

基于碳质球粒陨石的小行星水蚀变光谱学研究

余金霏^{1,2,3}, 赵海斌^{1,2,4}, 吴昀昭^{1,4}

(1. 中国科学院行星科学重点实验室, 紫金山天文台 南京 210023; 2. 中国科学技术大学天文与空间科学学院, 合肥 230026;
3. 东京大学综合文化研究科广域系统科学系, 东京1538902; 4. 中国科学院比较行星学卓越创新中心, 合肥 230026)

摘要: 针对未来对富挥发分小行星的遥感探测需求, 开展了对碳质球粒陨石水蚀变的光谱学研究。分析了15个不同蚀变程度的碳质球粒陨石的1~20 μm红外光谱特征与岩石学性质, 总结了水蚀变过程的光谱变异规律。结果表明: 随着蚀变程度加深, 指示层状硅酸盐与水分子的3 μm吸收带与仅指示水分子的6 μm吸收带的强度均加深, 吸收中心均向短波方向移动。碳质球粒陨石的3 μm吸收带随蚀变程度增加而变得尖锐, 吸收带光谱形态与蛇纹石类矿物3 μm吸收特征类似, 而6 μm吸收带形态随蚀变程度增加无明显变化。硅酸盐矿物在9~14 μm特征区光谱形状也随蚀变程度增加而改变, 12.4 μm/11.4 μm反射率比值减小, 这是由于无水硅酸盐转化为层状硅酸盐。光谱变异规律未来可应用于探测小行星表面物质成分与演化历史。

关键词: 小行星; 碳质球粒陨石; 水蚀变; 光谱学

中图分类号: P185.7

文献标识码: A

文章编号: 2096-9287(2023)06-0667-10

DOI: 10.15982/j.issn.2096-9287.2023.20220077

引用格式: 余金霏, 赵海斌, 吴昀昭. 基于碳质球粒陨石的小行星水蚀变光谱学研究[J]. 深空探测学报(中英文), 2023, 10(6): 667-676.

Reference format: YU J F, ZHAO H B, WU Y Z. Spectroscopic study of aqueous alteration of asteroids based on carbonaceous chondrites[J]. Journal of Deep Space Exploration, 2023, 10(6): 667-676.

引言

小行星为洞察早期太阳系演化过程提供了机会, C类小行星(C-complex Asteroids, 包括Tholen小行星光谱分类法中的C型、D型、G型、F型、B型或SMASS小行星光谱分类法中的C型、B型、Cb型、Cg、Ch型、Cgh^[1-2])被认为是太阳系原始小行星的残余物^[3], 形成年龄超过4.56 Ga^[4], 保存了早期太阳系的物质, 记录了太阳星云与原行星盘演化中的物理与化学过程。此外, C类小行星中存在水蚀变迹象^[5], 可能在原行星盘时期向类地行星输送挥发物发挥了作用, 对地球环境演化、生命起源有重要影响^[6-7]。因此, 对C类小行星的结构、成分、水蚀变过程的研究受到广泛关注^[7-12]。

近年来, 各国已展开多次C类小行星探测任务。包括美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)针对主带的C型小行星1 Ceres“谷神星”进行环绕探测的“黎明号”(Dawn)任

务^[13]、针对近地天体B型小行星101955 Benu“贝努”进行采样返回的太阳系起源、光谱解析、资源识别、安全保障、小行星风化层探索者“欧西里斯-雷克斯号”(Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security-Regolith Explorer, OSIRIS-REx)任务^[14], 日本宇宙航空研究开发机构(Japan Aerospace Exploration Agency, JAXA)针对Cg型小行星162173 Ryugu“龙宫”的“隼鸟2号”(Hayabusa 2)采样返回任务^[15]。“露西号”(Lucy)任务^[16]将依次探测位于主带的C型小行星52246 Donaldjohanson“唐纳德·约翰森”, 以及C型小行星3548 Eurybates“欧律巴忒斯”与21900 Orus“奥鲁斯”、D型小行星11351 Leucus“勒乌克斯”等6颗位于特洛伊小行星, 首次对外主带的碳质小行星进行探测。NASA“灵神星轨道器”(Psyche)将探测主带最大的M型小行星16 Psyche“灵神星”, 该小行星表面也被认为存在水蚀变碳质球粒陨石物^[17]。JAXA火星卫星探查计划(Martian Moons Exploration, MMX)将发射探测器对火卫一Phobos“福布斯”进行

收稿日期: 2022-08-19 修回日期: 2022-10-25

基金项目: 中国科学院先导B资助项目(XDB41010104); 国家自然科学基金(11633009、12150009); 空间碎片与近地小行星防御科研资助项目(KJSP2020020205, KJSP2020020204, KJSP2020020102, KJSP2020020101); 小行星基金会资助项目; 中国矿业大学“双一流”建设提升自主创新能力资助项目(2022ZZCX06)

探测并采样返回,该卫星光谱特征与碳质小行星(D型小行星)一致^[18]。中国也将在2025年前对主带彗星311P实施环绕探测任务,将进一步拓展对小天体的水蚀变特征与挥发性成分的研究。

碳质球粒陨石(Carbonaceous chondrite, CCs)的光谱形状以及低反射率特征与C类小行星相似,因此被认为来源于C类小行星。部分碳质球粒陨石也存在水蚀变过程,尤其CM群和CI群碳质球粒陨石含有丰富的层状硅酸盐矿物,水蚀变现象显著,表明它们的母体曾广泛受到低温条件下的流体-岩石相互作用,使原始的无水硅酸盐转化为层状硅酸盐、水合矿物与氧化物。因此,对碳质球粒陨石水蚀变特征的研究可增加对C类小行星水蚀特征的了解,帮助解译探测数据。

红外光谱对含水矿物非常灵敏,不但可以对含水蚀变矿物定性识别,还可对它们的含量定量测定。含水矿物中羟基与H₂O弯曲与伸缩振动的3 μm吸收特征常被用来衡量陨石的水蚀变程度^[8,16],该特征也被广泛用作小行星中存在水冰的证据及测量碳质球粒陨石和天体表面的水含量^[19-23]。值得注意的是,3 μm吸收特征较宽,常与其它物质的吸收特征混合,如氨基酸的N-H键振动在3.1 μm处产生的吸收特征^[9]、脂肪族有机物C-H键振动在3.3~3.5 μm产生的吸收特征^[24-25]。与3 μm吸收特征存在多解性不同,H₂O在6 μm处弯曲振动产生的吸收特征则只与水分子有关,近年来被用来证实月球表面含有分子水^[26]。硅酸盐在9~14 μm区域具有复杂的振动特征,被广泛用于碳质球粒陨石的矿物结构与占比等内容^[9,16,27]。Beck等^[28]认为在25 μm之后的红外光谱没有明显的与矿物蚀变相关联的特征。

