

## 空间风化对 C 型小行星的光谱影响研究概述\*

周婷<sup>1,2</sup> 唐红<sup>2,3</sup> 缪秉魁<sup>1,4</sup> 曾小家<sup>2</sup>  
夏志鹏<sup>1,4</sup> 于雯<sup>2</sup> 周传娇<sup>2</sup> 贺恩成<sup>1,2</sup>

1(桂林理工大学陨石与行星物质研究中心 行星地质演化广西高校重点实验室 桂林 541006)

2(中国科学院地球化学研究所 贵阳 550081)

3(中国科学院比较行星学卓越创新中心 合肥 230026)

4(桂林理工大学 广西隐伏金属矿产勘查重点实验室 桂林 541006)

**摘要** C型小行星主要由硅酸盐矿物和含碳有机质组成,保存了太阳系形成初期的原始物质,是认识太阳系形成初期的重要物质,对研究水和生命起源与演化具有重要科学意义。目前对小行星物质组成的认识主要基于光谱特征分析,但长期的空间风化作用会改变小行星表面物质的光谱特征,所以认识小行星的物质组成需要准确厘清空间风化对光谱的影响。随着中国小行星探测工程的推进,迫切需要深入认识C型小行星的光谱特征及对空间风化的响应规律。为此,分析了C型小行星的反射率、水和有机质吸收等光谱特征以及空间风化的影响,提出研究存在的主要问题,进而指出了该研究方向的未来发展趋势和研究重点。

**关键词** C型小行星,光谱,碳质球粒陨石,空间风化

**中图分类号** P185.7

## Review of the Spectral Effects of Space Weathering on C-type Asteroids

ZHOU Ting<sup>1,2</sup> TANG Hong<sup>2,3</sup> MIAO Bingkui<sup>1,4</sup> ZENG Xiaojia<sup>2</sup>  
XIA Zhipeng<sup>1,4</sup> YU Wen<sup>2</sup> ZHOU Chuanjiao<sup>2</sup> HE Encheng<sup>1,2</sup>

1(Institution of Meteorites and Planetary Materials Research, Key Laboratory of Planetary Geological Evolution of Guangxi Provincial Universities, Guilin University of Technology, Guilin 541006)

2(Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081)

3(Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230026)

\* 中国科学院空间科学战略性先导科技专项项目(XDB 41000000),国家自然科学基金项目(41173077, 41776196, 42203048),中国科学院青年创新促进会项目(2018435),广西科技基地与人才建设专项项目(AD1850007)和桂林理工大学创新创业项目(202210596152)共同资助

2022-10-09 收到原稿, 2023-06-25 收到修定稿

E-mail: zhout5075@163.com. 通信作者 E-mail: tanghong@vip.gyig.ac.cn; miaobk@glut.edu.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

4(Guangxi Key Laboratory of Exploration for Hidden Metallic Ore Deposits, Guilin University of Technology, Guilin 541006)

**Abstract** C-type asteroids are mainly composed of silicates and carbon-rich organic matter, which preserve the original materials of the early formation of solar system. They are important clues to understand the early formation of the solar system, and have important scientific significance for revealing the origin and evolution of water and life. At present, the understanding of the composition characteristics of asteroids is mainly based on spectral characteristics analysis. However, the long-term space weathering will change the spectral characteristics, so the understanding of the composition of asteroids needs to accurately clarify the effects of space weathering on the spectra. With the advancement of the asteroid exploration in China, it is necessary to understand the spectral characteristics and variation rules of C-type asteroids. This paper summarizes the spectral characteristics of C-type asteroids (*e.g.*, the reflectance spectra, absorption of water and organic matter) and the influence of space weathering on C-type asteroid, analyzes the main problems existing in the research, and points out the future development trend and research focus of this research direction.

**Key words** C-type asteroids, Spectra, Carbonaceous chondrites, Space weathering

## 0 引言

C型小行星主要由硅酸盐矿物和含碳有机质组成,保存了行星早期演化痕迹和太阳星云演化初期物质的原始信息,是研究行星形成及演化历史过程的重要物质<sup>[1]</sup>。但由于C型小行星表面没有类似地球的浓密大气和全球偶极磁场保护,长期遭受空间风化过程,例如太阳风作用、宇宙空间高能粒子以及(微)陨石轰击等的改造,使其表面物质特性发生变化,以致在轨和地基遥感探测光谱与碳质球粒陨石光谱特征的匹配存在差异,限制了遥感光谱数据的地面样品验证及小行星物质组成的准确解译。

目前,光谱遥感探测是认识C型小行星的主要手段。光谱特征是识别C型小行星的重要判别依据。从最早基于Zellner等<sup>[2]</sup>8色小行星光谱调查结果由Tholen提出将小行星分为A, B, C, D, E, F, G, M, P, Q, R, S, T, V型共14种类型<sup>[3]</sup>,到Bus等<sup>[4]</sup>基于1341个主带小行星的可见光波段(0.435~0.925  $\mu\text{m}$ )光谱提出的Bus分类法,再到DeMeo等<sup>[5]</sup>提出的Bus-Demeo分类法,均以小行星的光谱特征作为识别C型小行星的依据。光谱特征是准确解译C型小行星物质组成的重要信息。碳质球粒陨石通常被认为是C型小行星的碎片,其光谱特征也通常被作为小行星遥感光谱数据解译的参照<sup>[6]</sup>。通过遥感光谱与碳质球粒陨石的光谱匹配可以更好地认识C型小行星

的物质组成。Gaffey等<sup>[7]</sup>通过将25个C型小行星光谱与低反射碳质球粒陨石进行光谱对比分析,发现0.7  $\mu\text{m}$ 处的吸收特征与碳质球粒陨石中含 $\text{Fe}^{3+}$ 水合矿物特征相匹配,揭示了C型小行星表面存在含 $\text{Fe}^{3+}$ 水合矿物。C型小行星具有与CM/CI球粒陨石光谱相似的2.7  $\mu\text{m}$ 处OH吸收特征,表明其富含层状硅酸盐矿物<sup>[8,9]</sup>。近年来,对24 Themis和Ryugu等C型小行星光谱分析还发现了类似于Murchison陨石反射光谱3.4 $\mu\text{m}$ 处脂肪族CH拉伸振动造成的有机质的吸收特征<sup>[10,11]</sup>。

但是由于长期的宇宙空间暴露,C型小行星通常经历了(微)陨石轰击和空间高能粒子作用等空间风化改造,使其表面物质在结构物性、矿物组成以及化学成分上都发生了变化,进而改变其光谱特征<sup>[12]</sup>。研究表明<sup>[13]</sup>,C型小行星含有丰富的层状硅酸盐,在空间风化过程中由于水的参与,含铁硅酸盐通常被改造成成为纳米磁铁矿,导致光谱变蓝。这与S型小行星的空间风化改造效应存在显著差异。同时,遥感光谱探测数据由于其穿透能力有限,往往反映的是被改造后C型小行星表面物质特性<sup>[14,15]</sup>,无法直接反映其母体基岩原始信息。因此,明确C型小行星表面物质的空间风化改造特征极为重要。

随着深空探测的发展,小行星探测已有30多年历程,对小行星的探测任务的展开越来越广泛和深入。目前已对15颗小行星进行了飞行器探测任务,

并且已经开展了对 S 型、B 型和 C 型小行星采样返回任务,其中日本和美国开展了对 Ryugu<sup>[11]</sup> 和 Bennu<sup>[16]</sup> 小行星的采样返回任务,其共同的探测任务科学目标是:(1)返回原始小行星的样品并进行实验室分析;(2)分析表面的化学元素和矿物成分,确定小行星的演化历史;(3)将小行星的光谱类型与陨石联系起来;(4)研究太阳系形成和演化问题,以及地球上水和有机物的来源。2019 年中国发布了《小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告》<sup>[17]</sup>,小行星返回样品探测计划在不断推进,其研究目标主要围绕揭示太阳系小行星特征和演化机理、探索太阳系形成早期的物质和生命起源以及认识太阳风与小行星的相互作用过程。中国天问 2 号计划于 2025 年对 2016 HO<sub>3</sub> 小行星进行探测取样返回任务。其工程探测科学目标也指出需要测定 2016 HO<sub>3</sub> 小行星样品的物理化学性质、矿物成分、结构构造和同位素组成;加强 2016 HO<sub>3</sub> 小行星与陨石比较研究,建立返回样品与陨石、地面观测与遥感就位分析数据之间的联系。Sharkey 等<sup>[18]</sup> 通过大型双筒望远镜(LBT)和洛厄尔发现望远镜(LDT)对 2016 HO<sub>3</sub> 小行星进行可见-近红外反射光谱测量分析,认为其是一颗具有类似于阿波罗高地样品光谱特征的 S 型小行星。但目前还没有确凿证据表明 2016 HO<sub>3</sub> 小行星的起源,所以加强小行星与陨石的联系十分迫切。C 型小行星被认为是太阳系中富含水和有机物的原始小型天体,其变质程度低且容易保存行星早期演化痕迹和太阳星云形成初期物质的原始信息,是了解太阳系行星演化的历史过程和地球水和有机物来源的最好的探测目标。但是,无论是探测前的小行星类型判别,还是探测后小行星的物质组成的深入认识,都主要依赖遥感光谱的准确解译。对空间风化对 C 型小行星光谱改造效应的认识不足严重制约了上述问题的深入探讨。因此,深入认识空间风化对 C 型小行星的光谱改造作用对中国小行星探测任务的目标选择、光谱探测数据解译具有重要意义。

