嫦娥五号样品的级配曲线,粒径较小时颗粒的累计百分比增长比较缓慢,表明存在大量粉末状细小颗粒,粒径较大时颗粒的累计百分比增长较快,说明粒径差异较大。图中级配上下限是根据 Apollo 11-17 六次月壤采集任务返回的月壤样品制作的多条级配曲线的分布范围界限^[15,19]。嫦娥五号样品的级配曲线位于上下限范围之间,表明嫦娥五号样品和 Apollo 样品的月壤粒径具有相似的分布范围。与以往研究得到的 Apollo 样品级配曲线相比^[19],嫦娥五号光片样品小粒径范围的曲线更缓,说明存在更多的细粉末颗粒。

表 1 嫦娥五号月壤样品 CE5C0300YJFM002GP 的粒径范围分段分布情况

Tab.1 Sectional distribution of grain size range of Chang'e-5 lunar soil sample CE5C0300YJFM002GP

粒径范围/ μm	颗粒数量
0~10	13 493
10~30	12 530
30~60	2 945
60~100	1 000
100~200	480
>200	85

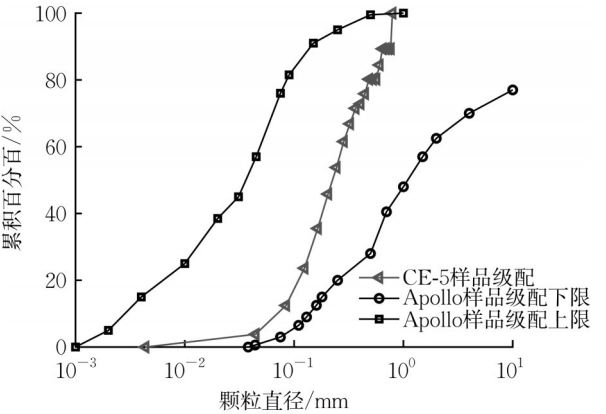


图 5 嫦娥五号月壤样品颗粒级配曲线和 Apollo 月壤样品级配曲线范围

Fig.5 Chang'e-5 lunar soil sample particle grading curve and Apollo lunar soil sample grading curve range

表 2 是本研究和已有研究的其他嫦娥五号月壤样品的粒径统计结果对比。由表 2 可见,嫦娥五号不同月壤样品粒径分布范围基本一致。其中,有些样品的月壤粒径的最小值更小,可到约 $1\mu\text{m}$,相应的

均值和中值粒径也更小,这可能由以下条件造成:

(1)其他三份月壤样品为非光片样片,在测量时可以直接观测,没有光片材料的干扰,能够更清晰的观测到细小颗粒;

(2)观测设备的影响,本研究采用的光学显微镜最小分辨率为 $2\mu\text{m}$,因此无法获得小于分辨率的月壤颗粒;

(3)与观测样品颗粒总数量有关,例如 CE5C0800YJFM001 样品颗粒总数量为 299 869 867 个^[9],其中存在更多的细小粉末状颗粒,所以具有更小的均值和中值粒径。多份样品研究相互验证可知,嫦娥五号月壤样品存在大量粒径小于 $10\mu\text{m}$ 的细粉末颗粒。

表 2 嫦娥五号不同月壤样品粒径统计分布情况
Tab.2 Statistical distribution of particle size in different lunar soil samples of Chang'e-5

月壤样品	粒径范围/ μm	粒径均值/ μm	粒径中值/ μm
CE5C0300YJFM002GP	4.36~792.30	19.19	11.36
CE5C0800YJFM001 ^[9]	1.11~499.8	3.96	2.9
CE5C0400 ^[13]	15~438.2	—	55.24
CE5C0400YJM00403 ^[18]	1~80.7	26.2	30.1

