

# 利用CRISM数据探测火星表面含水矿物及其演化

杨懿<sup>1, 2</sup>, 金双根<sup>1</sup>, 薛岩松<sup>1</sup>

(1. 中国科学院 上海天文台, 上海 200030; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 火星表层矿物识别是了解火星大气环境变化、表层地质环境的关键因素。通过确定火星表层矿物, 分析矿物特性, 了解火星的环境状态、地质演化以及火星的未来适居性。火星勘测轨道器 (Mars reconnaissance orbiter, MRO) 上搭载的紧凑型侦察成像仪 (compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars, CRISM) 是针对火星矿物探测的最新的高光谱成像仪, 以很高的光谱分辨率覆盖可见光至近红外波段, 为火星表面的矿物分布及区域填图提供了可能。通过光谱匹配及计算CRISM光谱参数综合产品, 分析了火星Jezero以及Holden撞击坑内的矿物成分及其演化。Jezero与Holden因其复杂而关键的地质特征, 被列为火星2020登陆任务的备选登陆点。对这两个地点的矿物探测与填图分析不仅可进一步分析火星典型地质特征以及演化, 而且还可以为未来的火星登陆点分析提供现实意义。在研究区域已检测到与水成蚀变相关的含水硅酸盐类以及碳酸盐类与含水硫酸盐类。水合矿物增加了这些区域曾经含水的可能性, 且矿物的多样性表明研究区地质环境经历了不同的变化, 其中Jezero地区不同于火星的绝大多数地区从中性环境到酸性环境的演化, 有可能经历了从中性环境到碱性环境的演化。

**关键词:** 火星; 高光谱遥感; 矿物识别; CRISM

**中图分类号:** P575.4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 2095-7777(2016)02-0187-08

**DOI:** 10.15982/j.issn.2095-7777.2016.02.015

**引用格式:** 杨懿, 金双根, 薛岩松. 利用CRISM数据探测火星表面含水矿物及其演化[J]. 深空探测学报, 2016, 3 (2) : 187-194.

**Reference format:** Yang Y, Jin S G, Xue Y S. Identification and geological evolution of hydrated minerals at Holden and Jezero impact craters, Mars using MRO CRISM hyperspectral data [J]. Journal of Deep Space Exploration, 2016, 3 (2) : 187-194.

## 0 引言

火星表层矿物是火星大气环境变化、表层地质演化以及古水环境作用下的产物<sup>[1]</sup>, 是探索火星内部及表层的关键因素。通过确定火星表层矿物, 分析矿物特性, 可以了解火星的环境状态和地质演化。

人类对火星的研究从早期的望远镜观测, 发展到现今的轨道器与着陆器探测, 经历了飞越计划, 积累了大量经验与研究成果。对于火星表面的矿物, 最早由火星环球探测器 (Mars global surveyor, MGS) 上的热辐射光谱仪 (thermal emission spectrometer, TES) 探测发现了大量赤铁矿<sup>[2]</sup>, 这也是火星呈现出红色的原因。后来“奥德赛号” (Mars odyssey) 上的热辐射仪 (THEMIS) 以及“火星快车” (Mars express) 上的OMEGA (Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité) 提供了火星部分区域更为详细的矿物结果, 探测出了硅酸盐、硫酸盐等。NASA的科学家也根据OMEGA的发现将火星地质年代按其矿

物分布划分为3个时期: 硅酸盐纪、硫酸盐纪、菱铁矿纪<sup>[3-7]</sup>。迄今为止, “勇气号”“机遇号”“好奇号”火星探测车陆续提供了火星局部区域表面矿物的矿物学分析并确认了火星表面曾经存在液态水, 为人类进一步研究火星的宜居性及寻找生命提供了实验依据。尽管实地探测可以提供最直接的矿物信息, 但这种探测方式在空间面积覆盖上有很大的局限性。由于遥感手段在地质学方面的成功应用, 加之其在行星探测领域的广泛应用, 利用光谱学探测行星表面成为各国火星任务的首选, 从火星探测器上传回的大量光谱数据弥补了实地探测的不足。