## 1 C 型小行星主要光谱特征

### 1.1 反照率特征

C 型小行星具有较低反照率,通常小于 0.1。Morrison 等<sup>[19]</sup> 通过红外辐射测量法测量了 10 Hygiea, 324 Bamberga 和 511 Davida 三颗 C 型小行星

的反照率,发现其反照率比较低,最低仅有 0.03。为进一步确认 C 型小行星的低反照率特征,Chapman 等<sup>[20]</sup> 利用光度分析法、偏振测量法和辐照测量法等不同方法测量了 10 Hygiea 和 51 Nemausa 等 5 颗 C 型小行星的反照率,也证实了反照率最低的 324 Bamberga 小行星的反照率仅为 0.036。随后,利用红外天文卫星探测到更多 C 型小行星,包括 10 Hygiea、41 Daphne 和 51 Nemausa 等 18 颗,其反照率平均值约为 0.0554<sup>[21]</sup>。20 世纪末, Tedesco 等<sup>[22]</sup> 开展 IRAS 小行星调查,共获取 23 颗 C 型小行星的反照率,其平均值为 0.0617。Tedesco 等<sup>[23]</sup> 对 IRAS 小行星调查结果进行了补充和修订,得到这些 C 型小行星的平均反照率为 0.0582。近年, Masiero 等<sup>[24]</sup> 通过广域红外探测器测量再次对上述调查结果进行了补充和修订。根据已有的测量结果,C 型小行星往往具有较低的反照率,其平均值约为 0.06(见表 1)。

### 1.2 含水矿物的吸收特征

C 型小行星通常富含水,存在多种水合矿物,因此在可见-红外波段表现出显著的含水矿物吸收特征。不同小行星由于环境条件差异,其水的赋存方式也不尽相同。水的主要赋存方式为:一是自由水形式,以液态、固态、气态和等离子态 4 种相存在;二是主要以结合水或者羟基水(主要包括吸附水、结晶水、层间水、沸石水和结构水)的形式存在于矿物中。目前研究中表明小行星水主要以水冰和 OH 形式存在<sup>[10, 28, 29]</sup>。利用光谱的吸收特征可以很有效地判别出水赋存的形式。Lebofsky 等<sup>[30]</sup> 对 31 Euphrosyne, 70 Panopaea 和 324 Bamberga 等 7 颗 C 型小行星进行了光谱观测,结果发现 C 型小行星存在 3 μm 的含水吸收特征。除了与自由水相关的 3.0 μm 吸收特征之外, Barucci 等<sup>[31-34]</sup> 在对 10 Hygiea 小行星进行反射光谱(0.3~2.5 μm)观测中还发现 0.7 μm 吸收特征,推测是水合矿物所致(见图 1)<sup>[35]</sup>。Vilas 等<sup>[33, 35]</sup> 通过基于八色小行星巡天光度法预测太阳系天体表面物质中是否存在水合作用,在低反照率小行星中,利用红外光度法和窄带分光光度法观测到 3.0 μm 处水合作用吸收特征与 0.7 μm 处 Fe<sup>2+</sup>→Fe<sup>3+</sup> 的电荷转移跃迁吸收特征密切相关,表明小行星表面可能存在富铁水合矿物。随后 Hiroi 等<sup>[36]</sup> 将 10 Hygiea, 24 Themis 和 31 Euphrosyne 等 12 颗 C 型小行星与加热 Murchison 陨石样品的反射光谱吸收强度对比分析,实验结果得到当加热<400℃,主要富层状

表 1 C 型小行星相关物理特征参数  
Table 1 Physical characteristic parameters of C-type asteroids

小行星	Tholen, Bus, DeMeo分类	反照率					
		Ref. [19]	Ref. [20]	Ref. [21]	Ref. [22]	Ref. [23]	Ref. [24]
10 Hygiea	C, C, C	0.06	0.054	0.075	0.0717	0.0710	0.0579
24 Themis	C, B, C	—	—	—	—	—	0.0641
41 Daphne	C, Ch, Ch	—	—	0.073	0.0828	0.0828	—
51 Nemausa	C, Ch, Cgh	—	0.060	0.086	0.0928	0.0928	0.0997
52 Europa	CF, C, C	—	—	0.057	0.0578	0.0578	0.0472
54 Alexandra	C, C, Cgh	—	—	0.050	0.0555	0.0555	0.0492
76 Freia	P, X, C	—	—	0.029	0.0362	0.0362	0.0486
85 Io	FC, B, C	—	—	0.068	0.0666	0.0666	0.0630
90 Antiope	C, C, C	—	—	0.051	0.0603	0.0603	0.0569
93 Minerva	CU, C, C	—	—	0.085	0.0881	0.0733	—
128 Nemesis	C, C, C	—	—	0.045	0.0504	0.0504	0.0504
147 Protogeneia	C, C, C	—	—	0.029	0.0492	0.0492	—
171 Ophelia	C, C, —	—	—	0.054	0.0615	0.0615	0.0773
316 Goberta	-, C, —	—	—	—	0.0925	0.0925	0.0588
324 Bamberga	-, C, —	0.03	0.036	—	0.0628	0.0628	0.0063
379 Huenna	B, C, —	—	—	0.045	0.0587	0.0587	0.0654
410 Chloris	C, Ch, —	—	—	0.054	0.0554	0.0554	0.0432
444 Gyptis	C, C, C	—	—	0.044	0.0512	0.0490	0.0428
511 Davida	C, C, —	0.06	0.060	0.053	0.0540	0.0540	0.0681
654 Zelinida	C, Ch, —	—	—	0.043	0.0425	0.0425	0.0428
688 Melanie	-, C, C	—	0.040	—	0.0599	0.0599	0.5330
702 Alauda	C, B, —	—	—	0.056	0.0587	0.0587	0.0545
814 Tauris	C, C, —	—	—	—	0.0499	0.0470	0.0444

注 小行星分类引自文献[25-27]。

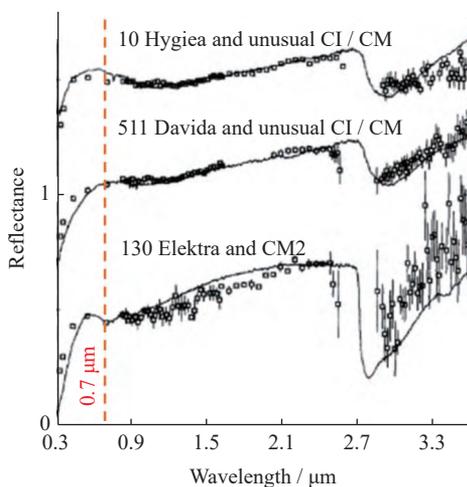


图 1 C 型小行星 0.7  $\mu\text{m}$  处光谱特征  
Fig. 1 0.7  $\mu\text{m}$  spectral characteristics of a C-type asteroid

硅酸盐, 0.7  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  光谱吸收特征同时存在; 持续加热到 400~600 $^{\circ}\text{C}$  时, 0.7  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  光谱吸收特征逐渐减弱, 层状硅酸盐逐渐转变为无水硅酸盐;

加热超过 600  $^{\circ}\text{C}$  时, 层状硅酸盐脱水转化为橄榄石和辉石, 0.7  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  光谱吸收特征基本消失, 几乎不存在水(见表 2)<sup>[36]</sup>。Fornasier 等<sup>[37]</sup> 利用可见-红外光谱对 600 颗主带原始小行星的含水蚀变进行分析, 研究得到 65% 的 C 型小行星显示出明确的含水矿物蚀变特征。光谱中 0.7  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  含水吸收特征的相关性分析表明 95% 的小行星含有 0.7  $\mu\text{m}$  吸收特征的同时也会伴有出现 3  $\mu\text{m}$  的吸收特征, 但是 0.7  $\mu\text{m}$  吸收特征总比 3  $\mu\text{m}$  吸收特征弱, 0.7  $\mu\text{m}$  波段容易被其他因素消除, 例如信噪比较差、经历加热蚀变等影响, 所以出现 3  $\mu\text{m}$  吸收特征的小行星不一定显示 0.7  $\mu\text{m}$  吸收特征。因此, 将 0.7  $\mu\text{m}$  与 3  $\mu\text{m}$  吸收特征整合归纳在一起, 都具有与水合作用相关的含水矿物。

Campins 等<sup>[10]</sup> 利用美国宇航局的 3 m 口径红外望远镜观测 24 Themis C 型小行星, 发现在 3  $\mu\text{m}$  处具有显著的吸收特征, 再次证实了 C 型小行星富含水冰。为了进一步探讨 C 型小行星上水的存在形式, Takir 等<sup>[38]</sup> 根据 3  $\mu\text{m}$  处的吸收光谱的形状和中心位

表 2 C 型小行星和 Murchison 陨石的 0.7  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  吸收强度  
Table 2 0.7  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$  absorption strengths of the C-type asteroids and Murchison meteorites

