

近地小行星太空风化光谱效应的模拟实验研究

张鹏飞^{1,4}, 张江², 李世杰^{1,5}, 刘长卿², 文愿运¹
孙浩^{1,6}, 李阳^{1,3,5*}

1. 中国科学院地球化学研究所 月球与行星科学研究中心, 贵阳 550081; 2. 山东大学空间科学研究院, 山东省光学天文与日地空间环境重点实验室, 山东 威海 264209; 3. 澳门科技大学月球与行星科学国家重点实验室, 澳门 519020; 4. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049; 5. 中国科学院地质与地球物理研究所, 地球与行星物理重点实验室, 北京 100029; 6. 西北大学地质学系, 西安 710069

摘要: 本文选取 3 种类型的陨石分别进行脉冲激光辐照实验, 模拟距离太阳 1 个天文单位(1 AU)处, 10 亿年(1 Ga)期间微陨石轰击的太空风化作用对 E 型、S 型、C 群等近地小行星光谱特征的改造。结果显示, 激光辐照后, 顽辉石无球粒陨石光谱的可见光波段反射率降低且近红外斜率增加, 与 E 型小行星光谱改造特征一致; 普通球粒陨石的可见光-近红外波段反射率均降低、吸收深度变浅且近红外斜率增加, 与 S 型小行星光谱改造特征一致; CV3 型碳质球粒陨石和 CO3 型碳质球粒陨石在激光辐照后可见光波段反射率降低, 但近红外波段反射率升高, 吸收深度变浅且近红外斜率增加, 与贫挥发分的 C 群小行星光谱改造特征一致; CM2 碳质陨石在激光辐照后, 可见光波段反射率增加, 但近红外波段反射率及近红外斜率降低, 与富挥发分的 C 群小行星光谱改造特征一致。研究结果可为近地小行星探测任务备选目标的确定、光谱遥感数据以及表面物质演化过程的反演提供一定的参考。

关键词: 小行星; 太空风化; 反射光谱; 陨石; 纳米铁; 挥发分

中图分类号: P691 文章编号: 1007-2802(2020)04-0853-10 doi: 10.19658/j.issn.1007-2802.2020.39.061

Laboratory Simulation of the Space Weathering Effects on Reflectance Spectra of Near-Earth Asteroids

ZHANG Peng-fei^{1,4}, ZHANG Jiang², LI Shi-jie^{1,5}, LIU Chang-qing², WEN Yuan-yun¹,
SUN Hao^{1,6}, LI Yang^{1,3,5*}

1. Center for Lunar and Planetary Sciences, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Optical Astronomy and Solar-Terrestrial Environment, Institute of Space Science, Shandong University, Weihai Shandong 264209, China; 3. State Key Laboratory of Lunar and Planetary Sciences, Macau University of Science and Technology, Macau 519020, China; 4. College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. Key Laboratory of Earth and Planetary Physics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China; 6. Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069, China

Abstract: In this paper, three types of meteorites were selected to have been undertaken pulse laser irradiation experiments for simulating the alteration effects on spectra of E-, M-, and C-group Near-Earth Asteroids by the space weathering resulted from the micrometeorite impact on their surfaces at an assumed place of 1 astronomical unit (1 AU) away from the Sun for 1 billion years (1 Ga). The results show that the laser irradiated aubrite has relatively low reflectivity of visible band but relatively high slope of near-infrared band in its spectrum, which is consistent with that of the weathered

收稿编号: 2019-227 2019-12-23 收到 2020-03-22 改回

基金项目: 澳门科技大学开放基金资助项目(039/2013/A2); 中国科学院地球与行星物理重点实验室开放课题; 国家自然科学基金资助项目(41673071, 41931077)

第一作者简介: 张鹏飞(1993-), 男, 硕士生, 研究方向: 陨石与小行星反射光谱及太空风化作用. E-mail: zhangpengfei161@mails.ucas.ac.cn.

* 通信作者简介: 李阳(1984-), 男, 博士, 副研究员. 研究方向: 比较行星学. E-mail: liyang@mail.gyig.ac.cn.

E-type asteroid. The ordinary chondrite has relatively low reflectivity of visible and near-infrared bands, relatively shallow adsorption but relatively high slope of near-infrared band in its spectrum, which is consistent with that of the weathered S-type asteroid. The laser irradiated CV3 and CO3 carbonaceous chondrites have relatively low reflectivity of visible band but high reflectivity of near-infrared band, relatively shallow adsorption but high slope of near-infrared band in their spectra, which are consistent with that of the weathered volatile-poor C-group asteroid. The laser irradiated CM2 carbonaceous chondrite has relatively high reflectivity of visible band but relative low reflectivity and slope of near-infrared band in its spectrum, which is consistent with that of the weathered volatile-rich C-group asteroid. The research may provide a certain reference and support for choosing suitable asteroid as target for the future Near-Earth Asteroid exploration mission, interpreting spectral remote sensing data, and understanding the evolution process of asteroid surface materials.

Key words: asteroids; space weathering; reflectance spectrum; meteorites; nanophase iron; volatiles

0 引言

反射光谱遥感是深空探测的重要技术手段,主要用于解译目标天体表面的物质组成,进而深化对太阳系演化过程的认识。太空风化是指无大气及无磁场行星体在微陨石撞击、太阳风粒子注入或溅射、宇宙射线照射和周期性热循环作用下,表面物质发生破碎、矿物组分、晶体结构和反射光谱特征发生变化的一种改造作用(Pieters and Noble, 2016)。太空风化在月球早期研究时被提出和证实(Gold, 1955; Gold et al., 1970; Hapke et al., 1970),其中纳米级单质金属铁(下称纳米铁, npFe^0) (Hapke et al., 1975; Keller and McKay, 1993)被认为是造成光谱在可见光波段反射率降低(变暗)、吸收深度减弱和近红外斜率增加(变红)(Britt and Pieters, 1994)的主要原因。普遍发育的太空风化作用往往会改变原始物质的特性,造成光谱信息减弱甚至丢失,给遥感解译工作带来较大困难。

虽然水星和小行星表面也存在太空风化作用(Hapke 2001),但国际上对小行星太空风化的认识长时间局限于“月球模式”(即 npFe^0 是主要的太空风化产物,且造成光谱的反射率降低,吸收深度变浅和近红外斜率增加)(Pieters and Noble, 2016)。例如,在日本“隼鸟号”探测器对 S 型小行星“糸川”(25143 Itokawa)采集返回的颗粒样品表层,发现了 npFe^0 和纳米级的富铁富硫颗粒(Noguchi et al., 2011),且该小行星与月球表面的光谱改造特征相似(Hiroi et al., 2006),表明 S 型小行星仍然遵循太空风化的“月球模式”。然而,考虑到不同类型小行星的物质组成(Gaffey et al., 2002)、演化历史和太阳系中所处位置(Gradie and Tedesco, 1982)均存在较大差别,因此不同类型的小行星理论上应具有