虽然目前已对碳质球粒陨石水蚀变过程有了大量研究,但对水蚀变程度与光谱变异规律的认识仍然有限。本文研究了15个碳质球粒陨石的反射光谱,分析碳质球粒陨石的3 μm吸收带、6 μm吸收带、9~14 μm光谱特征在受到不同程度的水蚀变作用与矿物学变化后的光谱变异规律,为小行星深空探测提供基础支撑。

1 陨石样品数据与方法

1.1 陨石样品

本文选用6个CM2陨石、3个CI1陨石、1个CV3陨石、1个CK4陨石、1个CM1陨石、1个CR2陨石、1个C2未分组(C2 ungrouped)陨石进行研究,陨石的具体信息与光谱参数见表1陨石名称、岩石学类型参考陨石协会(Meteoritical Society)数据库。本研究重点关注水蚀变显著的CM与CI陨石,这两类陨石岩石学性质有显著差异,具有不同的基质比例、不透明矿物相丰度、金属元素含量、次生矿物相含量以及含水量。基

于Tairk等^[9]与Beck等^[1]对CM与CI陨石的蚀变程度与岩石学性质的研究,挑选了6个蚀变程度逐渐增加的CM陨石,按Rubin等^[29]对碳质球粒陨石蚀变程度的岩石学类型定义,选择了从高蚀变程度(岩石学类型2.0)到低蚀变程度(岩石学类型2.6),层状硅酸盐含量为77.4 vol%~67.0 vol%^[30]的6个样品。选取的其它水蚀变碳质球粒陨石包括:3个已完全蚀变、层状硅酸盐含量大于95.0 vol%的CI1陨石、中等程度蚀变的CR2陨石、高度蚀变的CM1陨石。此外,未经历水蚀变、层状硅酸盐含量小于5.0 vol%的CV3陨石,仅经历少量蚀变的CO3陨石,仅含有无水硅酸盐、经历过热变质过程的CK4陨石也被用于对不同岩石学类型的碳质球粒陨石进行对比研究。

表1 本研究用碳质球粒陨石数据信息

Table 1 Carbonaceous chondrite researched in this study

陨石名称	陨石群与岩石学类型	发现类型	光谱测量范围/ μm	2 μm处 反射率
Alais	CI1	降落型	0.83~99.72	0.073 70
Orgueil	CI1	降落型	1.43~25.05	0.068 85
Ivuna	CI1	降落型	0.83~99.72	0.043 05
Moapa Valley	CM1	发现型	0.83~99.72	0.033 08
QUE97077	CM2 (2.6)	发现型	0.32~25.05	0.071 43
Murchison	CM2 (2.5)	降落型	0.32~25.05	0.053 27
Murray	CM2 (2.4)	降落型	0.32~25.05	0.103 55
Nogoya	CM2 (2.2)	降落型	0.32~25.05	0.067 77
Mighei	CM2	降落型	0.32~25.05	0.064 53
Cold Bokkeveld	CM2 (2.2)	降落型	0.32~25.05	0.062 67
Al Rais	CR2	降落型	0.83~99.72	0.049 26
ALHA77307	CO3	发现型	0.83~99.72	0.056 58
Allende	CV3	降落型	0.83~99.72	0.070 53
EET92002	CK4	发现型	0.9~24.923	0.030 01
Tagish Lake	C2 (未分类)	降落型	1.43~25.05	0.026 12

注:陨石信息来源于国际陨石协会。

1.2 光谱测量与分析

本研究使用的碳质球粒陨石光谱数据获取自美国国家航空航天局反射实验室(Reflectance Experiment Laboratory, RELAB)^[31]。所有陨石样品均经过研磨筛选,粒径均小于125 μm,使用UV-VIS-NIR双向反射光谱仪(波长范围0.3~2.6 μm)与Thermo Nexus 870 FT-IR光谱仪(波长范围1.4~25 μm)进行反射光谱测量。由于本研究选取的碳质球粒陨石数据样品来源于不同收藏者且在RELAB的测量时间、科学目标不同,故光谱范围测量有差异(见表1)。

本研究主要关注碳质球粒陨石水蚀变过程与近红外区域(1~5 μm)、中红外区域(5~20 μm)的光谱变异规律。通过对样品光谱进行连续谱去除,测量各个陨石的3 μm带、6 μm带的吸收强度、吸收中心波长。此外,对比不同蚀变程度陨石在9~14 μm区域光

谱曲线形状的差异, 计算它们的11.4 μm 处与12.4 μm 处反射率比值, 并结合样品的岩石学特征进行分析。

2 光谱特征曲线

2.1 碳质球粒陨石的近红外光谱特征

碳质球粒陨石的近红外光谱曲线如图1所示。由于碳质球粒陨石富含碳质物质(约3 wt%), 其整体呈现出低反射率碳质物质的光谱特征。CM2、CI1、CV3与C2陨石样品在近红外区域均呈现红色斜率, 而CK4陨石为微蓝色斜率。样品的粒径大小、基质中层状硅酸盐含量对可见光-近红外光谱斜率有影响^[1,29]。CM2陨石 Mighei、Cold Bokkeveld、QUE97077在0.7 μm 处有微弱的吸收特征, 这与层状硅酸盐中 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ 的电荷转移^[9]和水蚀变^[32]有关, 但由于吸收强度弱(普遍低于1.5%), 因此无法判断其强度与蚀变程度的相关性。CI1陨石与CM2陨石Cold Bokkeveld、Mighei、Nagoya在2.3 μm 处有微弱的吸收特征, 该特征由Mg-OH吸收产生^[9], 也是水蚀变的光谱特征。

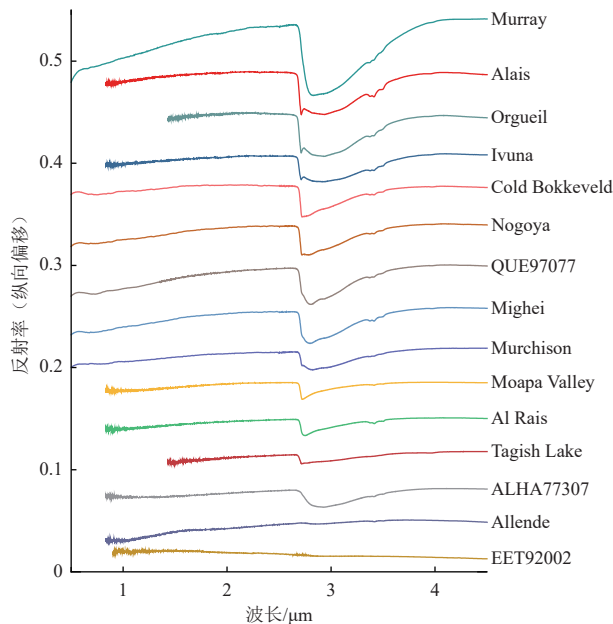


图1 碳质球粒陨石在0.5~4.5 μm 的反射光谱

Fig. 1 Reflectance spectra of carbonaceous chondrites in 0.5-4.5 μm

在2.7~4 μm 之间的3 μm 吸收带是经历过水蚀变过程的CI1、CM1、CM2、CR2、C2、CO3陨石最显著的光谱特征, 其特点表现为光谱曲线在2.7 μm 处剧烈下降, 光谱吸收中心位置在2.72~2.90 μm 之间, 右侧光谱曲线平缓上升, 形成宽而不对称的宽吸收峰。与之形成鲜明对比的是未经历水蚀变的CK4与CV3陨石, 它们在此区域的光谱曲线保持平整。3 μm 带反映多种物质的吸收特征, 包括Mg-OH、Fe-OH、层状硅酸盐矿物、 H_2O 等^[8-9,16,25-26]。除CK4、CV3与C2陨石外, 所