2.2 月壤样品形态特征统计与分析

根据颗粒的边缘以及拟合椭圆,按照上述方法计算每个颗粒的纵横比、圆形度和方向差异指数。在计算颗粒的方向差异指数时,方向线数量是一个待定参数。如图 6 所示,方向线过于稀疏,则方向差异指数变化较大,不能稳定地反映颗粒表面凹凸程度,方向线过于密集,则容易产生冗余计算。所以,以随机挑选颗粒为例,确定方向差异指数与方向线数量的关系。由图 6b 可见,方向差异指数和方向线数量的关系呈现先波动后趋于稳定状态,这表明当方向线数量增加到一定程度后,不会对计算方向差异指数产生明显影响。因此,本文采用的方向线数量为 12 条,此时计算方向差异指数较为稳定,且计算量较小。

图 7 是月壤样品颗粒三种形态特征的分布情况以及其与颗粒大小的关系。统计的所有样品颗粒的纵横比最大值为 0.99,最小值为 0.09,均值为 0.66,中值为 0.67。由图 7a 可知,大多数颗粒的纵横比处于 0.5~1 范围内,表明颗粒呈现更为圆润的椭圆状,而非细长的椭圆状。样品颗粒的圆形度最大值为 0.997,最小值为 0.299,均值为 0.806,中值为 0.818。由图 7c 可知,颗粒的圆形度大多集中在