不同的太空风化产物和光谱改造特征。一些探测结果表明确实如此,例如 V 型小行星 4 Vesta 没有显示出明显的太空风化光谱改造特征(Pieters et al., 2012),但 G 型小行星 1 Ceres 撞击坑的新鲜溅射物却显示出蓝色的光谱斜率(即斜率为负值)(Stephan et al., 2017),目前正在执行采样返回任务的两个 C 群的碳质小行星“龙宫(162173 Ryugu)”和“贝努(101955 Bennu)”也显示出蓝色的近红外斜率(Sugita et al., 2019; Hamilton et al., 2019)。这些小行星光谱特征的不一致,表明不同类型小行星太空风化的光谱效应确实存在多样性,但每种小行星太空风化光谱效应的具体内容和光谱特征发生改造的内在原因,国际上的研究仍相对匮乏。

Sasaki 等(2001)采用脉冲激光辐照橄榄石并测量辐照前后的反射光谱变化,开启了在实验室模拟微陨石轰击小行星表面以研究太空风化光谱效应的先河。一些学者随后也利用脉冲激光辐照陨石模拟研究小行星表面的太空风化光谱效应。例如 Murchison(CM2)陨石在遭受脉冲激光辐照后的光谱近红外斜率降低,而不是像月球和 S 型小行星一样的近红外斜率增加(Matsuoka et al., 2015)。

中国目前也在规划近地小行星探测及采样返回任务,研究不同类型近地小行星受太空风化的光谱改造效应,对探测目标的前期筛选和遥感数据的准确解译,具有非常重要的工程价值和科学意义。基于此背景,本研究在实验室采用脉冲激光分别辐照了顽辉石无球粒陨石、普通球粒陨石和碳质球粒陨石等 3 类共 6 块陨石,模拟微陨石撞击对 E 型、S 型、C 群小行星表面的改造过程,系统研究太空风化作用对不同类型近地小行星光谱特征的改造规律以及造成差异的可能原因。

1 样品及研究方法

1.1 样品

本研究共选择了3种类型共6块陨石样品进行太空风化模拟实验研究,分别是Norton County 陨石(顽辉石无球粒陨石),Xingyang 陨石(H6型普通球粒陨石),Kheneg Ljouad 陨石(LL5/6型普通球粒陨石),Allende 陨石(CV3型碳质球粒陨石),Shanshan 002 陨石(CO3型碳质球粒陨石)以及Murchison 陨石(CM2型碳质球粒陨石)(表1)。其中Shanshan 002 陨石为最新发现的陨石,目前还未有相关研究结果发表。所有样品在实验前都被放置于真空干燥腔中常温保存至少1个月以上,以尽量排除地球环境的污染,并在测量原始光谱(未受激光辐照)前通过2000目金刚石抛光盘处理成平坦表面,尽量避免表面粗糙度不一致对光谱分析的影响。所有样品在测量前都经过了8 h、100 °C的烘干处理,以去除制样过程中带来的水分等杂质。

1.2 实验方法

采用山东大学威海校区反射光谱实验室的ASD FieldSpec4 地物光谱仪对6块陨石样品进行反射光谱测量,该设备搭载有一个硅阵列探测器和两个铟镓砷探测器(InGaAs),光谱测量范围覆盖0.35~2.5 μm。在测量陨石反射光谱前,先采用Spectralon 定标板进行定标,光源、定标板/样品、光纤探头之间的相对位置如下:①调整光源位置,使光源距离定标板30 cm,形成一个直径约为6.3 cm的均匀光斑;②调整探测光纤位置,使其距离定标板表面5 mm,保证收集的信号全部来自于直径约3 mm

的圆形区域。定标结束后,依次测量未经激光辐照处理的6块陨石的原始反射光谱,测量位置均选自陨石表面成分最均匀的区域,以最大限度地代表其主体物质组成。所有陨石样品均在大气环境下以30°相角(入射角为0°,观测角为30°)进行光谱测量,通过温度计测量发现,样品表面受光谱仪光源照射的温度约为40 °C。

采用中国科学院地球化学研究所搭建的超高真空脉冲激光辐照设备,对6块陨石的原始光谱采集区域分别进行了激光辐照。该系统搭载一台波长为532 nm的钕铝榴石脉冲激光器。将目标陨石置于样品腔中,抽真空至 5×10^{-4} Pa,调节单次脉冲激光能量至31 mJ,并调节聚光透镜位置使作用到样品表面的激光光斑直径约1 mm。减除聚焦透镜和腔体石英窗对激光能量的吸收与散射,最终作用在样品表面的激光能量约为28 mJ/次。每一个区域采用激光连续照射10次,以模拟距离太阳1个天文单位(AU)处的近地小行星在10亿年(1 Ga)期间内,直径1 μm微陨石(10^{-15} kg)以15 km/s的速度对表面物质的改造(Sasaki et al., 2001)。样品受到激光辐照的能量密度约为 1.125×10^{-14} J·m⁻²·s⁻¹。最后依次对每块陨石样品激光辐照后的区域进行反射光谱测量,方法与前述一致。

1.3 数据处理

为了定量比较激光辐照前后陨石反射光谱的变化,分别统计了每块样品辐照前后光谱曲线的 $R_{0.55}$,即在0.55 μm处的绝对反射率(以下称反射率)和吸收深度(Clark and Roush, 1984)。同时

表1 6块陨石样品在辐照前后的反射光谱特征变化

Table 1 Variation of reflectance spectral characteristics of 6 pieces of meteorites before and after the laser irradiation

样品对应的小行星类型	样品名称	样品类型	样品辐照前		样品辐照后		辐照后样品的光谱变化		
			$R_{0.55}$	吸收位置/μm [吸收深度]/%	$R_{0.55}$	吸收位置/μm [吸收深度]/%	$R_{0.55}$	吸收深度	近红外斜率
E型	Norton County	顽辉石无球粒陨石	0.296	0.896 [4.07]	0.251	0.896 [1.4]	降低	变浅	增加
				1.445 [2.52]		1.942 [2.67]			
				1.942 [11.12]					
S型	Xingyang	普通球粒陨石 H6	0.169	0.943 [29.72]	0.100	0.943 [21.39]	降低	变浅	增加
				1.938 [16.02]		1.938 [11.21]			
S型	Kheneg Ljouad	普通球粒陨石 LL5/6	0.174	1.029 [30.98]	0.113	0.98 [19.78]	降低	变浅	增加
C群	Murchison	碳质球粒陨石 CM2	0.049	0.677 [1.91]	0.051	—	增加	消失	降低
				1.953 [0.88]					
C群	Allende	碳质球粒陨石 CV3	0.083	1.055 [5.66]	0.071	1.037 [1.71]	降低	变浅	增加
				2.092 [5.66]		2.106 [2.78]			
C群	Shanshan 002	碳质球粒陨石 CO3	0.072	1.039 [2.81]	0.061	—	降低	消失	增加
				2.068 [2.82]					