有样品在3.4~3.5 μm 处有吸收特征, 该特征由脂肪族与芳香族有机物中C-H吸收产生^[5,19]。

2.2 碳质球粒陨石的中红外光谱特征

碳质球粒陨石中红外光谱曲线如图2所示。CM2、CI1、CO3、CR2、CM1陨石均在6.0~6.1 μm 处存在吸收带, 吸收带形态对称且不同陨石的吸收带形态相似。该吸收带为碳质球粒陨石中含水矿物、层间水、孔隙水与环境吸附水的 H_2O 分子弯曲振动产生。在15个样品中, CI1陨石的6 μm 吸收带最强, 吸收强度均为43%, 而CM2陨石的6 μm 吸收带强度各异, CM1陨石的吸收特征最弱, 仅9%。此外, CV3陨石在5.6 μm 处与6.0 μm 处有两个微弱吸收, 为橄榄石的双峰吸收。

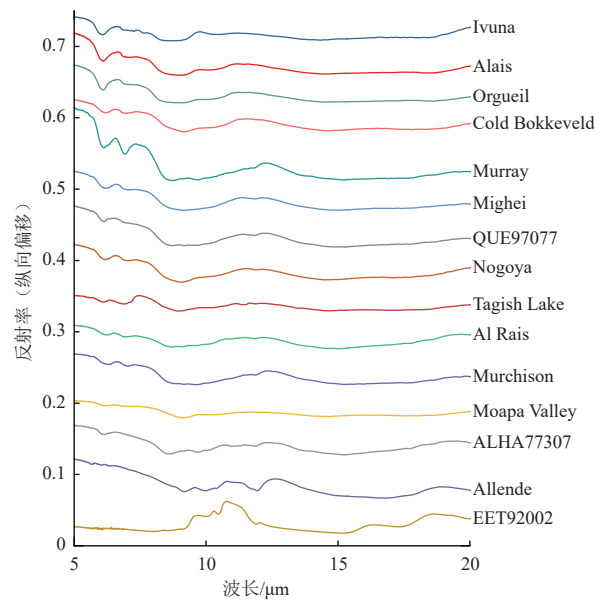


图2 碳质球粒陨石在5~20 μm 的反射光谱

Fig. 2 Reflectance spectra of Carbonaceous chondrites in 5-20 μm

硅酸盐矿物中Si-O拉伸振动产生的吸收特征是9~14 μm 区域内最显著的光谱特征, 不同结构的硅酸盐矿物在此区域的光谱形状不同^[1], 可以用于分析碳质球粒陨石中无水硅酸盐、层状硅酸盐的占比与蚀变情况。无水硅酸盐(主要为橄榄石、辉石)的峰值在更长的波长, 而层状硅酸盐则在更短的波长处^[27-28]。由图2可见, 在所有经历水蚀变的碳质球粒中, 9~14 μm 均有一个宽反射峰, 而CK4陨石在9~12 μm 存在明显的反射峰特征, 与其它碳质球粒陨石形成鲜明对比。

2.3 碳质球粒陨石的水蚀变光谱变异规律

CM2与CI1陨石的3 μm 带区域连续统去除光谱如图3所示, 可见CI1陨石的3 μm 带光谱形状为2.72 μm 处尖锐的吸收峰, 与蛇纹石类矿物的3 μm 吸收特征类似^[22], 这是由于CI1陨石受蚀变程度最高, 其无水硅酸盐已经

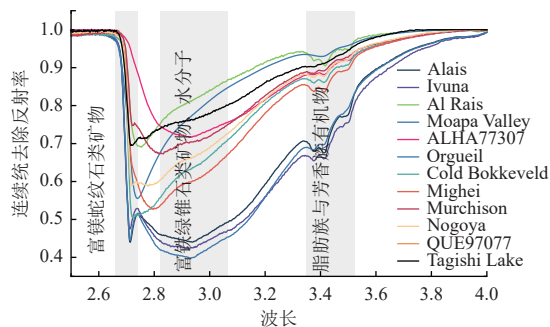


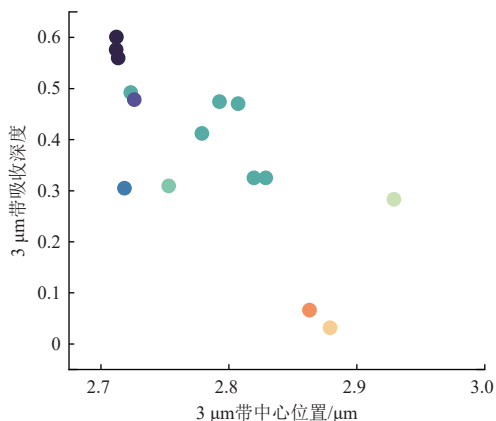
图3 碳质球粒陨石的3 μm吸收带的连续统去除光谱

Fig. 3 Continuum removal spectra of carbonaceous chondrites at 3 μm band

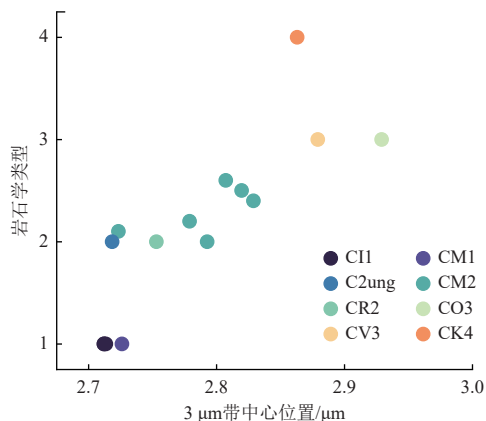
完全转化为富镁蛇纹石类矿物^[9]。CM陨石的3 μm带光谱形态差异较大,吸收峰中心位置在2.72~2.85 μm之间,这是由于CM陨石蚀变程度不同,蚀变矿物、含水量与矿物结构均不同。如铁绿锥石(Fe-cronstedtite,富铁蛇纹石类矿物)的3 μm带吸收中心位于2.85 μm处,而镁蛇纹石(Mg-serpentine)的3 μm带吸收中心位于2.72 μm处^[9,23]。蚀变程度较低的Murchison陨石含有50.3 vol%的铁绿锥石与22.2 vol%的镁蛇纹石,而蚀变程度较高的Cold Bokkeveld陨石则含有19.2 vol%的铁绿锥石与59.3 vol%的镁蛇纹石^[30]。此外,层状硅酸