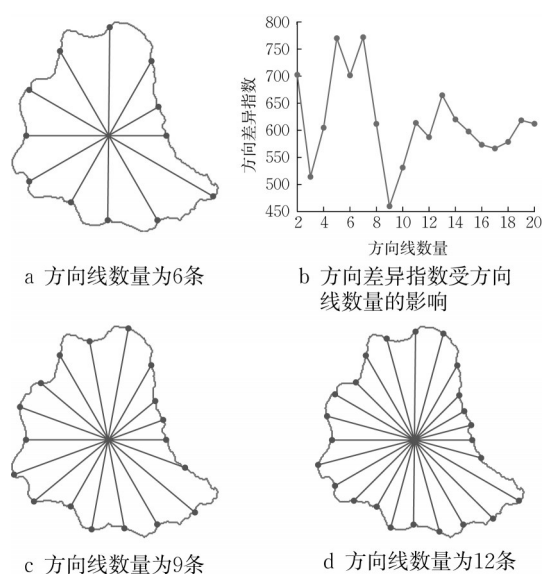


图6 方向线数量选择

Fig.6 Selection of the number of directional lines

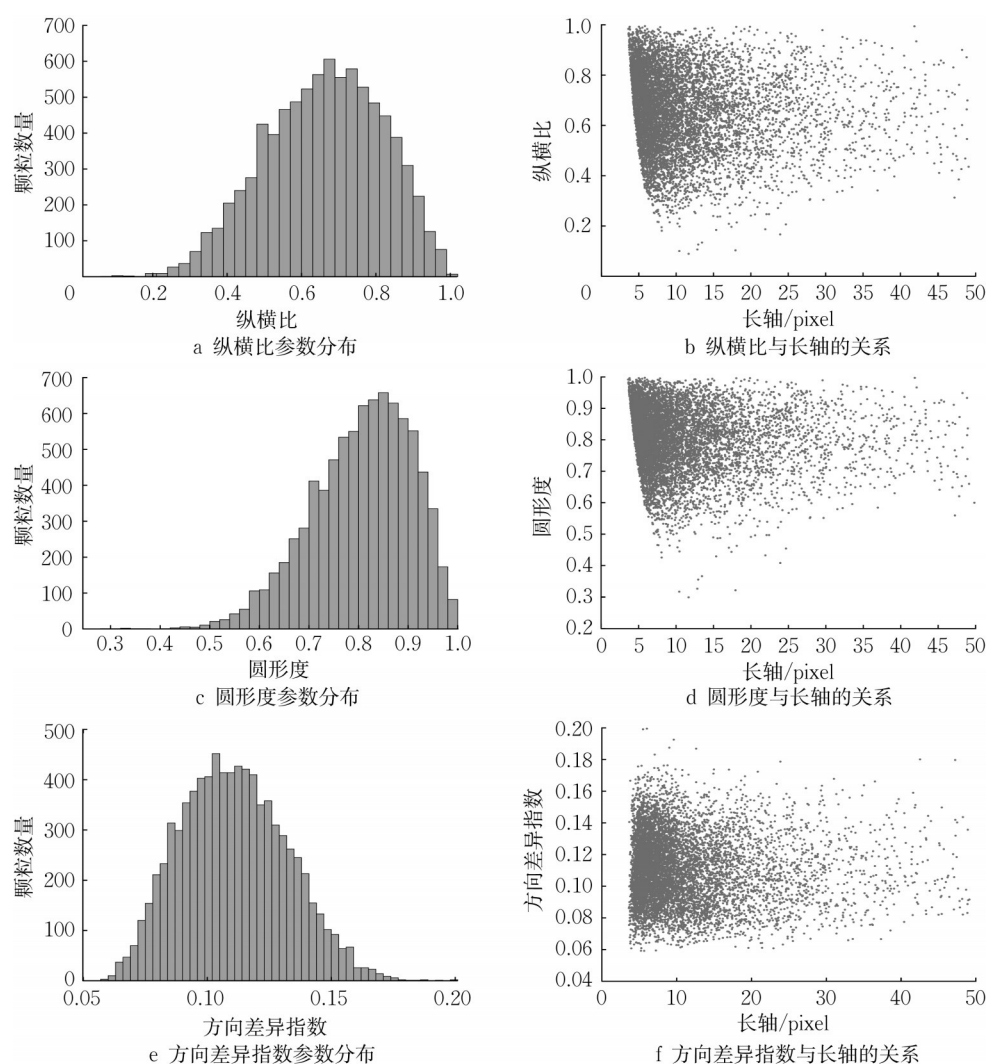


图7 月壤样品颗粒形态特征

Fig.7 Particle morphology characteristics of lunar soil samples

0.6~1范围内,表明大量颗粒接近于圆形,呈现出较为规则的形状。样品颗粒的方向差异指数最大值为0.200,最小值为0.059,均值为0.111,中值为0.110。由图7e可知,颗粒的方向差异指数呈现近似正态分布,大多数颗粒的方向差异指数集中在0.111附近,存在少量颗粒的表面呈现更为光滑或更为粗糙的状态。此外,本文还进一步探究了颗粒形态特征与颗粒大小是否相关。图7b所示的嫦娥五号样品颗粒纵横比与长轴关系分布形式,与Rickman利用Apollo样品的相应参数关系分布非常相似^[20]。由图7b和7d可知,当颗粒拟合椭圆的长轴小于5个像素(即约10 μm)时,颗粒的纵横比、圆形度与长轴均呈现负相关,即颗粒的大小越小,颗粒的形状越接近规则的圆形。由图7f可知,颗粒表面的粗糙程度与颗粒大小没有明显的相关性。

表3对比了嫦娥五号任务和Apollo任务不同月壤样品颗粒的纵横比和圆形成度。总体而言,嫦娥五号不同月壤样品(如表3前三行所示样品)的纵横比和圆形成度基本一致,并且参数数值处于在Apollo样品相应的形态参数范围内。本研究的月壤样品与其他月壤样品的纵横比和圆形成度相近,表明不同着陆区的月壤样品颗粒形态相似。当不计参数计算方法差异影响,本研究月壤样品与其他嫦娥五号月壤样品相比的纵横比和圆形成度略小,说明同一着陆区附近的月壤颗粒形态存在一定波动,Apollo 16的样品颗粒形态也验证了这一点。嫦娥五号样品颗粒的圆形成度比Apollo 11和Apollo 15月壤样品颗粒的更小,说明颗粒形态更不规则。这可能与嫦娥五号样品地质年龄比Apollo 11和Apollo 15样品更年轻,经历的太空风化时间更短有关。

表3 不同月壤样品颗粒形态特征比较

Tab.3 Comparison of particle morphology characteristics of different lunar soil samples

月壤样品	纵横比	圆形成度
CE5C0300YJFM002GP	0.67	0.818
CE5C0800YJFM001 ^[9]	0.74	—
CE5C0400 ^[13]	—	0.875
Apollo 11,10084 ^[21]	0.76	0.96
Apollo 15,15601 ^[21]	0.8	0.95
Apollo 16,64501 ^[21]	0.7	0.96
Apollo 16,60501 ^[8]	0.585	0.771