小行星	0.7 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$	Murchison 陨石/ $^{\circ}\text{C}$	0.7 $\mu\text{m}$	3 $\mu\text{m}$
10 Hygiea	0.0023	-0.2502	400	0.0507	-0.3070
24 Themis	0.0055	-0.0498	500	0.0457	-0.2200
31 Euphrosyne	0.0061	-0.0007	600	0.0124	-0.0275
36 Atalante	0.0147	-0.1508	700	0.0194	0.0194
51 Nemausa	-0.0326	-0.4950	800	0.0064	0.0359
52 Europa	-0.0010	0.0305	900	0.0524	0.0524
173 Ino	0.0028	-0.0094	1000	0.0233	0.0233
313 Chaldaea	-0.1612	-0.0414	—	—	—
344 Desiderata	0.0153	-0.1985	—	—	—
386 Siegena	-0.0349	-0.2614	—	—	—
410 Chloris	-0.0093	-0.2744	—	—	—
511 Davida	0.0116	-0.1010	—	—	—

注 吸收强度计算。0.7  $\mu\text{m}$ :  $\ln R_{(0.701)} - [0.152 \ln R_{(0.550)} + 0.151 \ln R_{(0.853)}] / 0.303$ 。3  $\mu\text{m}$ :  $\ln R_{(2.9 \sim 3.0)} - \ln R_{(2.3 \sim 2.5)}$ 。

置将 C 型小行星分为 Sharp 组、Ceres-like 组、Europa-like 组和 Rounded 组 (见图 2)<sup>[38]</sup>。其中 511 Davida, 334 Chicago, 104 Klymene 和 54 Alexandra 小行星属于 Sharp 组, 其光谱特征归因于水合矿物的影响; 10 Hygiea 和 324 Bambergia 小行星属于 Ceres-like 组, 3  $\mu\text{m}$  处光谱特征是由于含有水冰以及富  $\text{NH}_4$ -层状硅酸盐造成; 76 Freia 和 107 Camilla 小行星属于 Rounded 组, 其光谱特征与冰霜包裹着辉石及无定形碳混合物光谱匹配, 表明小行星表面存在冰霜; 52 Europa 和 31 Euphrosyne 小行星则属于 Europa-like 组, 其具有较宽和较深的 3  $\mu\text{m}$  特征。日本的 Hayabusa2 探测任务中, 光学导航相机望远镜 (ONC-T) 就位测得了 Ryugu 小行星表面的反射光谱, 也发现其具有 0.7  $\mu\text{m}$  处的含水矿物光谱特征和 2.7  $\mu\text{m}$  处矿物结构水 (OH) 的光谱特征<sup>[39, 40]</sup>。近期, Germann 等<sup>[41]</sup> 分析了 13 Egeria, 19 Fortuna 和 130 Elektra 等 4 颗小行星可见光-近红外光谱, 也指出具有 0.7  $\mu\text{m}$  特征的小行星存在多种可能与水合矿物有关的特征, 在几乎所有具有水合特征的小行星上测量到的 0.70 和 0.95  $\mu\text{m}$  特征都表明存在富铁羟基或含水矿物, 又进一步表明 0.7  $\mu\text{m}$  特征的存在可以指示小行星表面含有高浓度的水合矿物。

综上所述, 通过光谱分析发现 C 型小行星在 0.6~0.9  $\mu\text{m}$  和 2.5~3.5  $\mu\text{m}$  区域显示水吸收特征, 并且 0.7  $\mu\text{m}$  和 3.0  $\mu\text{m}$  处被认为是小行星水合作用最显著的区域<sup>[42-44]</sup>。

### 1.3 有机物的吸收特征

C 型小行星通常还富含有机质。Cruikshank 和

Brown<sup>[45]</sup> 首次利用红外光谱发现了小行星 130 Elektra 存在 3.4  $\mu\text{m}$  的吸收特征, 认为是由于 C-H 有机物造成, 推测小行星表面存在有机物。随后 Rivkin 等<sup>[46]</sup> 为了进一步了解 C 型小行星有机质的存在类型和特征分布, 对小行星 24 Themis 进行光谱探测, 在 3.3  $\mu\text{m}$  处发现了由多环芳香烃导致的吸收特征, 而在 3.4~3.5  $\mu\text{m}$  波段还存在可能是由于 -CH<sub>2</sub> 和 -CH<sub>3</sub> 中 C-H 拉伸振动造成的吸收特征。同时, Campins 等<sup>[10]</sup> 也对 24 Themis 进行近红外光谱观测, 发现其在自转过程中 3.1  $\mu\text{m}$  和 3.3~3.6  $\mu\text{m}$  波段的光谱形状和深度保持不变, 表明小行星表面广泛分布着水冰和有机物。近年, Rivkin 等<sup>[47]</sup> 也指出小行星 324 Bambergia 在 3.2  $\mu\text{m}$  附近的光谱与 67 P 彗星光谱相似, 其吸收特征可能是由多种物质造成, 推测存在芳香族 C-H、-COOH 基团、OH 基团和 NH-基团的光谱吸收特征的影响。

最近, 日本 Hayabusa 2 探测任务实现了对 C 型小行星 Ryugu 的原位取样返回。Yada 等<sup>[1, 48]</sup> 根据红外光谱分析返回样品发现, 其存在有机分子 C-H 键伸缩振动造成的 3.4  $\mu\text{m}$  吸收特征以及 N-H 引起的 3.1  $\mu\text{m}$  吸收特征 (见图 3)<sup>[48]</sup>; 气相/液相色谱和高分辨质谱分析也表明, Ryugu 中有机物种类丰富, 含有 20 种氨基酸, 包括  $\alpha$ -,  $\beta$ -,  $\gamma$ -,  $\delta$ -氨基酸<sup>[49, 50]</sup>。对 Ryugu 小行星 A0080 样品进行甲醇喷雾解吸电喷雾电离高分辨质谱成像技术分析更是获取了 200 多种可溶性有机化合物, 其分子组成主要为 CHN, CHO, CHO-Na 和 CHNO<sup>[51]</sup>。上述研究均表明, C 型小行星

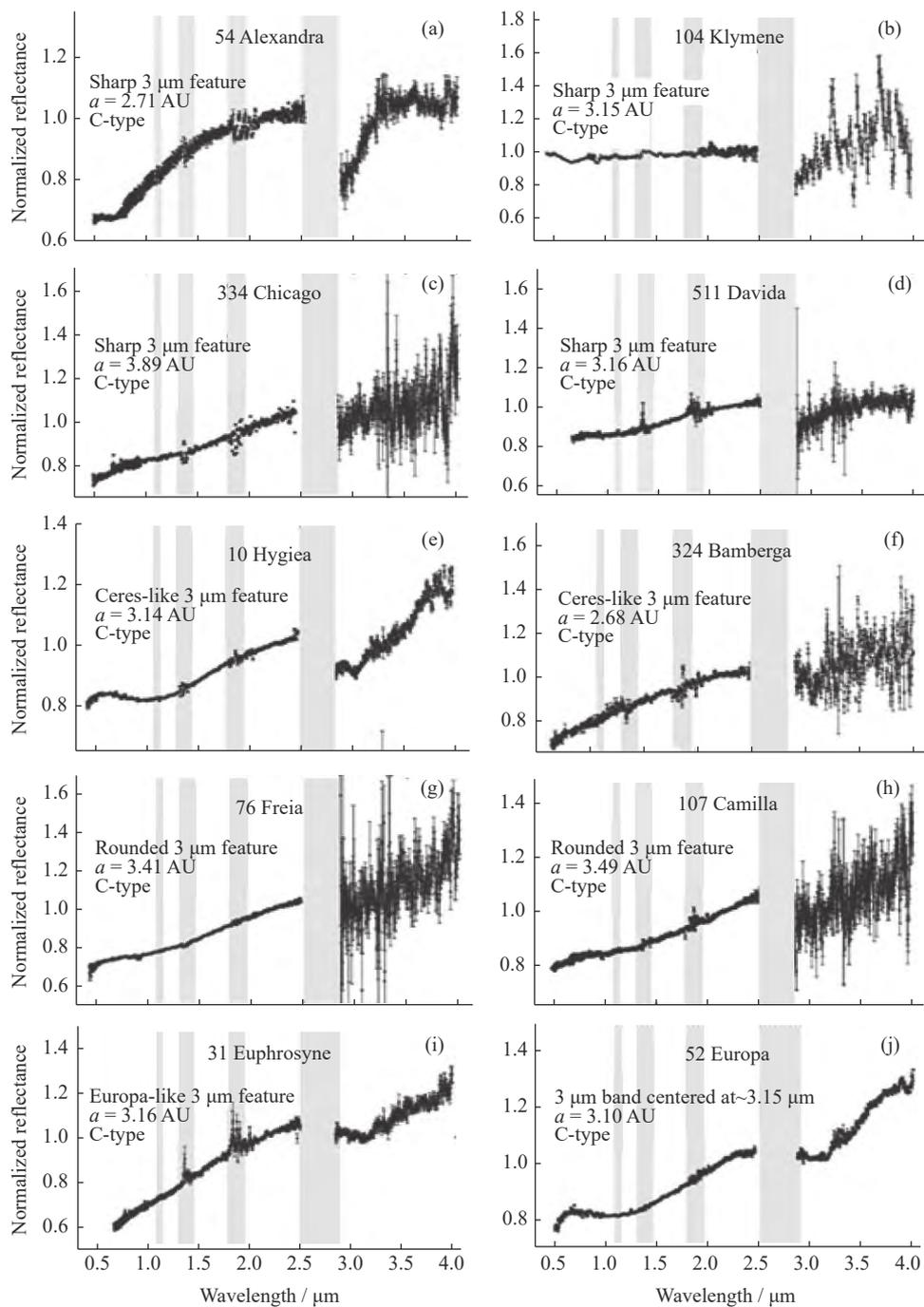


图2 C型小行星3 μm处光谱特征

Fig. 2 3 μm spectral characteristics of a C-type asteroid

富含有机质,在红外波段的3.1和3.4 μm处通常呈现显著吸收特征。

C型小行星由于自身物质组成特点决定了其具有较低的反射率,且通常呈现显著的水和水合矿物以及有机物的吸收特征。但在经历了长期的空间暴露后,空间风化改造往往会导致光谱特征的变化。因此,明确空间风化对C型小行星的光谱改造效应是准