盐的增加使得碳质球粒陨石中矿物水、层间水与孔隙水含量增加,导致H₂O与-OH在3 μm的吸收增加。

本文所研究陨石蚀变程度与3 μm带吸收深度、吸收中心的关系如图4所示。由图4可见,3 μm带中心位置随蚀变程度增加而左移,中心位置从2.9 μm(AlHA 77307,蚀变程度最低的CO3陨石)移至2.72 μm(CI1陨石,蚀变程度最高)之间。3 μm带吸收中心左移的原因为:水分子的振动吸收特征位于2.9 μm附近,富铁层状硅酸盐的吸收特征位于2.85 μm^[1,8]。富镁层状硅酸盐吸收特征位于2.72 μm附近^[22]。CO3 ALHA77307陨石仅受到少量蚀变,层状硅酸盐含量较少,3 μm特征由含水霞石与吸附水贡献,吸收中心在2.9 μm处,而随蚀变程度增加,CM2、CR2陨石中的富铁蛇纹石逐渐转化为富镁蛇纹石,最终成为完全由镁蛇纹石类矿物主导的CM1与CI1陨石,因此吸收中心左移至2.72 μm。此外,3 μm带的吸收深度与吸收中心之间有良好的相关性,吸收深度随吸收中心左移而增加。这是因为随着水蚀变程度增加,陨石基质中层状硅酸盐矿物、矿物结合水、层间水和羟基含量均随之增加,因此增强了3 μm的吸收^[9,16-17]。



(a) 3 μm带吸收中心与吸收深度关系



(b) 3 μm带吸收中心与蚀变程度(岩石学类型)的关系

图4 3 μm吸收特征与蚀变程度的关系

Fig. 4 The relationship between the 3 μm band and aqueous alteration degree

CM2与CI1陨石6 μm区域的去连续谱光谱曲线如图5所示。与3 μm带形态不同,6 μm吸收带的光谱形状为对称单峰,吸收中心集中在6.07~6.15 μm,这是由于6 μm吸收带仅由H₂O分子弯曲振动产生^[6-7,11,21]。图6展示了6 μm带吸收深度、吸收中心位置与蚀变程度的关系。由图6可见,随着蚀变程度增加,6 μm吸收带深度增加至43%,吸收中心左移至6.07 μm。其中,CM2陨石的6 μm吸收带深度差异较大,这是因为CM2陨石的蚀变程度存在较大差异,显著影响了陨石的总含水量。CI1陨石的6 μm吸收带深度以及中心位置都相似,表明它们已经完全蚀变,陨石内总含水量相同。CK4

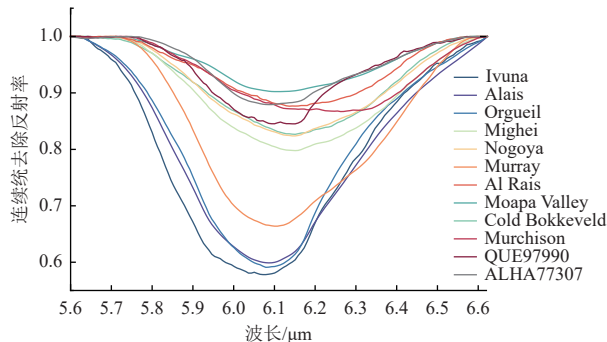


图5 碳质球粒陨石6 μm吸收带的连续统去除光谱

Fig. 5 Continuum removal spectra of carbonaceous chondrites at 6 μm band

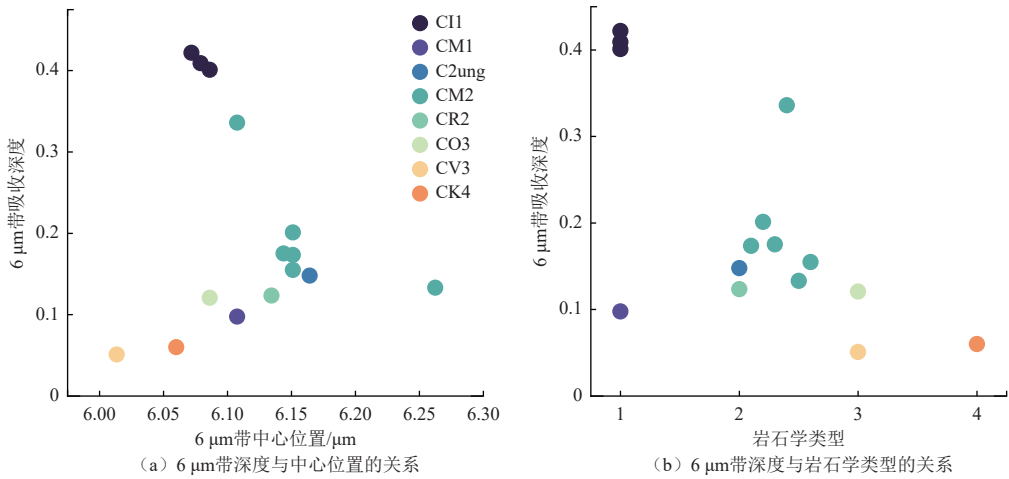


图 6 6 μm带特征与蚀变程度的关系

Fig. 6 The relationship between the 6 μm band and aqueous alteration degree

与CV3陨石的6 μm吸收带中心位置集中在6.03 μm附近, 表明在无水矿物中的吸附水的振动特征与CM2、CI1陨石的含水矿物的层间吸附水振动特征有显著不同^[28,33]。

水蚀变程度也影响了碳质球粒陨石在中红外区域的光谱曲线形状, 如图7所示。由CI1、CM1、CM2、CR2、CO3、C2陨石在9~14 μm的光谱曲线可见, 随蚀变程度增加, 9~14 μm区域的反射率峰向左移。光谱在12.4 μm与11.4 μm反射率的比值与岩石学类型也存在相关性, 如图8所示, 随蚀变程度增加, CM2与CI1陨石的12.4 μm/11.4 μm比值降低。这是由于无水硅酸盐在12.4 μm处反射率较高, 层状硅酸盐在11.4 μm处反射率较高, 随水蚀变过程发展, 碳质球粒陨石基质中无水硅酸盐逐渐转化为层状硅酸盐^[28,33], 导致样品在12.4 μm处的反射率逐渐降低。因此, 9~14 μm区域的反射率峰随蚀变程度的增加而左移, 12.4 μm/11.4 μm比降低。