搭载在MRO上的传感器CRISM是迄今为止针对火星表面的光谱分辨率最高的成像仪。它的科学目的主要在于探测并识别火星表面矿物, 通过分析矿物学特征可得到火星表面的地质概况及演化历史。CRISM的参数特征主要有: 孔径: 10 cm、焦距: 4.41 cm、瞬时视场: 0.0035°、光谱覆盖范围: 可见光波段 (visible

insight spectra, VIS) 以8 nm/信道覆盖波长400~830 nm、近红外波段(infra-red, IR)以7 nm/信道覆盖波长830~4 050 nm、空间分辨率为15.7~19.7 m/pixel, 是现今针对火星探测中光谱分辨率最优的探测器。CRISM具有2种探测模式: 1) 在72个信道上以200 m/pixel的空间分辨率覆盖全球的探测; 2) 在全部544个信道上以15~38 m/pixel的高精度空间分辨率对特定区域进行探测。CRISM的数据类型分为L波段数据和S波段数据。其中, S类型覆盖范围为0.36~1.05  $\mu\text{m}$  而L类型覆盖1.0~3.9  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>。

CRISM波段覆盖范围广与光谱分辨率高的优点, 使它成为利用高光谱数据探测火星表面矿物特征并深入研究火星古环境的利器。

## 1 地质背景

地貌单元的变化反映了矿物沉淀环境的变化, 而后者与行星气候以及水环境密切相关。

Holden撞击坑位于火星南部高地的高密度的山谷网中(26.4°S, 34.0°W), 是一个直径为150 km、结构复杂且起源于火星诺亚纪的撞击坑。Holden撞击坑非常古老, 内部包含着许多充满矿物沉淀的小撞击坑。

Jezero撞击坑位于火星北半球的大流沙地带(18.85°N, 77.52°E), 直径约为49 km。Jezero撞击坑处的扇形三角洲地地带曾经探测到粘土矿物, 因此增加了这片区域曾经含水或存在生命的可能性。

Jezero撞击坑和Holden撞击坑是火星2020年登陆任务的备选登陆点。因为它们的地形形成较复杂, 对它们的矿物探测对火星历史气候变化以及古环境的研究

有很大的帮助, 而且具有现实意义, 它们在火星上位置如图1所示。

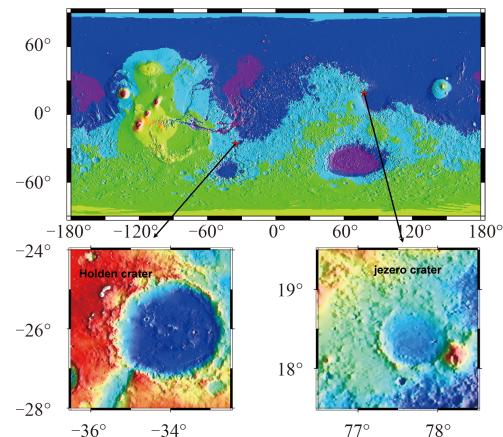


图1 Jezero和Holden在火星的位置图

Fig. 1 The location maps of Jezero and Holden in Mars

## 2 数据处理

### 2.1 数据预处理

用CRISM的VNIR(可见光至近红外)高光谱反射数据来进行处理和分析。

火星大气的组成中, 二氧化碳的体积比占95.32%, 是最主要组成成分。地面的反射光谱仪探测到大量在2~4  $\mu\text{m}$  范围内的吸收线是由二氧化碳造成的。为消除二氧化碳对光谱带的影响, 用经典的火山大气扫描方法<sup>[8-10]</sup>。即利用同时获取火星最高山奥林匹斯山(约2 000~3 000 m)山顶和山脚的光谱, 利用CRISM团队建立的传输模型, 对图像进行大气校正, 如图2所示。