确识别C型小行星和反演其母体物质组成的关键。

## 2 空间风化的影响

空间风化是指无大气行星体在太空环境作用下,其表面物质的物理性质、化学组成、矿物性质、光谱特征的一种改造过程,其主要驱动力是微陨石的轰击

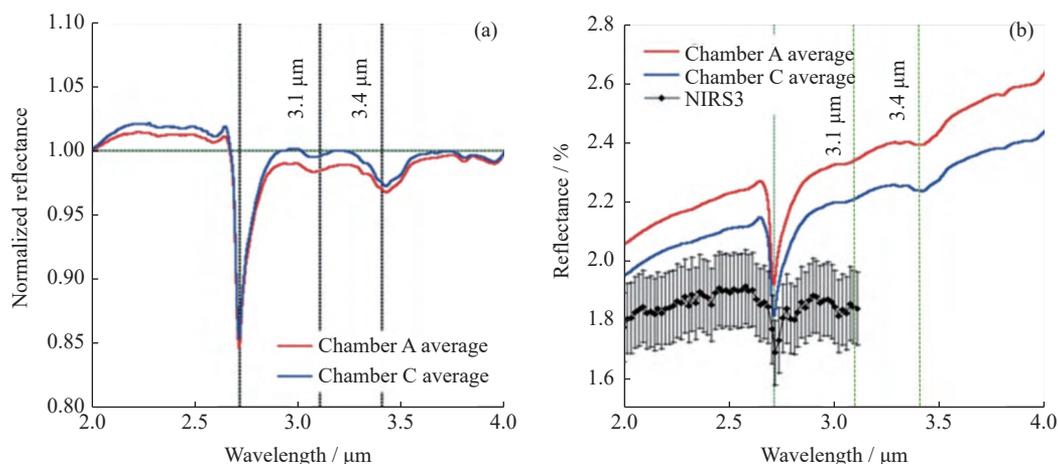


图 3 Ryugu 返回样品的红外反射光谱

Fig. 3 Infrared reflectance spectra of Ryugu returned samples

和太阳风的作用<sup>[12]</sup>。C 型小行星由于长期暴露,其表面物质将具有明显的空间风化改造特征,也将导致光谱特征的改变。2019 年, Hendrix 等<sup>[15]</sup>通过国际紫外线探测器(IUE)和哈勃太空望远镜对 3 颗 C 型小行星 10 Hygiea, 324 Bamberga 和 511 Davida 进行探测,发现空间风化会产生不透明组分,随着不透明物质含量增加导致光谱变暗反射率降低。Rivkin 等<sup>[47]</sup>也认为 C 型小行星反射率降低是空间风化导致表面产生不透明物质(石墨碳化)造成的。Matsuoka 等<sup>[9]</sup>则发现反射率还受到物质表面的性质和状态的影响,Ryugu 小行星反射率低与其含碳物质和表面物理性质(孔隙率及粒度大小)密切相关,可能受到了空间风化改造的重要影响。

由于小行星采样返回的样品有限,C 型小行星空间风化改造的光谱效应研究目前仍然主要集中在利用碳质球粒陨石开展地面实验模拟研究方面。

## 2.1 太阳风作用的影响

太阳风辐照对 C 型小行星表面物质的改造是空间风化的重要过程之一,其改变物质的微观结构和化学性质,从而改变宏观光谱特征。太阳风作用对 C 型小行星的改造机理复杂,可同时使矿物非晶化、有机物碳化等,也可以形成金属、简单有机物、水等,以致光谱变化也有多种可能性。

### 2.1.1 太阳风作用改变光谱反射率

Moroz 等<sup>[52]</sup>通过对天然沥青进行离子辐照实验发现,由于太阳风使有机质碳化导致光谱反射率增大。但是 Brunetto 等<sup>[53]</sup>对 Allende 陨石进行离子辐照实验,发现太阳风作用会导致光谱反射率降低。为

了将 C 型小行星与更多碳质球粒陨石联系起来,Lantz 等<sup>[54]</sup>使用不同类型的碳质球粒陨石 Allende, FM95002, Lancé, Mighei, Alais 和 Tagish Lake 进行 He<sup>+</sup>离子辐照实验,模拟太阳风对 C 型小行星表面物质的改造过程,发现 Allende, Lancé和 FM 95002 陨石在辐照前后光谱形状相似:光谱整体变红,辐照后光谱反射率降低;而 Mighei, Alais 和 Tagish Lake 陨石辐照后光谱呈现变蓝和反射率升高的趋势。实验结果表明,太阳风对不同碳质球粒陨石的光谱影响不同。Nakamura 等<sup>[55]</sup>对 CI 碳质球粒陨石进行 He<sup>+</sup>离子辐照实验,粉末样品经辐照后光谱变亮和变蓝;而薄片样品显示出稍微变红的光谱,意味着太阳风作用于不同物理状态的碳质球粒陨石,其光谱变化也不尽相同。究其原因,太阳风辐照过程除了使有机组分碳化之外,还有其他组分的改变,从而影响光谱特征的变化。Lagerkvist<sup>[56]</sup>等研究发现 C 型小行星光谱变暗和反射率降低与太阳风作用使其表面不透明相和碳质发生相变有关。此外,Loeffler 等<sup>[57]</sup>根据对橄榄石进行 4 keV He<sup>+</sup>离子辐照实验认为太阳风作用导致金属铁的生成也能显著改变反射率。Keller 等<sup>[58]</sup>在对 Murchison 陨石进行离子辐照实验中也发现了太阳风作用可以使层状硅酸盐发生非晶化,甚至形成气泡和孔洞,以及在非晶层中形成富铁纳米相包裹体,从而导致反射率降低。Lantz 等<sup>[59]</sup>实验还发现 2.7 和 10 μm 附近的层状硅酸盐和橄榄石带中 Mg 的优先溅射和/或富 Mg 物质的非晶化导致光谱向富铁光谱方向移动。Laczniak 等<sup>[60]</sup>对 Murchison 陨石进行 H<sup>+</sup>和 He<sup>+</sup>离子注入的最新实验结果表明,He<sup>+</sup>和

H<sup>+</sup>辐照后光谱变红和吸收特征减弱可能是由层状硅酸盐分解、Fe<sup>3+</sup>和 Fe<sup>2+</sup>部分化学还原以及矿物非晶化引起的。

### 2.1.2 太阳风作用改变水的吸收特征

Lantz 等<sup>[59]</sup>采用 He<sup>+</sup>离子注入碳质球粒陨石模拟太阳风改造过程,发现在 NIR-MIR 光谱范围内,2.4~3.3 μm 范围内以水合矿物光谱特征为主,8~16 μm 范围内以硅酸盐的光谱特征为主。如图 4 所示<sup>[54]</sup>,未辐照的 Mighei, Alais 和 Tagish Lake 碳质球粒陨石在 2.71 μm 处存在与富镁层状硅酸盐(OH 拉伸)和吸附/层间分子水作用有关的吸收特征,其辐照后光谱吸收特征红移量分别为 90 nm, 70 nm 和 60 nm。在中红外光谱中,离子辐照对层状硅酸盐光谱特征改造更明显,辐照后 Mighei, Alais 和 Tagish Lake 碳质球粒陨石在 10 μm 附近的层状硅酸盐特征光谱吸收特征红移量分别为 610 nm, 290 nm 和 390 nm(见 图 5)<sup>[54]</sup>。Brunetto 等<sup>[61]</sup>对 Allende 和 Murchison 碳质球粒陨石的模拟实验研究也证实太阳风作用使无水和水合硅酸盐发生非晶化,导致光谱吸收特征产生位移,而且无水硅酸盐的光谱位移大于水合硅酸盐。相反地,Nakauchi 等<sup>[62]</sup>利用蛇纹石和皂石样品研究 H<sup>+</sup>辐照导致的含水硅酸盐矿物光谱变化,发现辐照后 H<sup>+</sup>和含水硅酸盐矿物发生反应形成 H<sub>2</sub>O 和 Si-OH 自由基,导致 3 μm 附近光谱特征变化。但 H<sup>+</sup>辐照没有改变 0.7 μm 和 2.3 μm 附近光谱特征,这表明 H<sup>+</sup>辐照破坏了含水硅酸盐矿物结构中四面体内的 Si-O-Si 键,但没有破坏八面体的金属-OH 键,所以太阳风辐照也能在无水硅酸盐矿物上形成 H<sub>2</sub>O。因此,H<sup>+</sup>辐照可以使含水硅酸盐矿物和无水硅酸盐矿物上形成 H<sub>2</sub>O,增强其光谱吸收特征。