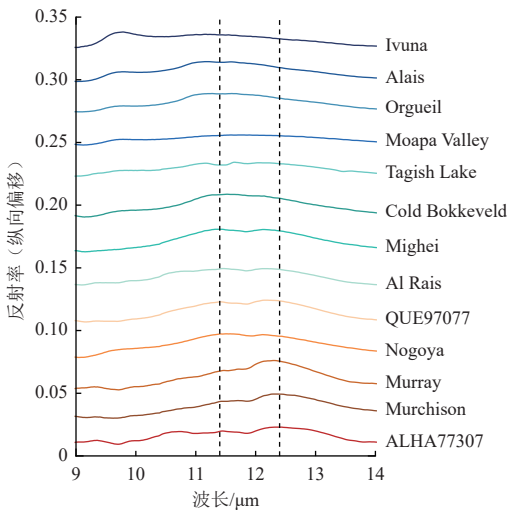


图 7 CI1、CM1、CM2、CR2、C2与CO3陨石的9~14 μm的光谱
Fig. 7 The reflectance spectra of CI1, CM1, CM2, CR2, C2 and CO3 chondrites in the 9-14 μm

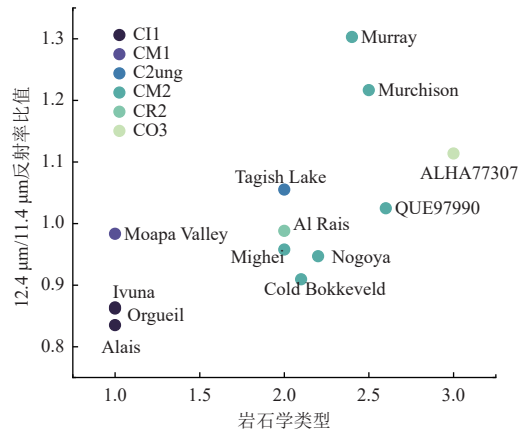
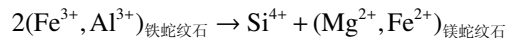


图 8 CI1、CM1、CM2、CR2、C2与CO3陨石的12.4 μm/11.4 μm反射率比值与岩石学类型的关系

Fig. 8 The relationship between the CI1, CM1, CM2, CR2, C2 and CO3 chondrites petrological type and 12.4 μm/11.4 μm reflectance ratio

3 结果分析

水蚀变程度不同导致碳质球粒陨石的3 μm带特征的不同。Browning等^[34-35]使用岩相学与矿物学方法来研究碳质球粒陨石的水蚀变程度, 将水蚀变过程的发展解释为铁蛇纹石逐渐转化为镁蛇纹石的过程为



Howard等^[30]使用位敏探测器型X射线衍射方法 (Position Sensitive Detector X-Ray Diffraction, PSD-XRD) 对水蚀变碳质球粒陨石的矿物占比进行了详细研究, 认为碳质球粒陨石中富镁层状硅酸盐 (镁蛇纹石) 的含量与富铁层状硅酸盐 (铁绿锥石) 的含量负相关。将3 μm带光谱学研究与岩石学、矿物学研究相结合, 可利用3 μm带特征对碳质球粒陨石、C类小行星的物质特征进行推测。基于本研究的光谱数据与

Howard测量的CM2陨石的矿物学数据, 本文认为3 μm带中心位置与层状硅酸盐中铁绿锥石的占比存在相关性: 如图9所示, 当3 μm中心位置在2.72~2.85 μm之间时, 铁绿锥石含量占比越高, 3 μm带中心位置波长越长。

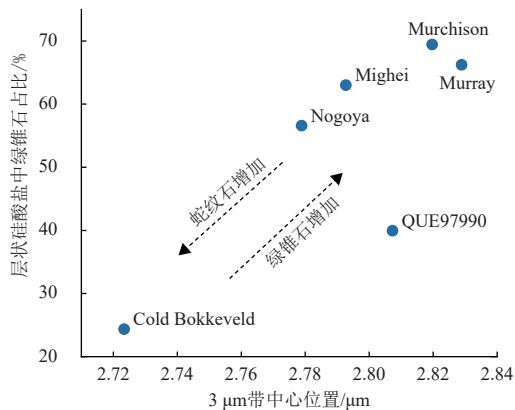


图9 CM2陨石中3 μm带中心位置与绿锥石在层状硅酸盐中占比的关系
Fig. 9 The relationship between the 3 μm band center and Fe-cronstedtite abundance in phyllosilicate in CM2 chondrites

红外天文观测表明, C类小行星存在与水蚀变碳质球粒陨石相似的0.7 μm与3 μm带特征^[3,33-39], 但是由于地球大气中水汽的吸收影响了直接观测小行星的含水物质^[40], 无法通过光谱特征精确测定小行星的水蚀变程度。本研究将碳质球粒陨石3 μm数据与小行星天文观测的3 μm带数据进行对比, 以进一步分析水蚀变碳质球粒陨石与富挥发分小行星的光谱特征的异同。小行星光谱数据来源于JAXA AKARI红外望远镜在制冷剂耗尽后的运行阶段对66颗小行星进行的指向性观

测收集的AcuA-spec数据^[41], 包括23颗C类小行星、17颗S类小行星、22颗X类小行星、3颗D型小行星与1颗V型小行星。图10展示了本研究中测量的碳质球粒陨石3 μm带参数与小行星的3 μm带参数的对比, 可见小行星缺少类似CI陨石的位于2.72 μm的强烈吸收特征, 且部分主带C类小行星存在独特的3.1 μm吸收特征。一些学者认为3.1 μm吸收特征表明小行星表面可能存在水冰、水铁矿或氯化层状硅酸盐^[42-44], 暗示此类C类小行星的母体可能形成于NH₃与CO₂雪线附近, 水蚀变过程受到其它挥发性成分的控制(图11)。此外, 对于不含蚀变特征的小行星, 3 μm吸收强度可能来源于恒星背景的光谱干扰、小行星光谱热校正与连续统去除的误差, 这些内容超出了本文的讨论范围。表2汇总了3 μm带区域内不同吸收特征的中心位置及对应的成分。

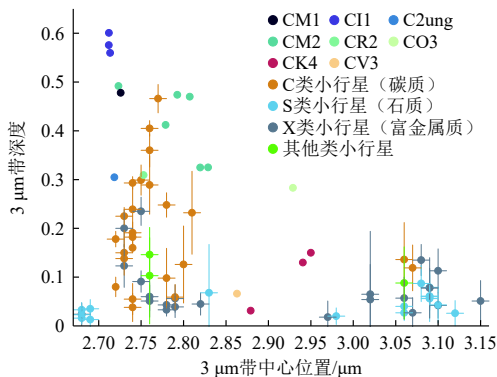
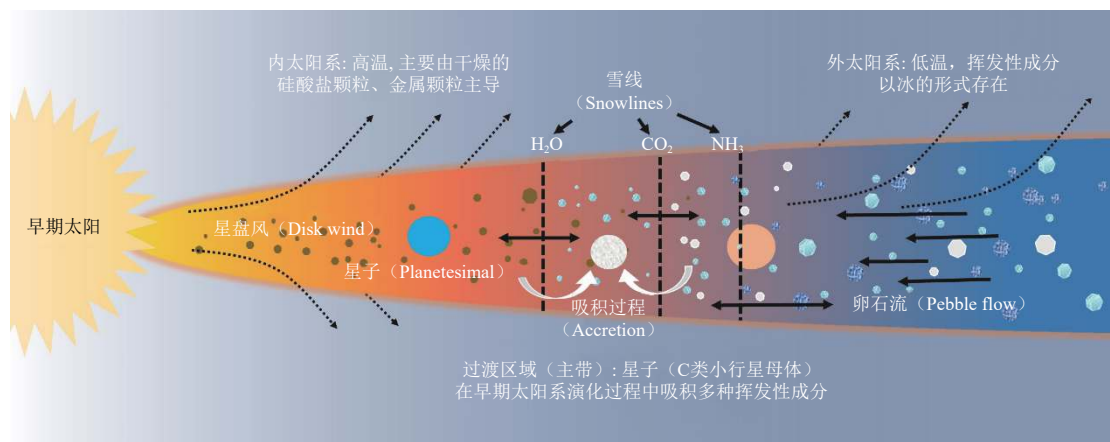