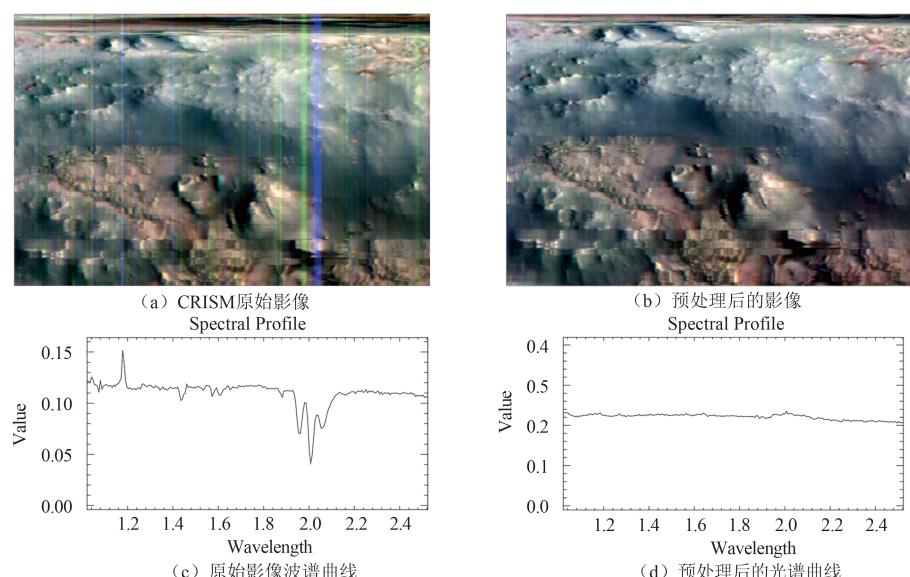


图2 CRISM原始数据以及预处理之后的影像图与波谱曲线图

Fig. 2 Remote sensing image and spectral graph of CRISM raw data and corrected data

CRISM数据还需要进行光学校正。利用太阳入射角的余弦值进一步校正非正常光照误差<sup>[11-12]</sup>，除此之外，去除尖峰噪音和条带噪音。在一系列的误差校正后，对图像进行地图投影，匹配其地理坐标。

## 2.2 光谱数据处理

任何物质其光谱的产生都有严格的物理机制，分子能量由电子能量、振动能量和转动能量组成。对于矿物晶体来说，转动能量不存在，根据理论计算，振动能级之间的能量差一般在0.25~1.00 eV之间，其相应的光谱出现在近中红外区域。岩石与矿物在0.4~1.3  $\mu\text{m}$ 之间波谱范围内的光谱特征，主要取决于矿物的晶格中存在的过渡性金属元素，在1.3~2.5  $\mu\text{m}$ 波谱范围内的光谱特征则是由矿物组成中的碳酸根、氰基及可能出现的水分子决定的；3~5  $\mu\text{m}$ 的中远红外波段的光谱特征则是由Si-O、Al-O等分子键的振动模式决定的<sup>[13-15]</sup>。矿物成分的波谱曲线显示了各自的吸收、反射等光谱特性。因为地表物质的光谱吸收峰宽度为30 nm左右，所以这些光谱特征只有利用高光谱传感器才能被探测到。

光谱特征可以通过计算每个像元在相应光谱位置的吸收深度来实现参数化<sup>[16]</sup>。根据 $N$ 点处的波长 $\lambda_N$ ，其反射率 $R_N$ ，以及参数

$$\begin{aligned}
 \text{OLINDEX} &= (R1695 / (0.1 \times R1050 + 0.1 \times R1210 + 0.4 \times R1330 + 0.4 \times R1470)) - 1 \\
 \text{LCPINDEX} &= ((R1330 - R1050) / (R1330 + R1050)) \times ((R1330 - R1815) / (R1330 + R1815)) \\
 \text{HCPINDEX} &= ((R1470 - R1050) / (R1470 + R1050)) \times ((R1470 - R2067) / (R1470 + R2067)) \\
 \text{BD1900} &= 1 - ((R1930 + R1985) \times 0.5) / (a \times R1857 + b \times R2067) \\
 \text{BDCARB} &= 1 - (\text{sqrt} [(R2330 / (a \times R2230 + b \times R2390)) \times (R2530 / (c \times R2390 + d \times R2600))]) \\
 \text{BD3000} &= 1 - (R3000 / (R2530 \times (R2530 / R2210))) \\
 \text{D2300} &= 1 - (CR2290 + CR2320 + CR2330) / (CR2140 + CR2170 + CR2210) \\
 \text{D2400} &= 1 - (CR2390 + CR2430) / (CR2290 + CR2320)
 \end{aligned} \tag{4}$$

注1:  $R$ 为反射率, 数字代表波长。如R1695代表波长在1.695  $\mu\text{m}$ 处的光谱反射率。

注2: CR值为在1.8~2.53  $\mu\text{m}$ 之间的观测值 $R$ 除以与斜率相应的值。(可视为基本连续的改正值)