为了直观比较近红外斜率在辐照前后的变化,对每一条原始光谱在 $0.75 \mu\text{m}$ 处均做了归一化处理。

$$BD_{\lambda} = 1 - \frac{R_{\lambda}}{R_{ca}} \quad (1)$$

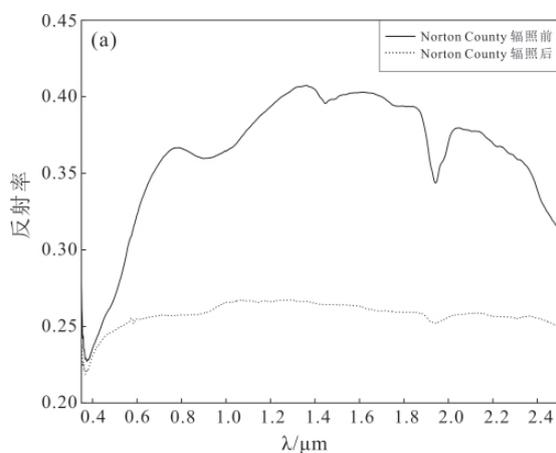
式中, λ 是光谱吸收中心对应的波长 (μm); BD_{λ} 是 λ 处的吸收深度 (%); R_{λ} 是 λ 处光谱的反射率; R_{ca} 是 λ 处对应的连续统的反射率。

表 1 列出了 6 块陨石辐照前后的 $R_{0.55}$ 、吸收中心和吸收深度等信息。连续统(或称包络线)的绘制步骤采用 Clark 外壳系数法(Clark and Roush, 1984): ①通过求导得出光谱曲线的所有极大值的点,比较极大值,得出光谱曲线的最大值点;②以最大值点作为起点,计算该点与长波方向各极大值点连线的斜率,以斜率最大点作为包络线的下一个端点,再以此点为起点,直到最后一个点;③以最大值点作为起点,计算该点与短波方向各极大值点连线的斜率,以斜率最大点作为包络线的下一个端点,再以此点为起点,直到曲线的开始点;④依次用直线连接所有的端点,即可形成包络线。

2 结果

2.1 顽辉石无球粒陨石

图 1 展示了顽辉石无球粒陨石(Norton County 陨石)在脉冲激光辐照前后的反射光谱。在图 1a 中,能够明显看出辐照后相比辐照前,反射率在整体测量波段均明显降低,其中在 $0.55 \mu\text{m}$ 处反射率由 0.296 降低至 0.251。由于顽辉石无球粒陨石极易遭受地球风化,并且测量在大气环境下进行,因此辐照前的光谱呈现出水和羟基的部分吸收特征,



即分别在 $1.45 \mu\text{m}$, $1.94 \mu\text{m}$ 附近具有 2.52% 和 11.12% 的吸收;但辐照后对应的吸收特征则明显减弱甚至消失: $1.94 \mu\text{m}$ 附近的吸收深度降低至 2.67%; $1.45 \mu\text{m}$ 附近的吸收特征则几乎完全消失。图 1a 中辐照前区域的光谱曲线,同样可见 $0.89 \mu\text{m}$ 附近的吸收特征,该特征通常是含铁矿物被水蚀变产生的三价铁引起的(Vilas, 1994),吸收深度为 4.07%,但辐照后吸收特征明显变浅,吸收深度降低至 1.4%。图 1b 清晰地表明顽辉石无球粒陨石在激光辐照后,近红外波段的光谱曲线整体趋于平缓,近红外斜率相对增加。

2.2 普通球粒陨石

图 2 所示为 2 块普通球粒陨石在激光辐照前后的反射光谱。如图 2a 所示,激光辐照后,光谱整体测量波段的反射率明显降低,其中 Xingyang 陨石(高铁群的 H6 型陨石)的 $R_{0.55}$ 值由 0.169 下降为 0.100; Kheneg Ljouad 陨石(极低铁群的 LL5/6 型陨石)的 $R_{0.55}$ 值由 0.174 下降至 0.113。在图 2a 中,辐照前 Xingyang 陨石在 $0.943 \mu\text{m}$ 处(吸收深度为 29.72%)和 $1.938 \mu\text{m}$ 处(吸收深度为 16.02%)显示出强烈的低钙辉石的吸收特征;而 Kheneg Ljouad 陨石在 $1.029 \mu\text{m}$ 处(吸收深度为 30.98%)表现出较强的橄榄石吸收特征。但激光辐照后,2 块陨石的吸收深度均明显变浅,其中 Xingyang 陨石在 $0.943 \mu\text{m}$ 和 $1.938 \mu\text{m}$ 处的吸收深度分别降低至 21.39% 和 11.21%, Kheneg Ljouad 陨石在 $1.0 \mu\text{m}$ 附近的吸收深度则降低至 19.78%。图 2b 直观地显示出,经在 $0.75 \mu\text{m}$ 处归一化处理后, Xingyang 陨石和 Kheneg Ljouad 陨石在辐照后的近红外斜率相比辐照前均表现出明显的增加。

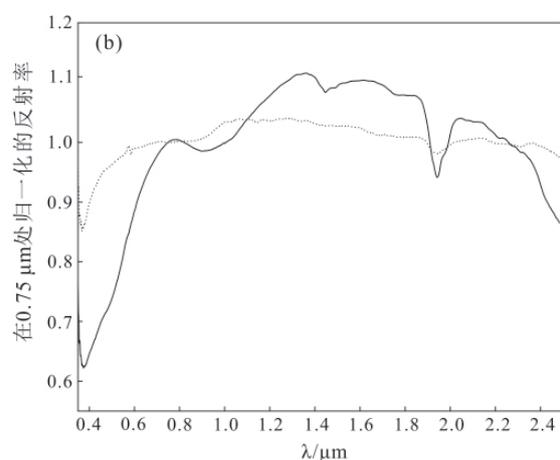


图 1 顽辉石无球粒陨石在辐照前和辐照后的反射光谱

Fig.1 Reflectance spectra of the aubrite before and after the laser irradiation

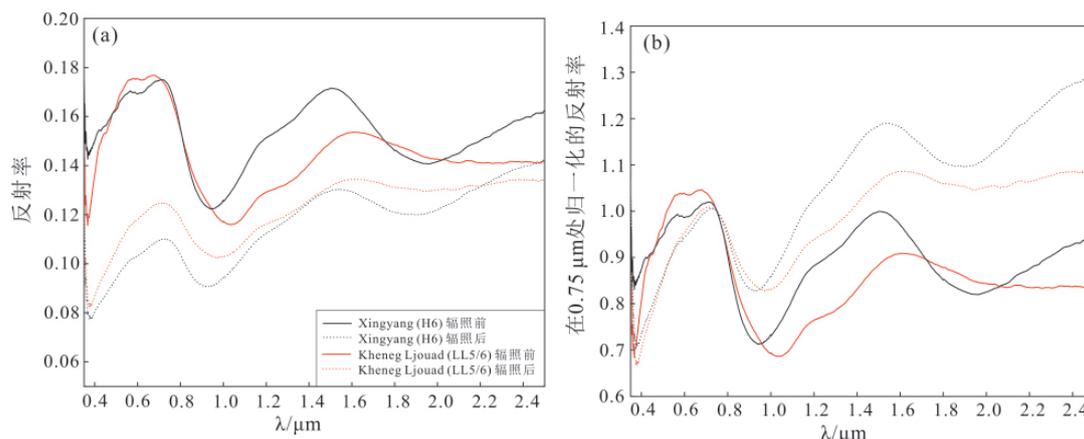


图2 普通球粒陨石在辐照前和辐照后的反射光谱

Fig.2 Reflectance spectra of ordinary chondrites before and after the laser irradiation