3 结论

观测和分析月壤样品的颗粒大小和形态特征,对理解月壤历史演化和利用原位月壤资源至关重要。本文利用体视光学显微镜观测嫦娥五号月壤光片样品CE5C0300YJFM002GP,并获取样品的二维彩色图像,根据构建的自动化图像处理和颗粒自动提取方法获得所有颗粒的边缘信息。根据提取到的颗粒边缘计算每个颗粒大小和形状特征描述指标,包括拟合椭圆的长短轴、纵横比、圆形成度,并提出一种叫做方向差异指数的颗粒形态特征描述指标,用于反映颗粒表面粗糙程度。分析了特征指标的统计参数和分布情况,并与其他嫦娥五号样品和Apollo样品的相应特征指标做比较,研究结果可为未来月面原位资源利用提供参考。本文的主要结论如下:

(1)所研究嫦娥五号月壤光片样品的粒径分布范围为4.36~792.30 μm ,均值粒径19.19 μm ,中值粒径11.36 μm 。月壤样品级配曲线处于Apollo样品的分布范围内,粒径分布范围相似。月壤样品中

存在大量小粒径的颗粒,其中粒径在10 μm 以下的颗粒占44.19%。

(2)嫦娥五号月壤光片样品,中值纵横比为0.67,颗粒呈现更为圆润的椭圆状;中值圆形成度为0.818,大多数颗粒是偏规则的圆形;方向差异指数的均值为0.111,所有颗粒整体指标参数呈现近似正态分布,存在少量颗粒的表面呈现更为光滑或更为粗糙的状态。

(3)本文月壤样品与其他嫦娥五号月壤样品和Apollo月壤样品颗粒的纵横比和圆形成度总体来看相近。其中,同一着陆点附近月壤颗粒形态可能存在一定范围内的波动,如Apollo 16和嫦娥五号;嫦娥五号样品比Apollo 11和Apollo 15样品的颗粒的圆形成度更小,形态更不规则。

(4)对于较小的颗粒,颗粒越小,其形状越接近规则的圆形;颗粒表面的粗糙程度与颗粒大小没有明显的相关性。对于较大的颗粒,颗粒大小与颗粒形状和表面粗糙程度均没有相关性。

作者贡献声明:

李佳:研究构思,参与实验,数据处理,撰写论文;
王超:研究构思,学术指导,论文修改,项目支持;
李志远:参与实验;
谢欢:研究构思,学术指导,论文修改;
蒋明镜:学术指导,数据分析;
晏雄锋:参与实验,数据分析;
许雄:学术指导,数据分析;
冯永玖:学术指导,数据分析;
童小华:学术指导,项目支持。

参考文献:

- [1] 裴照宇,王琼. 国际月球科研站资源利用发展路线战略构想[J]. 宇航学报, 2024, 45(4):625.
PEI Zhaoyu, WANG Qiong. Strategic concept of resource utilization development route of the international lunar research station[J]. Journal of Astronautics, 2024, 45(4):625.
- [2] CHEN Yi, HU Sen, LI Jinhua, *et al.* Chang'e-5 lunar samples shed new light on the Moon [J]. The Innovation Geoscience, 2023,1(1): 100014.
- [3] CARRIER W D III, OLHOEFT G R, MENDELL W. Lunar sourcebook [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1991.
- [4] GRAF J C. Lunar soils grain size catalog [M]. Houston: Johnson Space Center, 1993.
- [5] 郑永春,欧阳自远,王世杰,等. 月壤的物理和机械性质[J]. 矿物岩石, 2004, 24(4): 14.
ZHENG Yongchun, OUYANG Ziyuan, WANG Shijie, *et al.*