### 2.1.3 太阳风作用改变有机物的吸收特征

Moroz 等<sup>[52]</sup>对天然沥青进行离子辐照实验,结果表明太阳风使有机质碳化(氢的损失和碳结构变化)导致样品表面变亮和光谱变蓝。Lantz 等<sup>[59]</sup>对 Murchison 陨石进行离子辐照实验,拉曼光谱表明辐照下不溶性有机物(IOM)的改性导致光谱改变。Laczniak 等<sup>[60]</sup>通过 XPS 分析得到太阳风作用会导致 Murchison 样品最上部约 10 nm 厚度的表面碳含量显著减少,以及 μL<sup>2</sup>MS 分析发现 He<sup>+</sup>辐照降低了本体有机物总含量,而 H<sup>+</sup>辐照增加了一些低分子量游离有机物种的丰度。Orthous-Daunay 等<sup>[63]</sup>对 Ryugu

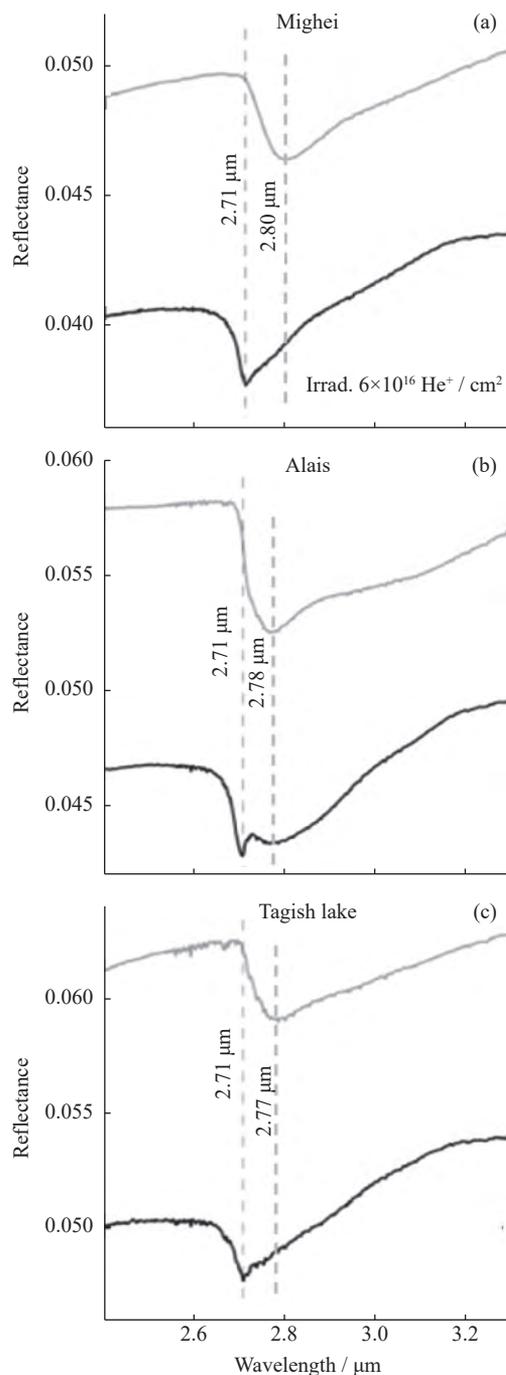
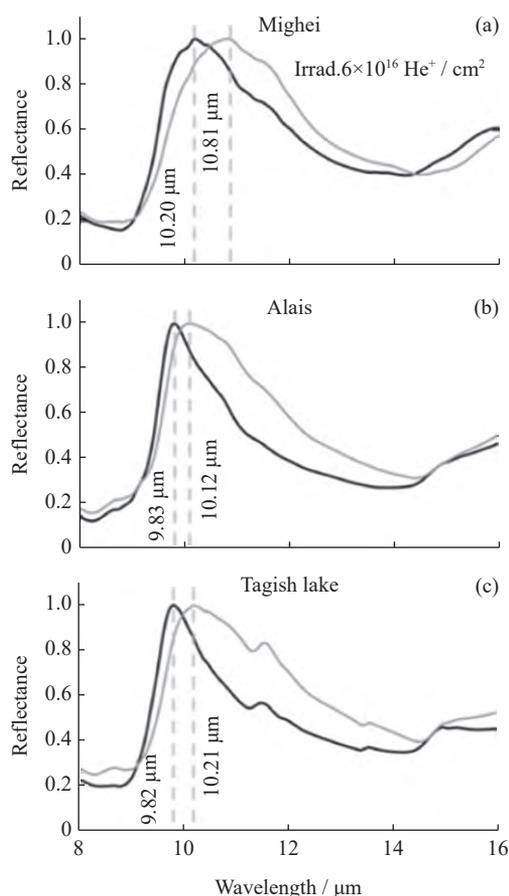


图 4 He<sup>+</sup>辐照碳质球粒陨石近红外反射光谱

Fig. 4 NIR spectra of He<sup>+</sup> irradiated carbonaceous chondrites

小行星采样返回样品 A0106 分析获得其可溶性 CHN 大分子化合物比碳质球粒陨石具有更高的饱和度,与可能发生在小行星表面的太阳风辐照或重离子轰击更复杂的环境影响有关。Remusat 等<sup>[64]</sup>对 Ryugu 返回样品不溶性有机质的 H 同位素分析发现空间风化作用会降低有机质的 D/H 比值。

图 5  $\text{He}^+$  辐照碳质球粒陨石中红外反射光谱Fig. 5 MIR spectra of  $\text{He}^+$  irradiated carbonaceous chondrites

## 2.2 微陨石轰击的影响

微陨石轰击是改变 C 型小行星表面光学性质的重要空间风化过程,其可以改变物质的化学成分、矿物组成、微观结构以及形貌特征,从而改变宏观光谱特征。以往研究表明,微陨石轰击对 C 型小行星的改造也是复杂多样的,与撞击过程及小行星母体物质组成密切相关。改造过程的复杂性和产物的多样性也使光谱特征具有多种变化的可能性。

### 2.2.1 微陨石轰击导致光谱反射率降低

Matsuoka 等<sup>[65]</sup> 利用 Murchison 陨石进行脉冲激光辐照实验模拟 C 型小行星空间风化改造作用,通过对改造后样品微观结构和光谱分析发现微陨石轰击作用可以使层状硅酸盐非晶化和富 Fe-S 熔融物沉积,导致光谱反射率降低;随着激光能量的增加,反射光谱变得更暗和更蓝。同时, Gillis-Davis 等<sup>[66]</sup> 对 Murchison 和 Allende 两种碳质球粒陨石和石墨进行激光轰击实验,发现样品表面反射率在轰击后普遍低

于轰击前。Matsuoka 等<sup>[67]</sup> 用 0.7~5 mJ 脉冲激光辐照 Murchison 样品,发现蛇纹石非晶化以及激光加热产生的富 FeS 颗粒的沉积可能是光谱发蓝和变暗的主要原因。Gillis-Davis 等<sup>[68]</sup> 对另一块碳质球粒陨石 NWA 3118 进行激光轰击实验,在进行了 48000 次轰击后样品光谱在 0.55 nm 处的反射率从 0.12 下降到 0.06,证实了微陨石轰击可以使光谱反射率降低。Matsuoka 等<sup>[69]</sup> 对 Murchison 碳质球粒陨石粉末样品的低能脉冲激光辐照实验也证实了辐照后样品的紫外-可见-近红外光谱变蓝和变暗。基于微陨石轰击实验推测, C 型小行星光谱变暗可能与蛇纹石和羟基硫化物的非晶化、细粒无定形硅酸盐在富含硫和铁的区域发生熔融并产生富 FeS 颗粒有关。

### 2.2.2 微陨石轰击影响水的吸收特征变化

Moroz 等<sup>[70]</sup> 对 Mighei 碳质球粒陨石粉末样品进行脉冲激光辐照实验发现,辐照后与水合矿物相关的吸收特征(2.7~3  $\mu\text{m}$ )显著减弱,指示微陨石轰击可能会导致小行星表面物质脱水。Matsuoka 等<sup>[65]</sup> 对 Murchison 陨石的脉冲激光辐照实验也发现,辐照使层状硅酸盐脱水,导致 0.7  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  的吸收特征减弱。Thompson 等<sup>[71]</sup> 采用 Murchison 陨石薄片样品进行脉冲激光辐照实验,发现层状硅酸盐分解及  $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$  的电荷转移导致 0.7  $\mu\text{m}$  含水矿物吸收特征产生变化。随着能量增加到 5 mJ 后层状硅酸盐产生脱水分解,吸收特征也同样出现减弱的特征。Matsuoka 等<sup>[69]</sup> 对 Murchison 碳质球粒陨石粉末样品的低能脉冲激光辐照实验也同样发现了这一现象。但是, Prince 等<sup>[72]</sup> 对 CI 和 CM 碳质球粒陨石进行脉冲激光实验模拟微陨石轰击,却发现激光辐照使 3  $\mu\text{m}$  处吸收特征深度增加了 30%,但整个吸收特征的形状没有改变,2.72  $\mu\text{m}$  处最小值移动小于 1 nm,推测为微陨石轰击诱导结果变化引起水合作用导致光谱变化。