2.3 碳质球粒陨石

图3为3块碳质球粒陨石在激光辐照前后的反射光谱。如图3a所示,3块陨石在辐照前后的反射率变化呈现出不同的结果。Murchison 陨石被辐照后在可见波段(0.35~0.72 μm)反射率增加, $R_{0.55}$ 由0.049 增长为0.051; 但近红外区域(0.72~2.5 μm)的反射率则降低。Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石被辐照后在可见光波段的光谱反射率均呈现下降的特征, 其中 $R_{0.55}$ 分别由0.083 降低至0.071 以及由0.072 降低至0.061; 近红外波段反射率则有不同程度的增加: 激光辐照后 Allende 陨石在0.87~2.5 μm 波段的反射率明显高于辐照前; 而激光辐照后 Shanshan 002 陨石在1.681~2.5 μm 波段的反射率高于辐照前。至于吸收深度, 辐照前的 Murchison 陨石在0.67 μm 处和1.95 μm 附近可见较浅的吸收(吸收深度分别为1.91% ,0.88%), 但辐照后吸

收特征则完全消失(图3a)。辐照前的 Allende 陨石具有1.0 μm 和2.0 μm 附近两个较浅的辉石的吸收特征, 吸收深度均为5.66%, 辐照后两个吸收深度则明显变浅, 分别降低至1.71%和2.78%。Shanshan 002 陨石呈现出与 Allende 陨石类似的吸收深度变化趋势, 位于1.0 μm 和2.0 μm 附近的辉石的吸收特征在辐照后几乎完全被抹平。图3b 清晰显示了反射光谱归一化处理, 即辐照后 Murchison 陨石的近红外斜率明显下降, 而 Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石的近红外斜率则相对上升。

3 讨论

3.1 激光辐照前后陨石的光谱变化成因

3.1.1 顽辉石无球粒陨石 顽辉石无球粒陨石主要由无铁或贫铁的顽辉石组成(Watters and Prinz, 1979; Watters et al., 1980; Kimura et al., 1993; Keil, 2010)。

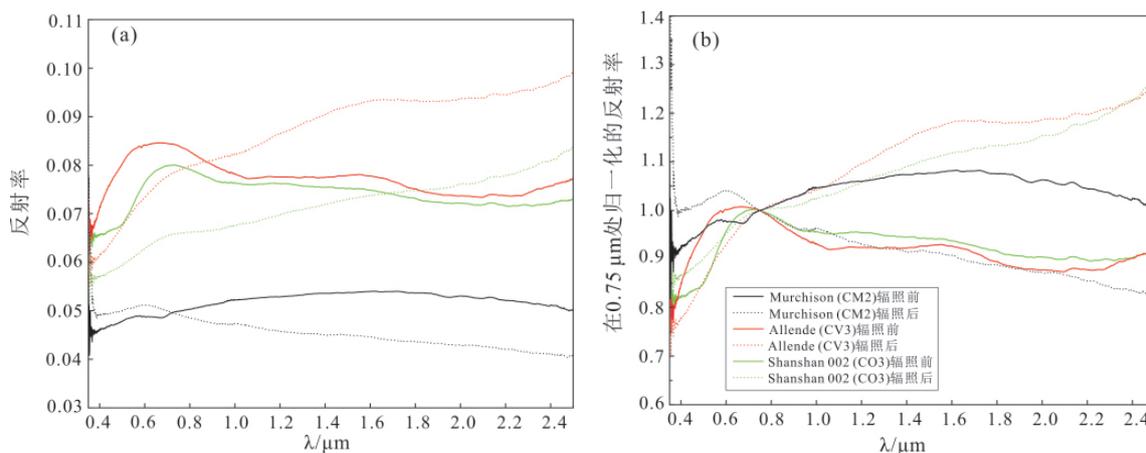


图3 碳质球粒陨石在辐照前和辐照后的反射光谱

Fig.3 Reflectance spectra of carbonaceous chondrites before and after the laser irradiation

文中的 Norton County 陨石是一块降落型陨石,由 84.5% 的顽辉石 ($\text{En}_{98.76}\text{Fs}_{0.10}\text{Wo}_{1.12}$)、10.0% 的镁橄榄石 ($\text{Fo}_{99.99}$)、2.7% 的透辉石 ($\text{En}_{57.38}\text{Fs}_{0.04}\text{Wo}_{42.58}$)、1.0% 的斜长石 ($\text{An}_{8.24}\text{Ab}_{88.64}\text{Or}_{3.10}$)、1.0% 的陨硫铁以及 0.3% 的镍纹石组成 (Watters and Prinz, 1979)。因为顽辉石无球粒陨石极易在地球环境下被氧化且吸收空气中的水分,因此未辐照之前的 Norton County 陨石显示出 $1.45\ \mu\text{m}$ 和 $1.94\ \mu\text{m}$ 处水或羟基的吸收特征,以及陨硫铁或铁镍金属被水蚀变产生的 $0.89\ \mu\text{m}$ 处 Fe^{3+} 的吸收特征;而激光辐照后这些吸收深度变浅,可能是激光辐照的加热效应释放了部分地球风化含水矿物中的水或羟基。目前为止,还没有相关研究显示贫铁的顽辉石在太空风化作用下能够产生 npFe^0 。富铁矿物的存在是 npFe^0 产生的充分不必要条件 (Sasaki et al., 2001; Wu et al., 2017),因此顽辉石无球粒陨石中贫铁的顽辉石和贫铁的镁橄榄石等硅酸盐矿物,一般无法为 npFe^0 的产生提供足够的铁元素来源。然而一些研究表明纳米陨硫铁 (npFeS) 和纳米铁镍金属 (npFeNi) 也可能导致陨石光谱反射率降低和近红外斜率升高 (Britt and Pieters, 1994; Okazaki et al., 2015) 此外覆盖在原生矿物表层的非晶层也是太空风化的重要产物之一,能够明显导致反射光谱反射率降低 (Noble et al., 2011a)。太空风化过程可能会使原生的陨硫铁和铁镍金属破碎分散产生 npFeS 和 npFeNi 。由于较低的结合能,陨硫铁也可能分解形成 npFe^0 (Hapke, 2001)。因此本文推测,激光辐照后 Norton County 陨石中覆盖在顽辉石和镁橄榄石等矿物表层的非晶层、陨硫铁和铁镍金属破碎产生的极少量 npFeS 和 npFeNi ,以及少量陨硫铁分解产生的 npFe^0 ,可能是最终导致 Norton County 陨石在辐照后光谱反射率降低和近红外斜率增加的原因。