图10 碳质球粒陨石与小行星的3 μm带参数分布
Fig. 10 Comparison of 3 μm band parameters of asteroids and CCs in this study



注: 由于雪线的径向迁移, 演化形成于雪线附近的星子(小行星)可同时吸积不同类型的挥发性成分, 导致水蚀变的次生矿物不同。

图11 早期太阳系原行星盘演化示意图

Fig. 11 Illustration of protoplanetary disk evolution in early Solar System

Hayabusa 2 任务^[45]探测发现Cg型小行星Ryugu表面的3 μm吸收带与碳质球粒陨石不同, 呈现为中心在

2.72 μm处、吸收强度为7%~10%的尖锐吸收峰^[45], 与加热的Ivuna陨石光谱特征相似, 这被认为是Ryugu在

表 2 控制3 μm带变化的因素

吸收中心位置/μm	产生吸收的物质	蚀变程度	观测情况
2.72	蛇纹石	完全蚀变	所有CI、CM群陨石、小行星
2.72~2.85	蛇纹石与绿锥石	不完全蚀变	所有CM2群陨石、小行星
2.85~2.95	矿物结合水、层间水、水铁矿、铁氧化物	仅受到少量蚀变、矿物水特征	ALHA77307陨石(CO3群)
3.0~3.1	水冰、氨基酸、氯化层状硅酸盐、水镁石、针铁矿	未知	仅在外主带天体观测到
3.3	碳酸盐类矿物		仅存在于小行星所有CI、CM、CR、CO陨石, 在小行星中也有观测(微弱)
3.3~3.6	脂肪族与芳香族有机物、方解石、菱镁石	完全蚀变	
3.7~3.9	碳酸盐类矿物、菱镁石	完全蚀变	仅存在于小行星

水蚀变后又经历了后期加热变质过程^[46-47]。OSIRIS-REx任务^[14]探测表明, B型小行星Bennu表面的3 μm带光谱曲线与高蚀变程度CM陨石类似, 吸收强度为15%~17%, 吸收中心在2.74 μm^[48]。将Ryugu与Bennu的表面平均3 μm带与碳质球粒陨石3 μm带参数进行对比(图12), 可见Bennu的3 μm带中心位置介于完全蚀变的1型陨石与不充分蚀变的2型陨石之间, 而Ryugu的3 μm带中心位置则与其它CI1、CM1陨石相似, 但是强度较弱, 与观测到的主带C类小行星一致(图10)。然而, 对Hayabusa 2任务采样返回的Ryugu表面物质的分析表明, 实验室中Ryugu样品粉末的3 μm带吸收强度为18%^[49], 吸收特征与去除吸附水的CI陨石一致^[50], Ryugu样品的矿物学成分与未经历热变质CI碳质球粒陨石一致^[51], 驳斥了基于探测器数据得出的结论^[46,50]。表明探测器的光谱数据受到小行星表

面地形、颗粒尺寸与仪器偏差等多种效应的影响, 不应直接将小行星遥感光谱与实验室陨石样品光谱进行光谱形态类比研究。未来的研究应关注于不随观测条件差异变化的光谱特征, 如3 μm带的-OH吸收峰, 吸收中心位置仅与层状硅酸盐中铁镁占比有关。结合先前对碳质球粒陨石中3 μm带吸收特征与蚀变程度变化规律的分析, 本文认为部分位于主带的CI类小行星母体普遍经历了更程度的水蚀变, 但其在后续热演化过程中经历了强烈的热变质过程。此外, 结合对CM2陨石中层状硅酸盐占比与3 μm带中心的研究, 本文认为Bennu样品相对Ryugu样品更富铁绿锥石。

4 结论

小行星的水蚀变光谱特征受到多种因素影响, 本文开展了基于碳质球粒陨石水蚀变特征与光谱变异规律的研究, 为探测C类小行星水蚀变特征提供参考。从所选取的15个碳质球粒陨石样品的光谱特征分析得出如下结论。

- 1) 碳质球粒陨石呈现低反射率特征, 在近红外区域为微红色斜率, 3 μm吸收带为区分水蚀变碳质球粒陨石最显著的光谱特征。
- 2) 3 μm带的吸收中心与吸收深度具有相关性, 随水蚀变增加, 3 μm带吸收中心向短波方向移动, 吸收深度加深, 指示了富镁层状硅酸盐等含水蚀变矿物的增加。
- 3) 6 μm吸收带的吸收深度随蚀变程度增加而增加, 这是由于蚀变过程增加碳质球粒陨石的总含水量。相较于3 μm带, 不同蚀变程度碳质球粒陨石的6 μm吸收带中心位置更集中, 但中心位置与蚀变程度没有明显相关性。
- 4) 9~14 μm区域光谱可反映碳质球粒陨石的蚀变程度与层状硅酸盐矿物含量, CK 4陨石在此区域的光谱曲线形态与其它陨石显著不同。此外随蚀变增加, 层状硅酸盐含量增加, 12.4 μm/11.4 μm处反射率比值降低, 反射峰向短波移动。

本文将碳质球粒陨石的光谱学研究与先前岩石学工作结合, 认为3 μm带中心位置可指示碳质球粒陨石中蛇纹石与绿锥石矿物占比, 并将光谱变异规律应用于小行星观测数据, CI群陨石的主带大型小行星在水蚀变后可能经历了更程度的热变质过程, 且预测Bennu样品中含有更多的铁绿锥石类矿物。

对蚀变不充分的层状硅酸盐矿物的了解较少, 未来需要进一步研究碳质球粒陨石的3 μm带、6 μm带与陨石总含水量、层状硅酸盐中不同矿物占比的问题。

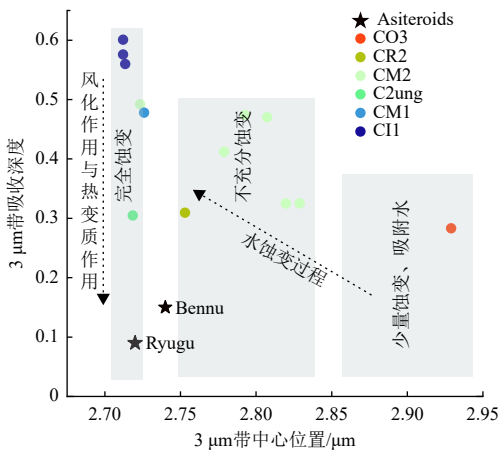


图 12 小行星Ryugu、Bennu的3 μm特征与陨石的3 μm特征的对比
Fig. 12 Comparison of the 3 μm features of asteroids Ryugu and Bennu with CCs