注3: OLINDEX: 橄榄石指示参数; LCPINDEX: 低钙辉石指示参数; HCPINDEX: 高钙辉石指示参数; BDCARB: 碳酸盐指示参数; BD1900: 水分子指示参数; BD2100: 一水化物指示参数; D2300: 层状硅酸盐指示参数; D2400: 硫酸盐指示参数。

探测不同矿物需要不同的参数。对于铁镁质矿物我们选择的参数为：OLINDEX、LCPINDEX、HCPINDEX。对于粘土矿物选择参数BD1900并结合2.3  $\mu\text{m}$ 处的光谱吸收带。对于碳酸盐类选择BDCARB以及BD3000<sup>[16]</sup>。多个光谱参数协同提取重要矿物的光谱曲线，然后根

$$b = (\lambda_C - \lambda_S)/(\lambda_L - \lambda_s) \quad (1a)$$

$$a = 1 - b \quad (1b)$$

根据像素1, 2点以及连续性公式计算出的值

$$R_{C*} = (a * R_S + b * R_L), \quad (2)$$

可以计算出光谱吸收深度值（BD值），其计算公式为

$$\text{BD} = 1 - R_C/R_{C*} \quad (3)$$

通过参数化，每景数据在每个波段位置可以生成一个二维矩阵，该矩阵的元素为对应像元在相应波段上的吸收深度。然后，针对目标矿物的诊断光谱，选取相应矩阵做叠置分析，以获取目标矿物填图，同时提取在整个图像结果中呈正向的像素的综合光谱做进一步的光谱分析以便确认相应矿物。粘土矿物（含水硅酸盐）以及碳酸盐等含水盐类矿物和水的关系最为密切，是本文研究的重点。此外，其他与水环境相关的硫酸盐类也是研究的热点。

选取S.M. Pelkey等<sup>[16]</sup> (2007) 提出的CRISM综合产品中具有代表性的6种光谱参数来评估矿物的分布。这些参数主要针对铁镁质矿物以及它们的次生蚀变产物，包括层状硅酸盐、硫酸盐和碳酸盐。具体参数表 达为

据高光谱数据的特征选择与提取并与实验室光谱匹配后可以确定矿物。

在产品综合计算完成之后，主要应用遥感学手段，即基于高光谱数据库的光谱匹配技术加以辅助判断：光谱角填图（spectral angle mapper, SAM）以及光谱特征拟合（spectral feature fitting, SFF）。SAM通过计算一个测量光谱与一个参考光谱之间的角度来确定两者之间的相似性。SFF通过测量均方根（root mean square, RMS）拟合误差来衡量与波谱库的匹配程度，输入的最小值和最大值都用RMS拟合误差来表示<sup>[13]</sup>。

### 3 结果分析

### 3.1 处理结果

寻找与水作用相关的矿物是火星表层探测的主要

科学目的,这些矿物既可能是在含有水的条件才能生成,又可能是其本身与水相伴生。前者可以解释火星过去的适居性,后者则能够为在火星表面寻找生命迹象提供有价值的参考。其中,含水硅酸盐类、碳酸盐类以及含水硫酸盐和水的关系最为密切。

Jezerro地区的矿物结果主要以硅酸盐和碳酸盐为主,阳离子主要有钙、铁、镁,具体成分包括高岭石、辉石、方解石等。Holden地区探测出硅酸盐以及以黄钾铁矾为主的硫酸盐。阳离子主要有钙、铁、铝。Jezerro和Holden地区分别探测矿物如表1和表2所示。

表1 Holden地区探测矿物明细

Table 1 The mineral detail in Holden impact craters

名称	化学式	分类
黄钾铁 (Jarosite)	KFe <sub>3</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (OH) <sub>6</sub>	硫酸盐 (Sulfate)
伊利石 (Illite)	(Al, Mg, Fe) <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>4</sub> O <sub>10</sub> [(OH) <sub>2</sub> , (H <sub>2</sub> O)]	
蛇纹 (Serpentine)	(Mg, Fe, Ni) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	
辉石 (Pyroxene)	(Ca, Mg, Fe, Al) <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	硅酸盐 (Silicate)
高岭石 (Kaolinite)	Al <sub>2</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	
钙 (Wollastonite)	CaSiO <sub>3</sub>	
赤铁矿 (Hematite)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	氧化物 (Oxide mineral)