### 2.2.3 微陨石轰击改变有机物吸收特征

Matsuoka 等<sup>[69]</sup> 和 Busemann 等<sup>[73]</sup> 对 Murchison 颗粒的未辐照和辐照区域进行拉曼光谱分析,发现短时间加热不会显著促进碳化,但长时间加热会有效促进碳化。Thompson 等<sup>[74, 75]</sup> 通过脉冲激光轰击 Murchison 陨石模拟微陨石作用,使用  $\mu\text{L}2$  MS 仪器分析得到辐照使物质表面芳香族物质浓度增加,表明微陨石轰击导致有机物整体解聚。

### 2.3 空间风化的实验室模拟

为了比较空间风化模拟实验之间观测到的光谱差异,对不同实验变量的光谱结果进行了比较。本文对 19 个空间风化模拟实验的模拟方法、样品类型和实验结果相关实验参数进行整理。

太阳风作用实验模拟主要是通过不同离子类型、离子能量和通量模拟太阳风粒子辐射在小行星表面的不同能量。从 Moroz 等<sup>[52]</sup>使用天然沥青模拟 C 型小行星的太阳风作用实验,到 Brunetto 等<sup>[53]</sup>使用碳质球粒陨石样品模拟 C 型小行星的太阳风作用实验,再到 Nakamura 等<sup>[55]</sup>对不同碳质球粒陨石样品差异制备模拟 C 型小行星的太阳风作用实验,表明不同样品、不同制备方法及不同实验条件不会导致光谱变化。对于离子注入模拟太阳风作用的实验,不同能量及通量,不同样品类型、不同制备方法和不同的离子类型都会导致不同的光谱变化,其光谱变化趋势较复杂(见表 3)。模拟实验结果表明,太阳风作用可能导致光谱具有变蓝变亮、或者变红变暗、或者变蓝变暗的趋势。

微陨石轰击实验模拟是根据不同的激光能量模拟撞击小行星表面的平均撞击速度。辐射能量和撞击速度直接影响空间风化的改造效应。对于脉冲激光辐照模拟微陨石轰击过程,样品制备方法对微陨石轰击实验光谱变化影响较小,其影响光谱变化的条件主要为样品类型、脉冲持续时间和激光能量大小(见表 4)。模拟实验结果表明,微陨石轰击可能导致光谱具有变红变暗、或者变蓝变暗的趋势。

综合已有研究,太阳风作用与微陨石轰击模拟实验的相关实验参数的设置没有统一的计算规范,导致了不同实验样品类型、不同的实验参数得到相似的空间风化对光谱的改造结果。这表明模拟实验简化了空间风化的改造过程,需要更细化实验装置、实验条件及各种碳质球粒陨石类型的实验模拟。

## 3 存在问题与展望

当前,针对 C 型小行星空间风化的光谱效应研究依然局限于地面过程模拟和探测光谱对比分析。虽然 Hayabusa 2 成功采回 C 型小行星 Ryugu 的原位样品,但由于 C 型小行星母体差异性和原位样品的单一、稀少,仍缺乏系统性的样品分析和验证。由于开

展 C 型小行星探测和采样返回的技术、成本和周期局限,可立足碳质球粒陨石样品的研究,将 C 型小行星与碳质球粒陨石有效联系起来,深入理解其空间风化过程和光谱效应。但目前研究仍存在以下两个方面的问题。

(1) 空间风化对 C 型小行星物质的改造机理不明确,导致光谱效应存在争论。由于不同物质组分的改造过程差异,导致反射率增加还是降低仍有争论,吸收特征的变化观点也尚未统一。通过对碳质球粒陨石进行离子辐照和脉冲激光辐照模拟 C 型小行星空间风化改造效应也比较复杂,不同的样品制备、不同类型的碳质球粒陨石和不同的模拟方法(激光辐照或离子辐照)都会导致不同的光谱变化。粉末与薄片样品对光谱反射率的影响不同,粉末样品比薄片样品具有更显著的改造特征。不同类型的离子辐照对碳质球粒陨石的光谱改变效果不同,He<sup>+</sup>辐照降低了本体有机物总含量,而 H<sup>+</sup>辐照增加了一些低分子量游离有机物种的丰度。微陨石轰击通过粉碎(颗粒破碎)、冲击熔化、冲击、蒸发、再冷凝和冲击再生改变物质特性。相比之下,太阳风离子(主要是 H<sup>+</sup>和 He<sup>+</sup>)被注入晶粒表面,通过泡化、非晶化、扩散、溅射和溅射再沉积改变微观结构和化学效应。空间风化改造过程复杂、产物多样,C 型小行星光谱特征与之密切相关,具有多种变化特征,使遥感数据的解释以及与陨石光谱的配对变得困难重重。

(2) 碳质球粒陨石的空间风化改造研究仍存在不足,以致未能建立其与 C 型小行星之间的有效联系。首先,碳质球粒陨石组成成分不均一,硅酸盐、不透明矿物、金属和球粒等含量不同。空间风化对不同组分的改造效应也不同,以致碳质球粒陨石的空间风化改造比较复杂,无法将之与 C 型小行星的进行直接匹配。其次,碳质球粒陨石与 C 型小行星的反射率较低,其光谱吸收特征不明显,往往很难将某一类型碳质球粒陨石与 C 型小行星直接对应起来。最后,模拟实验研究还相对缺乏,少量碳质球粒陨石的空间风化模拟实验尚难以揭示 C 型小行星空间风化改造特征及其光谱效应。

随着工程任务的推进,小行星已经成为深空探测领域的重要探测目标,迫切需要充实 C 型小行星的基础数据,明确其空间风化效应。针对这一需求,更加需要加强陨石光谱与小行星光谱的联系,完善对不同

表 3 太阳风注入实验模拟相关实验参数

Table 3 Experimental parameters related to solar wind injection simulation

	样品	离子类型	能量/kcV	最大通量/cm <sup>-2</sup>	光谱范围/ $\mu\text{m}$	光谱变化
Ref. [53]	Allende粉末	H <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup>	40	3×10 <sup>16</sup> ion	0.4~50	变红变暗
Ref. [54]	CV/CO/CM/CI/Tagish Lake/橄榄石/辉石粉末	He <sup>+</sup>	40	6×10 <sup>16</sup> ion	0.4~16	CV/CO: 变红变暗; CM/CI/Tagish Lake: 变蓝变亮橄榄石/辉石; 变红变暗
Ref. [55]	CM MET01072薄片和CI Y 980115粉末、薄片	He <sup>+</sup>	20	6×10 <sup>16</sup> ion	0.4~15	CM: 薄片样品变亮变蓝 CI: 粉末样品变蓝变亮, 而薄片样品变红, 无明显变亮
Ref. [57]	橄榄石粉末	He <sup>+</sup>	4	3×10 <sup>18</sup> ion	0.66~2.5	变红变暗
Ref. [58]	Murchison薄片	He <sup>+</sup>	4	1×10 <sup>18</sup> ion	2.4~3.8	变红变暗
Ref. [59]	Murchison粉末	Ar <sup>+</sup> , He <sup>+</sup>	40	3×10 <sup>16</sup> ion	0.4~16	Ar <sup>+</sup> : 粉末样品变红变亮 He <sup>+</sup> : 粉末样品变红变暗
Ref. [60]	Murchison薄片	H <sup>+</sup> , He <sup>+</sup>	1.4	1.1×10 <sup>18</sup> He <sup>+</sup> 8.1×10 <sup>17</sup> H <sup>+</sup>	0.35~2.50	变亮变红
Ref. [61]	Allende和Murchison粉末	Ar <sup>+</sup> , He <sup>+</sup>	40	3×10 <sup>16</sup> ion	2.5~12	变红
Ref. [62]	蛇纹石和皂石粉末	H <sup>+</sup>	10	1.7×10 <sup>18</sup> ion	1.5~5	蛇纹石: 变蓝皂石: 变红
Ref. [70]	天然沥青粉末	H <sup>+</sup> , Ar <sup>+</sup> , N <sup>+</sup> , He <sup>+</sup>	15~400	7.4×10 <sup>15</sup> H <sup>+</sup> 6.2×10 <sup>15</sup> N <sup>+</sup> 8×10 <sup>15</sup> Ar <sup>+</sup> 2.5×10 <sup>16</sup> He <sup>+</sup>	0.3~2.5	变蓝变亮

表 4 微陨石轰击实验模拟相关实验参数

Table 4 Experimental parameters related to micrometeorite bombardment simulation

文献	样品	脉冲持续时间	辐照激光能量/mJ	光谱范围/ $\mu\text{m}$	光谱变化
Ref. [65]	Murchison粉末	6~8 ns 5~7 ns	0, 5, 10, 15	0.25~14	变蓝变暗
Ref. [66]	Allende粉末 Murchison粉末 石墨粉末	6000~12000次 48000次 48000次	30 30 30	0.4~0.5 0.35~2.5 0.35~2.5	变蓝 变暗 无明显变化
Ref. [67]	Murchison粉末	N/A	0.7, 1, 2, 5	0.25~14	变蓝变暗
Ref. [68]	NWA 3118, Allende粉末	5~7 ns, 40 min	30	0.35~2.5	变红变暗
Ref. [69]	Murchison粉末	6~8 ns	0~15	0.25~14	变蓝变暗
Ref. [71]	Murchison薄片	6~8 ns	48	0.35~2.5	变蓝变暗
Ref. [72]	CI和CM陨石模拟样品	6~8 ns	3.5	0.25~0.9 0.75~2.5	变蓝变暗
Ref. [74]	Murchison薄片	6~8 ns	48	0.35~2.5	变蓝变暗
Ref. [75]	Murchison薄片	6~8 ns	48	0.35~14.3	变蓝变暗