3.1.2 普通球粒陨石 普通球粒陨石主要由硅酸盐矿物(橄榄石、辉石、斜长石)和金属组成,进一步细分为高铁群(H型)、低铁群(L型)和低铁低金属群(LL型) (Weisberg et al., 2006)。本文研究的 Xingyang 陨石是一块降落型的 H6 型普通球粒陨石,其主要矿物组成为 34.18% 的低钙辉石 ($\text{En}_{76.42}\text{Fs}_{15.43}\text{Wo}_{8.15}$)、30.74% 的橄榄石 ($\text{Fa}_{18.3}$)、20.09% 的铁镍金属、7.68% 的斜长石、5.45% 的陨硫铁等 (陶克捷等, 1979)。Kheneg Ljouad 陨石是一块降落型的 LL5/6 型普通球粒陨石,主要由橄榄石 ($\text{Fa}_{31.0\pm 0.2}$)、低钙辉石 ($\text{Fs}_{25.0\pm 0.4}\text{Wo}_{2.1\pm 0.2}$)、高钙辉石

($\text{Fs}_{10.7}\text{Wo}_{43.1}$)、斜长石 ($\text{Ab}_{84.4\pm 2.2}\text{An}_{10.6\pm 0.3}\text{Or}_{5.0\pm 2.3}$) 等矿物组成(引自 The Meteoritical Society 网站)。图 2 的光谱结果也显示 Xingyang 陨石和 Kheneg Ljouad 陨石分别是由低钙辉石和橄榄石控制的,与岩石矿物学分析结果一致。针对普通球粒陨石的太空风化研究最为广泛,之前的模拟实验已经表明普通球粒陨石在激光辐照之后能够产生大量的 npFe^0 (Noble et al., 2011b),并且 npFe^0 是造成反射光谱在可见波段反射率降低,吸收深度变浅以及近红外斜率增加的主要原因 (Britt and Pieters, 1994)。橄榄石 (Fo_{91}) 在脉冲激光辐照后能够产生 npFe^0 和与普通球粒陨石同样的光谱改造效应 (Sasaki et al., 2001)。本文研究的 Kheneg Ljouad 陨石在激光辐照之后,光谱改造规律与 Sasaki 等 (2001) 的研究结果一致,且该陨石中橄榄石相对 Sasaki 等 (2001) 所用橄榄石更为富铁,因此本文推测在激光辐照后, Kheneg Ljouad 陨石中橄榄石产生了一定量的 npFe^0 ,并且是导致光谱反射率降低,吸收深度变浅以及近红外斜率增加的主要原因。Guo 等 (2020) 发现普通球粒陨石中的低钙辉石也能够分解产生 npFe^0 。考虑到 Xingyang 陨石主要由含铁的低钙辉石控制,因此 Xingyang 陨石中的低钙辉石在辐照之后可能产生了一定量的 npFe^0 ,造成反射率降低,吸收深度变浅以及近红外斜率增加。对比 Xingyang 陨石和 Kheneg Ljouad 陨石的研究可以发现,尽管二者在类型、矿物种类和含铁量方面存在差异,但辐照后展现出同样的光谱改造规律,且吸收深度降低程度大致相等,表明在太空风化光谱改造效应和内部机理方面,普通球粒陨石亚型之间的差异并不明显。

3.1.3 碳质球粒陨石 碳质球粒陨石是一类低反射率,由含水层状硅酸盐以及陨硫铁和铁镍金属等物质组成的陨石,根据金属和挥发分含量的不同又细分为 8 个亚类 (Weisberg et al., 2006)。目前针对碳质球粒陨石太空风化的研究较少。Allende 陨石是一块 CV3 型碳质球粒陨石,Shanshan 002 陨石是一块 CO3 型碳质球粒陨石,Murchison 陨石是一块 CM2 型碳质球粒陨石。图 3 显示 Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石在辐照后,光谱反射率降低,吸收深度变浅和近红外斜率增加,与普通球粒陨石光谱改造效应一致,暗示其产生了 npFe^0 。但 Murchison 陨石则出现了可见光波段反射率增加,近红外斜率降低的特征,这一结果也与其他学者 (Matsuoka et al., 2015; Lantz et al., 2017; Thompson et al., 2019)

的研究一致 暗示没有 npFe^0 的产生。 npFe^0 的产生需要含铁矿物为其提供物质来源 (Sasaki et al., 2001) 并且需要有高温、还原的环境。相比于 CM 型、CV 型和 CO 型陨石通常含有更多铁镁硅酸盐组成的球粒,且牌号与普通球粒陨石接近 (Lantz et al., 2017),图 3 辐照前的光谱结果也显示 Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石具有明显的辉石吸收特征,而 Murchison 陨石缺乏镁铁质硅酸盐的吸收特征。因此一方面,Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石中的辉石能够为 npFe^0 的产生提供物质来源,而 Murchison 陨石则相对缺乏辉石等镁铁物质作为 npFe^0 的物质来源。另一方面,挥发分含量的差别可能是造成 Murchison 陨石难以产生 npFe^0 而 Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石易于产生 npFe^0 的另一个主要原因:岩石学研究已经表明,Murchison 陨石 (Louis et al., 1973) 相比于 Allende 陨石 (Buchanan et al., 1997) 和 Shanshan 002 陨石,含水层状硅酸盐以及挥发分的含量更高,在激光辐照加热过程中,挥发分和有机物相比于硅酸盐最先生被蒸发,这一过程带走了大量的热,可能导致 Murchison 陨石无法获得足够的热量从而抑制了 npFe^0 的形成,而 Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石因为挥发分含量更少,辉石能够被优先分解产生 npFe^0 ;同时 Murchison 陨石中挥发分(主要是水)被加热释放、分解,体系中处于相对氧化的环境,抑制了 npFe^0 形成所需的还原环境,而 Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石相对处于还原环境,有利于 npFe^0 的形成。而 Murchison 陨石辐照后近红外斜率增加则可能与有机物含量相关:CM 型陨石相对 CO 型和 CV 型的有机物含量一般更高 (Glavin et al., 2018),因此 Murchison 陨石在激光轰击过程中可能发生了氨基酸等有机物的高温碳化,导致在辐照后的表面更易于形成细颗粒的无机碳,进而造成近红外斜率的降低 (Trang et al., 2018);而 Allende 陨石和 Shanshan 002 陨石则可能相对难以形成足量的无机碳。因此, npFe^0 与无机碳可能共同造成了三块陨石辐照后的光谱结果:辉石以及挥发分的含量通过控制 npFe^0 的产生,决定了三块陨石辐照后反射率是否降低和近红外斜率是否增加;而有机物含量通过控制碳的产生,决定了近红外斜率是否降低。