- physical and mechanical properties of lunar regolith [J]. *Mineralogy and Petrology*, 2004, 24(4): 14.
- [6] LI Qiuli, ZHOU Qin, LIU Yu, *et al.* Two-billion-year-old volcanism on the Moon from Chang'e-5 basalts [J]. *Nature*, 2021, 600: 54.
- [7] 黄雨,蒋馥鸿.月壤工程地质特性综述[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2013, 41(9): 1281.
- HUANG Yu, JIANG Fuhong. Review of engineering geological characteristics of lunar regolith [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2013, 41(9): 1281.
- [8] KATAGIRI J, MATSUSHIMA T, YAMADA Y, *et al.* Investigation of 3D grain shape characteristics of lunar soil retrieved in Apollo 16 using image-based discrete-element modeling [J]. *Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 28(4): 04014092.
- [9] LI Chunlai, HU Hao, YANG Mengfei, *et al.* Characteristics of the lunar samples returned by the Chang'e-5 mission [J]. *National Science Review*, 2022(9): 188.
- [10] 曹克楠,董明潭,余振兵,等.一种以极低的样品消耗同时测定嫦娥五号月壤粒度和矿物组成的新方法[J]. *中国科学:地球科学*, 2022, 52(9):1726.
- CAO Kenan, DONG Mingtan, SHE Zhenbin, *et al.* A novel method for simultaneous analysis of particle size and mineralogy for Chang'e-5 lunar soil with minimum sample consumption[J]. *Science China: Earth Sciences*, 65(9): 1704.
- [11] WILKERSON R P, RICKMAN D L, MCELDERRY J R, *et al.* On the measurement of shape: with applications to lunar regolith [J]. *ICARUS*, 2024, 412: 115963.
- [12] 余松征,任鑫,刘建军,等.嫦娥五号月壤样品光片中颗粒分类方法研究[EB/OL]. [2023-4-10]. <http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220163>
- YU Songzheng, REN Xin, LIU Jianjun, *et al.* Study on classification of particles in polished sections of Chang'e-5 lunar soil samples [EB/OL]. [2023-4-10]. <http://ch.whu.edu.cn/cn/article/doi/10.13203/j.whugis20220163>
- [13] ZHANG Hui, ZHANG Xian, ZHANG Guang, *et al.* Size, morphology, and composition of lunar samples returned by Chang'e-5 mission [J]. *Science China Physics, Mechanics & Astronomy*, 2022, 65: 229511.
- [14] 王思远,蒋明镜.基于嫦娥五号月壤粒形特征的离散元模拟方法[J]. *岩土工程学报*, 2024, 46(4):833.
- WANG Siyuan, JIANG Mingjing. Lunar regolith simulations with discrete element method based on Chang'e-5 mission's lunar soil particle morphology [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2024, 46(4): 833.
- [15] JIANG M J, SHEN Z F, THORNTON C. Microscopic contact model of lunar regolith for high efficiency discrete element analyses [J]. *Computers and Geotechnics*, 2013, 54: 104.
- [16] QIAN Yuqi, XIAO Long, HEAD J W, *et al.* Young lunar mare basalts in the Chang'e-5 sample return region, northern Oceanus Procellarum [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2021, 555: 116702.
- [17] 张广良,张洪波,李春来,等.嫦娥五号任务月球样品存储处理制备方法研究[J]. *中国科学:物理学 力学 天文学*, 2023, 53: 239606.
- ZHANG Guangliang, ZHANG Hongbo, LI Chunlai, *et al.* Study on the storage, processing and preparation of lunar samples returned by the Chang'e-5 mission [J]. *Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica*, 2023, 53: 239606.
- [18] ZHAO Siyuan, XIAO Long, QIAN Yuqi, *et al.* Variations in lunar regolith properties with depth as revealed by Chang'e-5 samples [J]. *ICARUS*, 2023, 406: 115766.
- [19] CARRIER W D III. Particle size distribution of lunar soil [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129(10): 956.
- [20] RICKMAN D. Preliminary measurement of lunar particle shapes [C]//44th Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: NASA Lunar Science Institute, 2013: 20130013044.
- [21] DEITRICK S R, CANNON K M. Characterizing detailed grain shape and size distribution properties of lunar regolith [C]//53rd Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands: Lunar and Planetary Institute, 2022: 20210026714.