类型碳质球粒陨石的空间风化实验室模拟研究认识。当前研究存在不足,不同类型的碳质球粒陨石的模拟实验结果存在差异,其导致光谱变化的原因还有待于探讨,需要进行深入研究,所以建议加强不同类型碳质球粒陨石的实验室模拟研究。首先,明确和完

善不同类型离子、通量和能量对不同类型的碳质球粒陨石辐照表面光谱特征的改造效应,根据不同实验参数重复对比实验,探讨不同太阳风环境对小行星光谱的改造特征分析;其次,厘清和完善不同脉冲激光能量对不同类型的碳质球粒陨石辐照表面光谱特征的

改造效应,探讨不同微陨石轰击对小行星光谱改造特征分析,反推小行星演化过程;最后,厘清空间风化模拟实验与原始太阳系小行星表面改造效应的差异,通过不同空间风化模拟实验分析,总结不同空间风化对小行星表面的化学物理变化机制。因此,完善对不同类型碳质球粒陨石的太阳风作用与微陨石轰击作用的实验室模拟及阐明不同空间风化模拟实验改造效应的认识,明确空间风化对C型小行星表面物质的改造机理及光谱效应,有助于更好地服务于中国小行星的探测任务。

## 参考文献

- [1] YADA T, ABE M, OKADA T, *et al.* Ryugu: a brand-new planetary sample returned from a C-type asteroid[Z]. *Nature Portfolio*, 2021, 1-20. DOI: 10.21203/rs.3.rs-608561/v1
- [2] ZELLNER B, THOLEN D J, TEDESCO E F. The eight-color asteroid survey: results for 589 minor planets[J]. *Icarus*, 1985, **61**(3): 355-416
- [3] THOLEN D J. Asteroid taxonomic classifications [M]//BINZEL R P, GEHRELS T, SHAPLEY MATTHEWS M. Asteroids II. Tucson: *University of Arizona Press*, 1989
- [4] BUS S J, BINZEL R P. Phase II of the small main-belt asteroid spectroscopic survey: a feature-based taxonomy[J]. *Icarus*, 2002, **158**(1): 146-177
- [5] DEMEO F E, BINZEL R P, SLIVAN S M, *et al.* An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared[J]. *Icarus*, 2009, **202**(1): 160-180
- [6] BUSAREV V V. A hypothesis on the origin of C-type asteroids and carbonaceous chondrites[OL]. arXiv preprint arXiv: 1211.3042, 2012
- [7] GAFFEY M J, MCCORD T B. Asteroid surface materials: mineralogical characterizations from reflectance spectra[J]. *Space Science Reviews*, 1978, **21**(5): 555-628
- [8] DE SANCTIS M C, AMMANNITO E, RAPONI A, *et al.* Ammoniated phyllosilicates with a likely outer Solar System origin on (1) Ceres[J]. *Nature*, 2015, **528**(7581): 241-244
- [9] MATSUOKA M, NAKAMURA T, HIROI T, *et al.* Infrared spectra of asteroid Ryugu: comparison to laboratory-measured carbonaceous chondrites[C]//Proceedings of the 50 th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 2132, 2019: 1534
- [10] CAMPINS H, HARGROVE K, PINILLA-ALONSO N, *et al.* Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis[J]. *Nature*, 2010, **464**(7293): 1320-1321
- [11] PILORGET C, OKADA T, HAMM V, *et al.* First compositional analysis of Ryugu samples by the MicrOmega hyperspectral microscope[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(2): 221-225
- [12] PIETERS C M, NOBLE S K. Space weathering on airless bodies[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2016, **121**(10): 1865-1884
- [13] TRANG D, THOMPSON M S, CLARK B E, *et al.* The role of hydrated minerals and space weathering products in the bluing of carbonaceous asteroids[J]. *The Planetary Science Journal*, 2021, **2**(2): 68
- [14] MALFAVON A. Space Weathering Simulation Trends on Carbonaceous Chondrites[D]. Central Florida: University of Central Florida, 2020
- [15] HENDRIX A R, VILAS F. C-complex asteroids: UV-visible spectral characteristics and implications for space weathering effects[J]. *Geophysical Research Letters*, 2019, **46**(24): 14307-14317
- [16] REUTER D C, SIMON A A, HAIR J, *et al.* The OSIRIS-REx visible and InfraRed spectrometer (OVIRS): spectral maps of the asteroid bennu[J]. *Space Science Reviews*, 2018, **214**(2): 54
- [17] China National Space Administration. Asteroid mission payload and carrying project opportunity announcement [EB/OL]. [2019-04-19] <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6805886/content.html> (中国国家航天局. 小行星探测任务有效载荷和搭载项目机遇公告[EB/OL]. [2019-04-19] <http://www.cnsa.gov.cn/n6758823/n6758839/c6805886/content.html>)
- [18] SHARKEY B N L, REDDY V, MALHOTRA R, *et al.* Lunar-like silicate material forms the Earth quasi-satellite (469219) 2016 HO<sub>3</sub> Kamo'oalewa[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, **2**(1): 231
- [19] MORRISON D. Radiometric diameters and albedos of 40 asteroids[J]. *Astrophysical Journal*, 1974, **194**(15): 203-212
- [20] CHAPMAN C R, MORRISON D, ZELLNER B. Surface properties of asteroids: a synthesis of polarimetry, radiometry, and spectrophotometry[J]. *Icarus*, 1975, **25**(1): 104-130
- [21] TEDESCO E F, WILLIAMS J G, MATSON D L, *et al.* A three-parameter asteroid taxonomy[J]. *Astronomical Journal*, 1989, **97**: 580-606
- [22] TEDESCO E F. The IRAS minor planet survey[R]. *Cambridge University Press*, 1994, 1-437
- [23] TEDESCO E F, NOAH P V, NOAH M, *et al.* The supplemental IRAS minor planet survey[J]. *The Astronomical Journal*, 2002, **123**(2): 1056-1085
- [24] MASIERO J R, MAINZER A K, GRAV T, *et al.* Main belt asteroids with WISE/NEOWISE. I. Preliminary albedos and diameters[J]. *The Astrophysical Journal*, 2011, **741**(2): 68
- [25] TEDESCO E F, EGAN M P, PRICE S D. The midcourse space experiment infrared minor planet survey[J]. *The Astronomical Journal*, 2002, **124**(1): 583