3.2 小行星表面的太空风化

3.2.1 E 型小行星 几何反照率(下称反照率)是进行小行星光谱分类的一个重要参数,指的是天体在零相位角的实际光度与相同横截面大小的朗伯

面的光度之比。E 型小行星是目前发现几何反照率最高的一类小行星(一般 >0.3) (Zellner, 1975; Tholen, 1984)。E 型小行星最可能是顽辉石无球粒陨石的母体,主要由贫铁或无铁的顽辉石组成,且经历了较为完全的分异 (Zellner, 1975; Zellner and Gradie, 1976; Zellner et al., 1977; Gaffey et al., 1992)。本研究结果表明,微陨石轰击作用能够造成顽辉石无球粒陨石光谱的反射率降低和近红外斜率升高,指示 E 型小行星在太空风化之后更倾向于变暗和变红。然而,不同的 E 型小行星在几何反照率和近红外斜率上不尽相同,一些 E 型小行星相对更亮(反照率大于 0.5),一些则相对较暗(反照率在 0.3 左右);一些 E 型小行星近红外斜率较高,为正值;而另一些 E 型小行星近红外斜率则相对较低,为负值 (Fornasier et al., 2008)。E 型小行星之间光谱的差异可能是太空风化作用的不同导致的:一方面,E 型小行星可能并不完全是由纯的顽辉石组成,部分未完全分异的 E 型小行星表面可能仍保留了一些相对富铁的硅酸盐(如橄榄石和辉石)、金属硫化物和铁镍金属 (Clark et al., 2004),并在太空风化作用下产生一定量的纳米级金属颗粒,导致光谱变暗和变红,而分异较为完全的 E 型小行星表面主要为贫铁的顽辉石 (Clark et al., 2004),太空风化的特征由非晶化作用控制;另一方面,所处的空间位置和环境可能也是导致不同 E 型小行星光谱特征存在差异的原因,即同时还要考虑撞击体物质组成和撞击频次的差异。红外光谱观测的结果 (Rivkin et al., 2002) 也表明,部分 E 型小行星具有羟基的吸收特征,与碳质球粒陨石中的含水层状硅酸盐类似,可能是经受了碳质球粒陨石的撞击;而部分 E 型小行星则缺乏羟基的吸收特征,可能缺乏含水量较高的陨石或小行星的撞击。因此,E 型小行星的太空风化光谱效应和机理,需要综合考虑演化程度、表层矿物种类以及所处空间环境。

3.2.2 S 型小行星 S 型小行星的典型光谱特征是具有两个明显的 $1\ \mu\text{m}$ 和 $2\ \mu\text{m}$ 的橄榄石和辉石的吸收带,且反照率中等(0.1~0.28) (Tholen, 1984; Usui et al., 2012)。通过光谱特征匹配,S 型小行星很早就被确认为普通球粒陨石的母体来源 (Tholen, 1984)。小行星 25143 Itowaka 采集返回的样品更直接证明其和普通球粒陨石来源的相关性 (Nakamura et al., 2011)。橄榄石 (Sasaki et al., 2001) 和普通球粒陨石 (Noble et al., 2011b) 的激光辐照模拟实验显示,S 型小行星的太空风化被认为与月球类似,都具有反射率降低、吸收深度变浅和近红外斜率增

加的光谱特征,且 npFe^0 被认为是造成这些变化的主要原因(Hapke, 2001)。Hiroi 等(2006)研究了糸川小行星与普通球粒陨石的反射光谱,发现该小行星具有和 LL6 型陨石太空风化后类似的光谱特征(Hiroi et al., 2006)。随后隼鸟号返回的样品也证明该小行星表面的确存在 npFe^0 ,且被认为是造成光谱发生变化的主要原因(Noguchi et al., 2014)。目前有关 S 型小行星的太空风化光谱效应和成因机理已经比较明确,本研究成果表明 S 型小行星太空风化的光谱效应和机理仍然遵循太空风化的“月球模式”。

3.2.3 C 群小行星 C 群小行星是碳质小行星的总称,包含 B、C、F、G 型,均具有非常低的反照率(Tholen, 1984),已有研究证明 C 群小行星是碳质球粒陨石的母体(Pieters and McFadden, 1994; Clark et al., 2010; Carry, 2012)并且不同亚类的 C 群小行星挥发分(主要是水、羟基)的含量(Marrocchi et al., 2018)和水蚀变程度(Vilas, 1994)存在明显差异,这可能是 C 群小行星的太空风化光谱呈现出不同特征的原因。目前尚未有直接对 C 群小行星太空风化光谱效应的观测研究。我们对 Allende、Shanshan 002 和 Murchison 这三块碳质球粒陨石激光辐照的研究表明,铁镁质矿物、挥发分含量和有机物含量可能是影响碳质球粒陨石太空风化光谱反射率和近红外斜率变化的重要因素。因此根据对 Allende 和 Shanshan 002 的研究结果推测,对于水蚀变程度较低且更贫挥发分的 C 群小行星,太空风化后光谱变化趋势为:可见波段反射率降低而近红外波段反射率升高,吸收深度变浅且近红外斜率明显增加,主要由 npFe^0 引起;根据 Murchison 陨石的实验结果推测,水蚀变程度较高且富挥发分和富含有机物的 C 群小行星在太空风化之后,可见波段反射率更倾向于升高而近红外波段反射率降低,且近红外斜率降低。两个 B 型小行星(162173 Ryugu 星(Kitazato et al., 2019)和 101955 Bennu 星(Clark et al., 2011))的最新探测结果也支持这一推测:Ryugu 星表面有比较均匀且细粒的风化层(Sugita et al., 2019)并且更加缺少羟基信号(Kitazato et al., 2019),表明太空风化作用较为发育,表层挥发分(主要是水)含量更低;而 Bennu 星表面则主体由更大尺寸的石块组成(Lauretta et al., 2019),且相对具有更丰富的羟基信号(Hamilton et al., 2019),表明太空风化作用较弱,挥发分(主要是水)含量更高;光谱结果也显示 Ryugu 星的光谱反射率比 Bennu 星更低(Kitazato et al., 2019),即

Ryugu 星比 Bennu 星更倾向于产生 npFe^0 。

4 结论

本研究表明,在微陨石轰击条件一致的情况下,小行星太空风化光谱变化特征主要受主体矿物类型的控制:

(1) E 型小行星在太空风化之后出现反射率降低、吸收深度变浅和近红外斜率增加的特征,主要原因在于微陨石轰击引起的硅酸盐矿物非晶化,以及极少量陨硫铁及铁镍金属等含铁矿物破碎分解产生的 npFe^0 、 npFeS 和 npFeNi 颗粒。

(2) S 型小行星的太空风化光谱改造效应与月球一致,表现为可见光波段反射率降低、吸收深度变浅和近红外斜率增加的特征,主要原因在于微陨石轰击形成了大量 npFe^0 。

(3) 铁镁硅酸盐含量、以水为主的挥发分含量和有机物含量是影响 C 群小行星太空风化光谱效应的主要原因:相对富铁镁硅酸盐且贫挥发分的 C 群小行星在微陨石轰击后能够形成 npFe^0 ,使反射光谱出现可见光波段反射率降低、吸收深度变浅和近红外斜率增加的特征,而相对贫铁镁硅酸盐且富挥发分的 C 群小行星相对难以形成 npFe^0 ;富含有机物的 C 群小行星在微陨石轰击后可能会产生一定量的无机碳,造成近红外斜率降低的特征,而贫有机物的 C 群小行星轰击后相对难以出现无机碳。

致谢:感谢中国科学院地球化学研究所李瑞、莫冰工程师在样品制备和分析过程中的帮助。

参考文献(References):