此外,小行星表面复杂的成分以及太空风化会改变反射光谱特征,需要进一步研究水蚀变样品在太空风化与复杂环境下光谱的改变,以促进对小行星天文观测与深空探测数据的解译。

致谢

感谢美国国家航空航天局行星数据系统光谱数据库(PDS Geosciences Node Spectral Library)提供的宝贵光谱数据、日本东京大学综合文化研究科黑川宏之教授、加拿大温尼伯大学地球与行星探索中心Edward A. Cloutis教授的指导。

参 考 文 献

- [1] BATES H C, KING A J, HANNA K L D, et al. Linking mineralogy and spectroscopy of highly aqueously altered CM and CI carbonaceous chondrites in preparation for primitive asteroid sample return[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2020, 1(71-101): 13411.
- [2] 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.
- [3] GEHRELS T. Asteroids III[M]. Tucson, AZ: University of Arizona Press, 2002.
- [4] AMELIN Y, KROT A N, HUTCHEON I D, et al. Lead isotopic ages of chondrules and calcium-aluminum-rich inclusions[J]. *Science*, 2002, 297(5587): 1678-1683.
- [5] BINZEL R P, GEHRELS T, MATTHEWS M S. Asteroids II[M]. Tucson, AZ: The University of Arizona Press, 1989.
- [6] ALEXANDER C M O, BOWDEN R, FOGEL M L, et al. The provenances of asteroids, and their contributions to the volatile inventories of the terrestrial planets[J]. *Science*, 2012, 337(6095): 721-723.
- [7] MARUYAMA S, EBISUZAKI T, KUROKAWA K. Origin and evolution of Earth and life: towards the establishment of astrobiology from universe to genome[C]//Proceedings of Frontier Research in Astrophysics – III — PoS(FRAPWS2018). Mondello (Palermo), Italy: Sissa Medialab, 2019.
- [8] BECK P. Hydrous mineralogy of CM and CI chondrites from infrared spectroscopy and their relationship with low albedo asteroids[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2010, 74(16): 4881-4892.
- [9] TAKIR D, EMERY J P, MCSWEEN H Y, et al. Nature and degree of aqueous alteration in CM and CI carbonaceous chondrites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2013, 48(9), 1618-1637.
- [10] BECK P, GARENNE A, QUIRICO E, et al. Transmission infrared spectra (2–25 μm) of carbonaceous chondrites (CI, CM, CV-CK, CR, C2 ungrouped): mineralogy, water, and asteroidal processes[J]. *Icarus*, 2014, 229: 263-277.
- [11] GARENNE A. Bidirectional reflectance spectroscopy of carbonaceous chondrites: Implications for water quantification and primary composition[J]. *Icarus*, 2016, 264: 172-183.
- [12] KING A J. Characterising the CI and CI-like carbonaceous chondrites using thermogravimetric analysis and infrared spectroscopy[J]. *Earth, Planets and Space*, 2015, 67: 198.
- [13] RUSSELL C T, RAYMOND C A. The Dawn mission to Vesta and Ceres[J]. *Space Science Reviews*, 2011, 163(1): 3-23.
- [14] LAURETTA D S, BALRAM-KNUTSON S S, BESHORE E, et al. OSIRIS-REx: sample return from Asteroid (101955) Bennu[J]. *Space Science Reviews*, 2017, 212(1): 925-984.
- [15] TSUDA Y, YOSHIKAWA M, ABE M, et al. System design of the Hayabusa 2—asteroid sample return mission to 1999 JU3[J]. *Acta Astronautica*, 2013, 91: 356-362.
- [16] LEVISON H F, OLKIN C, NOLL K S, et al. Lucy: surveying the diversity of the trojan asteroids: the fossils of planet formation[C]//Proceedings of 48th Annual Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas: [s. n.]: 2017.
- [17] CANTILLO D C, REDDY V, SHARKEY B N L, et al. Constraining the regolith composition of Asteroid (16) Psyche via laboratory visible near-infrared spectroscopy[EB/OL]. (2021)[2022-08-19]. <https://doi.org/10.3847/PSJ/abf63b>.
- [18] HIROI T, ZOLENSKY M E, PIETERS C M. The Tagish Lake meteorite: a possible sample from a d-type asteroid[J]. *Science*, 2001, 293(5538): 2234-2236.
- [19] GILMOUR C M, HERD C D K, BECK P. Water abundance in the Tagish Lake meteorite from TGA and IR spectroscopy: evaluation of aqueous alteration[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2019, 54(9): 1951-1972.
- [20] CLARK R N. Detection of adsorbed water and hydroxyl on the Moon[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 562-564.
- [21] LI S, LUCEY P G, MILLIKEN R E, et al. Direct evidence of surface exposed water ice in the lunar polar regions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(36): 8907-8912.
- [22] MILLIKEN R E, MUSTARD J F. Estimating the water content of hydrated minerals using reflectance spectroscopy II. effects of particle size[J]. *Icarus*, 2007, 189(2): 574-588.
- [23] MILLIKEN R E, MUSTARD J F. Estimating the water content of hydrated minerals using reflectance spectroscopy I. effects of darkening agents and low-albedo materials[J]. *Icarus*, 2007, 189(2): 550-573.
- [24] DUAN A, WU Y, CLOUTIS E A, et al. Heating of carbonaceous materials: insights into the effects of thermal metamorphism on spectral properties of carbonaceous chondrites and asteroids[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2021, 56(11): 2035-2046.
- [25] SIMON A A, KAPLAN H H, HAMILTON V E, et al. Widespread carbon-bearing materials on near-Earth asteroid (101955) Bennu[J]. *Science*: 2020, 370(6517): eabc3522.
- [26] HONNIBALL C I. Molecular water detected on the sunlit Moon by SOFIA[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(2): 121-127.
- [27] BATES H C, HANNA K L D, KING A J, et al. A spectral investigation of aqueously and thermally altered CM, CM - An, and CY chondrites under simulated asteroid conditions for comparison with OSIRIS - REX and Hayabusa2 observations[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2021, 126(7): e2021JE006827.
- [28] BECK P, MATORILLI A, GARENNE A, et al. What is controlling the reflectance spectra (0.35-150 μm) of hydrated (and dehydrated) carbonaceous chondrites?[J]. *Icarus*, 2018, 13: 124-138.
- [29] RUBIN A E, TRIGO-RODRÍGUEZ J M, HUBER H, et al. Progressive aqueous alteration of CM carbonaceous chondrites[J]. *Geochimica et*