- [26] TEDESCO E F. Archiving asteroid photometric data[J]. *Highlights of Astronomy*, 1992, **9**: 719-720
- [27] THOLEN D J. Asteroid Taxonomy from Cluster Analysis of Photometry[D]. Tucson: The University of Arizona, 1984
- [28] TANG Hong, LI Xiongyao, WANG Shijie. Analysis of spectral characteristics of water in different occurrence states[C]//Proceedings of the Abstract Album of the 14 th Annual Conference of Chinese Society of Mineralogy, Petrology and Geochemistry. Nanjing: Editorial Department of Journal of University Geology, 2013 (唐红, 李雄耀, 王世杰. 不同赋存状态水的光谱特征分析[C]//中国矿物岩石地球化学学会第14届学术年会论文摘要专辑. 南京:《高校地质学报》编辑部, 2013)
- [29] BECK P, ESCHRIG J, POTIN S, *et al.* “Water” abundance at the surface of C-complex main-belt asteroids[J]. *Icarus*, 2021, **357**: 114125
- [30] LEBOFISKY L A. Infrared reflectance spectra of asteroids: a search for water of hydration[J]. *The Astronomical Journal*, 1980, **85**: 573-585
- [31] BARUCCI M A, DOTTO E, BRUCATO J R, *et al.* 10 Hygiea: ISO infrared observations[J]. *Icarus*, 2002, **156**(1): 202-210
- [32] BARUCCI M A, DORESSOUNDIRAM A, FULCHIGNONI M, *et al.* Search for aqueously altered materials on asteroids[J]. *Icarus*, 1998, **132**(2): 388-396
- [33] VILAS F. A cheaper, faster, better way to detect water of hydration on Solar System bodies[J]. *Icarus*, 1994, **111**(2): 456-467
- [34] HOWELL E S, RIVKIN A S, SODERBERG A, *et al.* Aqueous alteration of asteroids: correlation of the 3  $\mu\text{m}$  and 0.7  $\mu\text{m}$  hydration bands[C]//Proceedings of the 31 st DPS Meeting. Padova: American Astronomical Society, 1999: 1074
- [35] VILAS F, GAFFEY M J. Phyllosilicate absorption features in main-belt and outer-belt asteroid reflectance spectra[J]. *Science*, 1989, **246**(4931): 790-792
- [36] HIROI T, ZOLENSKY M E, PIETERS C M, *et al.* Thermal metamorphism of the C, G, B, and F asteroids seen from the 0.7  $\mu\text{m}$ , 3  $\mu\text{m}$ , and UV absorption strengths in comparison with carbonaceous chondrites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 1996, **31**(3): 321-327
- [37] FORNASIER S, LANTZ C, BARUCCI M A, *et al.* Aqueous alteration on main belt primitive asteroids: results from visible spectroscopy[J]. *Icarus*, 2014, **233**: 163-178
- [38] TAKIR D, EMERY J P. Outer main belt asteroids: identification and distribution of four 3- $\mu\text{m}$  spectral groups[J]. *Icarus*, 2012, **219**(2): 641-654
- [39] KAMEDA S, YOKOTA Y, KOUYAMA T, *et al.* Improved method of hydrous mineral detection by latitudinal distribution of 0.7- $\mu\text{m}$  surface reflectance absorption on the asteroid Ryugu[J]. *Icarus*, 2021, **360**: 114348
- [40] KITAZATO K, MILLIKEN R E, IWATA T, *et al.* The surface composition of asteroid 162173 Ryugu from Hayabusa2 near-infrared spectroscopy[J]. *Science*, 2019, **364**(6437): 272-275
- [41] GERMANN J T, FIEBER-BEYER S K, GAFFEY M J. Evidence for hydrated minerals in the VNIR spectra of G-class asteroids: a first look[J]. *Icarus*, 2022, **377**: 114916
- [42] LEBOFISKY L A. Asteroid 1 Ceres: evidence for water of hydration[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1978, **182**(1): 17P-21P
- [43] JONES T D, LEBOFISKY L A, LEWIS J S, *et al.* The composition and origin of the C, P, and D asteroids: water as a tracer of thermal evolution in the outer belt[J]. *Icarus*, 1990, **88**(1): 172-192
- [44] RIVKIN A S, HOWELL E S, VILAS F, *et al.* Hydrated Minerals on Asteroids: the Astronomical Record[R]. Tucson: *Asteroids III*, 2002: 235-253
- [45] CRUIKSHANK D P, BROWN R H. Organic matter on asteroid 130 Elektra[J]. *Science*, 1987, **238**(4824): 183-184
- [46] RIVKIN A S, EMERY J P. Detection of ice and organics on an asteroidal surface[J]. *Nature*, 2010, **464**(7293): 1322-1323
- [47] RIVKIN A S, HOWELL E S, EMERY J P. Infrared spectroscopy of large, low-albedo asteroids: are Ceres and Themis archetypes or outliers?[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2019, **124**(5): 1393-1409
- [48] YADA T, ABE M, OKADA T, *et al.* Preliminary analysis of the Hayabusa2 samples returned from C-type asteroid Ryugu[J]. *Nature Astronomy*, 2022, **6**(2): 214-220
- [49] PARKER E T, FURUSHO A, GLAVIN D P, *et al.* Amino acid analyses of a sample of Ryugu by a combination of liquid chromatography and high-resolution mass spectrometry techniques[C]//Proceedings of the 53 rd Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 2678, 2022: 2651
- [50] APONTE J C, DWORKIN J P, GLAVIN D P, *et al.* Two-dimensional gas chromatography analysis of Ryugu samples[C]//Proceedings of the 53 rd Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 2678, 2022: 1221
- [51] HASHIGUCHI M, AOKI D, FUKUSHIMA K, *et al.* The spatial distribution of soluble organic matter and their relationship to minerals in the asteroid (162173) Ryugu[J]. *Earth, Planets and Space*, 2023, **75**(1): 73
- [52] MOROZ L, BARATTA G, STRAZZULLA G, *et al.* Optical alteration of complex organics induced by ion irradiation: 1. Laboratory experiments suggest unusual space weathering trend[J]. *Icarus*, 2004, **170**(1): 214-228
- [53] BRUNETTO R, LANTZ C, LEDU D, *et al.* Ion irradiation of Allende meteorite probed by visible, IR, and Raman spectroscopies[J]. *Icarus*, 2014, **237**: 278-292
- [54] LANTZ C, BRUNETTO R, BARUCCI M A, *et al.* Ion irradiation of carbonaceous chondrites: a new view of space weathering on primitive asteroids[J]. *Icarus*, 2017, **285**: 43-

- 57
- [55] NAKAMURA T, LANTZ C, KOBAYASHI S, *et al.* Experimental reproduction of space weathering of C-type asteroids by He exposure to shocked and partially dehydrated carbonaceous chondrites[C]//Proceedings of the the 82 nd Annual Meeting of the Meteoritical Society. Sapporo: LPI Contribution No. 2157, 2019: 6211
- [56] LAGERKVIST C I, MOROZ L, NATHUES A, *et al.* A study of Cybele asteroids-II. Spectral properties of Cybele asteroids[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2005, **432**(1): 349-354
- [57] LOEFFLER M J, DUKES C A, BARAGIOLA R A. Irradiation of olivine by 4 keV He<sup>+</sup>: simulation of space weathering by the solar wind[J]. *Journal of Geophysical Research: Planets*, 2009, **114**(E3): E03003
- [58] KELLER L P, CHRISTOFFERSEN R, DUKES C A, *et al.* Ion irradiation experiments on the Murchison CM2 carbonaceous chondrite: simulating space weathering of primitive asteroids[C]//Proceedings of the 46 th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 1832, 2015: 1913
- [59] LANTZ C, BRUNETTO R, BARUCCI M A, *et al.* Ion irradiation of the Murchison meteorite: visible to mid-infrared spectroscopic results[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2015, **577**: A41
- [60] LACZNAK D L, THOMPSON M S, CHRISTOFFERSEN R, *et al.* Understanding space weathering of carbonaceous asteroids through H<sup>+</sup> and He<sup>+</sup> ion irradiation of the Murchison meteorite[C]//Proceedings of the 52 nd Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 2548, 2021: 2548
- [61] BRUNETTO R, LANTZ C, DIONNET Z, *et al.* Hyperspectral FTIR imaging of irradiated carbonaceous meteorites[J]. *Planetary and Space Science*, 2018, **158**: 38-45
- [62] NAKAUCHI Y, ABE M, OHTAKE M, *et al.* The formation of H<sub>2</sub>O and Si-OH by H<sub>2</sub><sup>+</sup> irradiation in major minerals of carbonaceous chondrites[J]. *Icarus*, 2021, **355**: 114140
- [63] ORTHOUS-DAUNAY F R, ISA J, WOLTERS C, *et al.* Molecular growth pattern of soluble CHN compounds from Ryugu[C]//Proceedings of the 53 rd Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 2678, 2022: 2367
- [64] REMUSAT L, VERDIER-PAOLETTI M, MOSTEFAOUI S, *et al.* H-and N-isotope distributions in the insoluble organic matter of Ryugu samples[C]//Proceedings of the 53 rd Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 2678, 2022: 1448
- [65] MATSUOKA M, NAKAMURA T, KIMURA Y, *et al.* Pulse-laser irradiation experiments of Murchison CM2 chondrite for reproducing space weathering on C-type asteroids[J]. *Icarus*, 2015, **254**: 135-143
- [66] GILLIS-DAVIS J J, GASDA P J, BRADLEY J P, *et al.* Laser space weathering of Allende (CV2) and Murchison (CM2) carbonaceous chondrites[C]// 46 th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 1832, 2015: 1607
- [67] MATSUOKA M, NAKAMURA T, KIMURA Y, *et al.* Reproducing space weathering on C-Type asteroids with low-energy laser irradiation experiments of the Murchison meteorite[C]//Proceedings of the 47 th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 1903, 2016: 1823
- [68] GILLIS-DAVIS J J, ISHII H A, ADAMS M, *et al.* Laser irradiation of two CV3 meteorites yields disparate weathering effects[C]//Proceedings of the 48 th Annual Lunar and Planetary Science Conference. Texas: LPI Contribution No. 1964, 2017: 1003
- [69] MATSUOKA M, NAKAMURA T, HIROI T, *et al.* Space weathering simulation with low-energy laser irradiation of Murchison CM chondrite for reproducing micrometeoroid bombardments on C-type asteroids[J]. *The Astrophysical Journal Letters*, 2020, **890**(2): L23
- [70] MOROZ L V, HIROI T, SHINGAREVA T V, *et al.* Reflectance spectra of CM2 chondrite Mighei irradiated with pulsed laser and implications for low-albedo asteroids and Martian moons[C]//Proceedings of the 35 th Lunar and Planetary Science Conference. Texas: abstract No. 1279, 2004
- [71] THOMPSON M S, LOEFFLER M J, MORRIS R V, *et al.* Spectral and chemical effects of simulated space weathering of the Murchison CM2 carbonaceous chondrite[J]. *Icarus*, 2019, **319**: 499-511
- [72] PRINCE B S, LOEFFLER M J. Space weathering of the 3- $\mu$ m phyllosilicate feature induced by pulsed laser irradiation[J]. *Icarus*, 2022, **372**: 114736
- [73] BUSEMANN H, ALEXANDER C M O D, NITTLER L R. Characterization of insoluble organic matter in primitive meteorites by microRaman spectroscopy[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2007, **42**(7/8): 1387-1416
- [74] THOMPSON M S, LOEFFLER M J, MORRIS R V, *et al.* Investigating the effects of simulated micrometeorite impacts on a carbonaceous chondrite through coordinated analysis[C]//Proceedings of the 82 nd Annual Meeting of the Meteoritical Society. Sapporo: LPI Contribution No. 2157, 2019: 6318
- [75] THOMPSON M S, MORRIS R V, CLEMETT S J, *et al.* The effect of progressive space weathering on the organic and inorganic components of a carbonaceous chondrite[J]. *Icarus*, 2020, **346**: 113775