- Britt D T, Pieters C M. 1994. Darkening in black and gas-rich ordinary chondrites: The spectral effects of opaque morphology and distribution. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58(18): 3905-3919
- Buchanan P C, Zolensky M E, Reid A M. 1997. Petrology of Allende dark inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(8): 1733-1743
- Carry B. 2012. Density of asteroids. *Planetary and Space Science*, 73(1): 98-118
- Clark B E, Binzel R P, Howell E S, Cloutis E A, Ockert-Bell M, Christensen P, Barucci M A, DeMeo F, Lauretta D S, Connolly H Jr, Soderberg A, Hergenrother C, Lim L, Emery J, Mueller M. 2011. Asteroid (101955) 1999 RQ36: Spectroscopy from 0.4 to 2.4 μm and meteorite analogs. *Icarus*, 216(2): 462-475
- Clark B E, Bus S J, Rivkin A S, McConnochie T, Sanders J, Shah S, Hiroi T, Shepard M. 2004. E-type asteroid spectroscopy and compositional modeling. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 109(E2): E02001

- Clark B E, Ziffer J, Nesvornyy D, Campins H, Rivkin A S, Hiroi T, Barucci M A, Fulchignoni M, Binzel R P, Fornasier S, DeMeo F, Ockert-Bell M E, Licandro J, Mothé-Diniz T. 2010. Spectroscopy of B-type asteroids: Subgroups and meteorite analogs. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 115(E6) : E06005
- Clark R N, Roush T L. 1984. Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 89(B7) : 6329–6340
- Fornasier S, Migliorini A, Dotto E, Barucci M A. 2008. Visible and near infrared spectroscopic investigation of E-type asteroids, including 2867 Steins, a target of the Rosetta mission. *Icarus*, 196(1) : 119–134
- Gaffey M J, Cloutis E A, Kelley M S, Reed K L. 2002. Mineralogy of Asteroids. In: Bottke W F Jr, Cellino A, Paolicchi P, Binzel R P, eds. *Asteroid III*. Tucson: University of Arizona, 183–204
- Gaffey M J, Reed K L, Kelley M S. 1992. Relationship of E-type Apollo asteroid 3103 (1982 BB) to the enstatite achondrite meteorites and the Hungaria asteroids. *Icarus*, 100(1) : 95–109
- Glavin D P, Alexander C M, Aponte J C, Dworkin J P, Elsila J E, Yabuta H. 2018. The origin and evolution of organic matter in carbonaceous chondrites and links to their parent bodies. In: Abreu N, ed. *Primitive Meteorites and Asteroids: Physical, Chemical and Spectroscopic Observations Paving the Way to Exploration*. Amsterdam: Elsevier, 205–271
- Gold T, Campbell M J, O'Leary B T. 1970. Optical and high-frequency electrical properties of the lunar sample. *Science*, 167(3918) : 707–709
- Gold T. 1955. The lunar surface. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 115(6) : 585–604
- Gradie J, Tedesco E. 1982. Compositional structure of the asteroid belt. *Science*, 216(4553) : 1405–1407
- Guo Z, Li Y, Liu S, Xu H F, Xie Z D, Li X J, Li X Y, Lin Y T, Coulson I M, Zhang M M. 2020. Discovery of nanophase iron particles and high pressure clinoenstatite in a heavily shocked ordinary chondrite: Implications for the decomposition of pyroxene. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 272: 276–286
- Hamilton V E, Simon A A, Christensen P R, Reuter D C, Clark B E, Barucci M A, Bowles N E, Boynton W V, Brucato J R, Cloutis E A, Connolly H C, Donaldson Hanna K L, Emery J P, Enos H L, Fornasier S, Haberle C W, Hanna R D, Howell E S, Kaplan H H, Keller L P, Lantz C, Li J Y, Lim L F, McCoy T J, Merlin F, Nolan M C, Praet A, Rozitis B, Sandford S A, Schrader D L, Thomas C A, Zou X D, Lauretta D S. 2019. Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Bennu. *Nature Astronomy*, 3(4) : 332–340
- Hapke B W, Cassidy W A, Wells E. 1975. Effects of vapor-phase deposition processes on the optical, chemical, and magnetic properties of the lunar regolith. *The Moon*, 13(1–3) : 339–353
- Hapke B W, Cohen A J, Cassidy W A, Wells E N. 1970. Solar radiation effects on the optical properties of Apollo 11 samples. In: *Proceedings of the Apollo 11 Lunar Science Conference*, *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement 3*. New York: Pergamon Press, 2199–2212
- Hapke B. 2001. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 106(E5) : 10039–10073
- Hiroi T, Abe M, Kitazato K, Abe S, Clark B E, Sasaki S, Ishiguro M, Barnouin-Jha O S. 2006. Developing space weathering on the asteroid 25143 Itokawa. *Nature*, 443(7107) : 56–58
- Keil K. 2010. Enstatite achondrite meteorites (aubrites) and the histories of their asteroidal parent bodies. *Geochemistry*, 70(4) : 295–317
- Keller L P, McKay D S. 1993. Discovery of vapor deposits in the lunar regolith. *Science*, 261(5126) : 1305–1307
- Kimura M, Lin Y T, Ikeda Y, El Goresy A, Yanai K, Kojima H. 1993. Mineralogy of Antarctic aubrites, Yamato-793592 and Allan Hills-78113: Comparison with non-Antarctic aubrites and E-chondrites. In: *Seventeenth Symposium on Antarctic Meteorites. Proceedings of the NIPR Symposium*. Tokyo: National Institute of Polar Research, 186–203
- Kitazato K, Milliken R E, Iwata T, Abe M, Ohtake M, Matsuura S, Arai T, Nakauchi Y, Nakamura T, Matsuoka M, et al. 2019. The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy. *Science*, 364(6437) : 272–275
- Lantz C, Brunetto R, Barucci M A, Fornasier S, Baklouti D, Bourçois J, Godard M. 2017. Ion irradiation of carbonaceous chondrites: A new view of space weathering on primitive asteroids. *Icarus*, 285: 43–57
- Lauretta D S, DellaGiustina D N, Bennett C A, Golish D R, Becker K J, Balram-Knutson S S, Barnouin O S, Becker T L, Bottke W F, Boynton W V, Campins H, Clark B E, Connolly Jr H C, d'Aubigny C Y D, Dworkin J P, Emery J P, Enos H L, Hamilton V E, Hergenrother C W, Howell E S, Izawa M R M, Kaplan H H, Nolan M C, Rizk B, Roper H L, Scheeres D J, Smith P H, Walsh K J, Wolner C W V, The OSIRIS-REx Team. 2019. The unexpected surface of asteroid (101955) Bennu. *Nature*, 568(7750) : 55–60
- Louis H F, Edward O, Kenneth J J. 1973. *Mineralogy, mineral-chemistry, and composition of the Murchison (C2) meteorite*. Washington: Smithsonian Institution Press, 1–39
- Marrocchi Y, Bekaert D V, Piani L. 2018. Origin and abundance of water in carbonaceous asteroids. *Earth and Planetary Science Letters*, 482: 23–32
- Matsuoka M, Nakamura T, Kimura Y, Hiroi T, Nakamura R, Okumura S, Sasaki S. 2015. Pulse-laser irradiation experiments of Murchison CM2 chondrite for reproducing space weathering on C-type asteroids. *Icarus*, 254: 135–143
- Nakamura T, Noguchi T, Tanaka M, Zolensky M E, Kimura M, Tsuchiyama A, Nakato A, Ogami T, Ishida H, Uesugi M, Yada T, Shirai K, Fujimura A, Okazaki R, Sandford S A, Ishibashi Y, Abe M, Okada T, Ueno M, Mukai T, Yoshikawa M, Kawaguchi J. 2011. Itokawa Dust Particles: A direct link between S-type asteroids and ordinary chondrites. *Science*, 333(6046) : 1113–1116
- Noble S K, Hiroi T, Keller L P, Rahman Z, Sasaki S, Pieters C M. 2011b. Experimental space weathering of ordinary chondrites by Nanopulse Laser: TEM results. In: *Proceedings of the 42nd Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute, 2
- Noble S K, Keller L P, Pieters C M. 2011a. Evidence of space weather-