- Cosmochimica Acta*, 2007, 71(9): 2361-2382.
- [30] HOWARD K T, BENEDIX G K, BLAND P A, et al. Modal mineralogy of CM2 chondrites by X-ray diffraction (PSD-XRD). part 1: total phyllosilicate abundance and the degree of aqueous alteration[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2009, 73(15): 4576-4589.
- [31] MILLIKEN R E, HIROI T, PATTERSON W. The NASA Reflectance Experiment Laboratory (RELAB) facility: past, present, and future[C]//Proceedings of 47th Annual Lunar and Planetary Science Conference. The Woodlands, Texas: NASA, 2016.
- [32] CLOUTIS E A, HUDON P, HIROI T, et al. Spectral reflectance properties of carbonaceous chondrites: 2. CM chondrites[J]. *Icarus*, 2011, 216(1): 309-346.
- [33] MCADAM M M. Aqueous alteration on asteroids: linking the mineralogy and spectroscopy of CM and CI chondrites[J]. *Icarus*, 2015, 245: 320-332.
- [34] BROWNING L B, MCSWEEN H Y, ZOLENSKY M E. Correlated alteration effects in CM carbonaceous chondrites[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1996, 60(14): 2621-2633.
- [35] BROWNING L, MCSWEEN JR. H Y, ZOLENSKY M E. On the origin of rim textures surrounding anhydrous silicate grains in CM carbonaceous chondrites[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2000, 35(5): 1015-1023.
- [36] LEBOWSKY L A. Infrared reflectance spectra of asteroids: a search for water of hydration[J]. *The Astronomical Journal*, 1980, 85: 573-585.
- [37] RIVKIN A S, DAVIES J K, JOHNSON J R, et al. Hydrogen concentrations on C-class asteroids derived from remote sensing[J]. *Meteoritics & Planetary Science*, 2003, 38(9): 1383-1398.
- [38] TAKIR D, EMERY J P. Outer Main Belt asteroids: Identification and distribution of four 3- μ m spectral groups[J]. *Icarus*, 2012, 219(2): 641-654.
- [39] HOWELL E, RIVKIN A, SODERBERG A, et al. Aqueous alteration of asteroids: correlation of the 3 μ m and 0.7 μ m hydration bands[J]. *Bulletin of the American Astronomical Society*, 1999, 31: 1074.
- [40] VILAS F. A cheaper, faster, better way to detect water of hydration on solar system bodies[J]. *Icarus*, 1994, 111(2): 456-467.
- [41] USUI F, HASEGAWA S, OOTSUBO T, et al. AKARI/IRC near-infrared asteroid spectroscopic survey: AcuA-spec[EB/OL]. [2023-02-27]. <https://academic.oup.com/pasj/article/doi/10.1093/pasj/psy125/5238131>.
- [42] 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.
- [43] BECK P, QUIRICO E, SEVESTRE D, et al. Goethite as an alternative origin of the 3.1 μ m band on dark asteroids[J]. *Astronomy & Astrophysics*, 2011, 526: A85.
- [44] KUROKAWA H, SHIBUYA T, SEKINE Y, et al. Distant formation and differentiation of outer main belt asteroids and carbonaceous chondrite parent bodies[J]. *AGU Advances*, 2022, 3(1): e2021AV000568. DOI:10.1029/2021AV000568.
- [45] 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.
- [46] GALIANO A, PALOMBA E, D'AMORE M, et al. Characterization of the Ryugu surface by means of the variability of the near-infrared spectral slope in NIRS3 data[J]. *Icarus*, 2020, 351: 113959.
- [47] KITAZATO K, MILLIKEN R E, IWATA T, et al. Thermally altered subsurface material of asteroid (162173) Ryugu[J]. *Nature Astronomy*, 2021, 5(3): 246-250.
- [48] HAMILTON V E, SIMON A A, CHRISTENSEN P R, et al. Evidence for widespread hydrated minerals on asteroid (101955) Bennu[J]. *Nature Astronomy*, 2019, 3(4): 332-340.
- [49] 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.
- [50] AMANO K, MATSUOKA M, NAKAMURA T, et al. Reassigning CI chondrite parent bodies based on reflectance spectroscopy of samples from carbonaceous asteroid Ryugu and meteorites[J]. *Science Advances*, 2023, 9(49): eadi3789.
- [51] NAKAMURA T, MATSUMOTO M, AMANO K, et al. Formation and evolution of carbonaceous asteroid Ryugu: direct evidence from returned samples[J]. *Science*, 2022, 379(6634): eabn8671.

作者简介:

余金霏(1997-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 碳质小行星与碳质球粒陨石。

通信地址: 江苏省南京市栖霞区元化路10号, 中国科学院紫金山天文台(210023)

电话: 15912550661

E-mail: yjf1918@mail.ustc.edu.cn

赵海斌(1975-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 太阳系天体观测研究。**本文通信作者。**

通信地址: 江苏省南京市栖霞区元化路10号, 中国科学院紫金山天文台(210023)

电话: 15312042848

E-mail: meteorzh@pmo.ac.cn

Spectroscopic Study of Aqueous Alteration of Asteroids Based on Carbonaceous Chondrites

YU Jinfei^{1,2,3}, ZHAO Haibin^{1,2,4}, WU Yunzhao^{1,4}

(1. Key Laboratory of Planetary Sciences, Purple Mountain Observatory, Chinese Academy of Science, Nanjing 210023, China;

2. School of Astronomy and Space Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;

3. Department of General Systems Studies, Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3-8-1 Komaba, Meguro-ku, Tokyo 153-8902, Japan; 4. Center for Excellence in Comparative Planetology, Chinese Academy of Science, Hefei 230026, China)

Abstract: The aqueous alteration spectral features of carbonaceous chondrites were studied for future volatile-rich asteroids exploration and remote sensing. The 1-20 μm infrared spectral features and petrographic characteristics of 15 carbonaceous chondrites with different alteration degrees were analyzed, and the spectral variation laws of the aqueous alteration were summarized. The findings demonstrate that as the degree of alteration of carbonaceous chondrites increases, the 3 μm absorption band, which indicates phyllosilicates and water molecules, and the 6 μm absorption band, which indicates only water molecules, both features increasing in strength and absorption centers shift to the short-wave. With more alteration, the 3 μm absorption band sharpens and resembles serpentine's 3 μm absorption feature. However, as the degree of alteration increases, the 6 μm absorption band shape does not significantly change. The degree of alteration also affects the spectral shape of the 10-13 μm region. This region indicates silicate features. The 12.4 μm /11.4 μm reflectance ratio reduces as a result of the conversion of anhydrous silicates to phyllosilicates. Also discuss possible effects that the spectra and parameters discovered during this study may have on the outcomes from asteroids.

Keywords: asteroid; spectrum; spectroscopy; mineralogy

Highlights:

- Analysis of the NIR-MIR spectral variation laws of aqueous alteration.
- A series of carbonaceous chondrites reflecting the sequence of the degree of aqueous alteration were selected for spectroscopic study.
- Revealed the connection between spectral features variations and petrological characteristics.

[责任编辑: 宋宏, 英文审校: 宋利辉]