- ring in regolith breccias II: Asteroidal regolith breccias. *Meteoritics & Planetary Science*, 45(12) : 2007–2015
- Noguchi K , Kimura M , Hashimoto T , Konno M , Nakamura T , Zolensky M E , Okazaki R , Tanaka M , Tsuchiyama A , Nakato A , Ogami T , Ishida H , Sagae R , Tsujimoto S , Matsumoto T , Matsuno J , Fujimura A , Abe M , Yada T , Mukai T , Ueno M , Okada T , Shirai K , Ishibashi Y. 2014. Space weathered rims found on the surfaces of the Itokawa dust particles. *Meteoritics & Planetary Science*, 49(2) : 188–214
- Noguchi T , Nakamura T , Kimura M , Zolensky M E , Tanaka M , Hashimoto T , Konno M , Nakato A , Ogami T , Fujimura A , Abe M , Yada T , Mukai T , Ueno M , Okada T , Shirai K , Ishibashi Y , Okazaki R. 2011. Incipient space weathering observed on the surface of Itokawa dust particles. *Science*, 333(6046) : 1121–1125
- Okazaki M , Sasaki S , Tsuchiyama A , Miyake A , Matsumoto T , Hirata T , Hiroi T. 2015. Laboratory simulation of the effect of FeS on space weathering. In: *Proceedings of the 46th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute , 1890
- Pieters C M , Ammannito E , Blewett D T , Denevi B W , De Sanctis M C , Gaffey M J , Le Corre L , Li J Y , Marchi S , McCord T B , McFadden L A , Mittlefehldt D W , Nathues A , Palmer E , Reddy V , Raymond C A , Russell C T. 2012. Distinctive space weathering on Vesta from regolith mixing processes. *Nature*, 491(7422) : 79–82
- Pieters C M , McFadden L A. 1994. Meteorite and asteroid reflectance spectroscopy: Clues to early solar system processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 22: 457–497
- Pieters C M , Noble S K. 2016. Space weathering on airless bodies. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 121(10) : 1865–1884
- Rivkin A S , Howell E S , Vilas F , Lebofsky L A. 2002. Hydrated minerals on asteroids: the astronomical record. In: *Bottke Jr W F , Cellino A , Paolicchi P , Binzel R P , eds. Asteroids III*. Tucson: University of Arizona Press , 235–253
- Sasaki S , Nakamura K , Hamabe Y , Kurahashi E , Hiroi T. 2001. Production of iron nanoparticles by laser irradiation in a simulation of lunar-like space weathering. *Nature*, 410(6828) : 555–557
- Stephan K , Jaumann R , Krohn K , Schmedemann N , Zambon F , Tosi F , Carozzo F G , McFadden L A , Otto K , De Sanctis M C , Ammannito E , Matz K D , Roatsch T , Preusker F , Raymond C A , Russell C T. 2017. An investigation of the bluish material on Ceres. *Geophysical Research Letters*, 44(4) : 1660–1668
- Sugita S , Honda R , Morota T , Kameda S , Sawada H , Tatsumi E , Yamada M , Honda C , Yokota Y , Kouyama T , et al. 2019. The geomorphology , color , and thermal properties of Ryugu: Implications for parent-body processes. *Science*, 364(6437) : eaaw0422
- The Meteoritical Society: <https://www.lpi.usra.edu/meteor/methbull.php>
- Tholen D J. 1984. Asteroid taxonomy from cluster analysis of photometry. Doctoral Thesis. Tucson: University of Arizona
- Thompson M S , Loeffler M J , Morris R V , Keller L P , Christoffersen R. 2019. Spectral and chemical effects of simulated space weathering of the Murchison CM2 carbonaceous chondrite. *Icarus*, 319: 499–511
- Trang D , Gasda P J , Corley L M , Gillis-Davis J J , Lucey P G. 2018. Space weathering of graphite: Application to mercury. In: *Proceedings of the 49th Lunar and Planetary Science Conference*. Houston: Lunar and Planetary Institute , 1208
- Usui F , Kasuga T , Hasegawa S , Ishiguro M , Kuroda D , Müller T G , Ootsubo T , Matsuhara H. 2012. Albedo properties of main belt asteroids based on the all-sky survey of the infrared astronomical satellite *AKARI*. *The Astrophysical Journal*, 762(1) : 56
- Vilas F. 1994. A cheaper , faster , better way to detect water of hydration on solar system bodies. *Icarus*, 111(2) : 456–467
- Watters T R , Prinz M , Rambaldi E R , Wasson J T. 1980. ALHA 78113 , Mt. Egerton and the aubrite parent body. In: *Proceedings of the 43rd Annual Meeting of the Meteoritical Society*. San Diego: University of California , 171
- Watters T R , Prinz M. 1979. Aubrites: Their origin and relationship to enstatite chondrites. In: *Proceedings of the 10th Lunar and Planetary Science Conference*. New York: Pergamon Press , 1373–1093
- Weisberg M K , McCoy T J , Krot A N. 2006. Systematics and evaluation of meteorite classification. In: *Lauretta D S , McSween Jr H Y , eds. Meteorites and the Early Solar System II*. Tucson: University of Arizona Press , 19–52
- Wu Y X , Li X Y , Yao W Q , Wang S J. 2017. Impact characteristics of different rocks in a pulsed laser irradiation experiment: Simulation of micrometeorite bombardment on the moon. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 122(10) : 1956–1967
- Zellner B , Gradie J. 1976. Minor planets and related objects. XX. Polarimetric evidence for the albedos and compositions of 94 asteroids. *The Astrophysical Journal*, 81: 262–280
- Zellner B , Leake M , Morrison D , Williams J G. 1977. The E asteroids and the origin of the enstatite achondrites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(12) : 1759–1767
- Zellner B. 1975. 44 NYSA: an iron-depleted asteroid. *The Astrophysical Journal*, 198: L45–L47
- 陶克杰 , 闻传芬 , 杜文立. 1979. 信阳球粒陨石初步研究. *地质科学*, (3) : 270–275

(本文责任编辑: 刘莹; 英文审校: 张兴春)