表2 Jezerro地区探测矿物明细

Table 2 The mineral detail in Jezerro impact craters

名称	化学式	分类
文石 (Aragonite)	CaCO <sub>3</sub> (文石与方解石为同质多像)	
菱镁 (Magnesite)	MgCO <sub>3</sub>	碳酸盐
方解石 (Calcite)	CaCO <sub>3</sub>	Carbonate
辉石 (Pyroxene)	(Ca, Mg, Fe, Al) <sub>2</sub> (Si, Al) <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	
镁橄榄石 (Forsterite)	(Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> )	
高岭石 (Kaolinite)	Al <sub>4</sub> [Si <sub>4</sub> O <sub>10</sub> ] <sub>4</sub> •(OH) <sub>8</sub>	硅酸盐
蛇纹石 (Serpentine)	(Mg, Fe, Ni) <sub>3</sub> Si <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (OH) <sub>4</sub>	Silicate
沸石 (Zeolites)	Am <sub>x</sub> O <sub>2p</sub> •nH <sub>2</sub> O	

## 3.2 结果分析

因为不同矿物抗风化的能力各不相同,因此一般情况下:硫化物、碳酸盐最易风化;硅酸盐、氧化物较稳定,尤其是具层状结构、富含水及高价态的变价元素的氧化物和硅酸盐<sup>[17]</sup>。

### 3.2.1 粘土矿类(以Holden地区结果为例分析)

一些硅铝酸盐矿物,当它们暴露在水或空气中时,经过一定的化学变化蚀变成为次生矿物,一些矿物的晶体中会结合水分子或者OH根,变成水合矿物<sup>[18-19]</sup>。在研究区域探测到的层状硅酸盐有高岭石族、蛇纹石族等。水合矿物的发现进一步为该地区曾经有水提供了矿物学证据。

在综合产品参数中选择BD1900、BD2100、D2300以及D2400作为计算参数。BD1900计算了1.9 μm处的吸收特征,是水分子的依据。BD2100计算了2.1 μm处的吸收特征,是一水化物的探测依据。D2300计算了2.3 μm处的吸收深度,这个吸收谷因为金属-氢氧根的振动作用形成<sup>[18]</sup>,通常指示着层状硅酸盐。D2400计算了2.4 μm处的吸收深度,通常指示硫酸盐<sup>[16]</sup>。利用这几个参数,可以分辨出部分粘土矿物。

图3中,计算出BD2100、D2300和D1900参数结果并分别赋予红色、绿色和蓝色通道,得到水合矿物填图。然后利用SAM填图结果并与上图计算重合区域的平均波谱曲线。对比其吸收特征,得到矿物成分的确认。

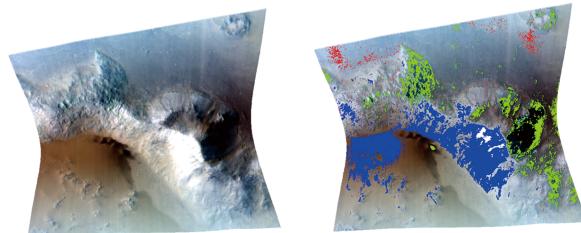


图3 CRISM原始数据(Holden地区frt0000580c)以及其粘土矿填图

Fig. 3 CRISM raw data and Kaolinite-bearing in Holden region

图4中矿物的光谱吸收位置分别为1.4、1.9,以及2.2~2.4 μm之间的区域。其中,1.4、1.9 μm处为粘土矿物诊断依据。

图5中可以看出,区域光谱曲线在1.42、1.91、2.22 μm有明显吸收带,另外在接近2.5 μm处有吸收特征,根据阳离子分布特征可以区分出这是伊利石<sup>[18]</sup>,且对比伊利石实验室光谱吸收位置可得到准确结果。

图6区域光谱曲线在1.4 μm和2.2 μm处分别有2个强吸收带。其中在1.39 μm和1.42 μm有双吸收特征,在2.16 μm和2.23 μm也有双吸收特征。1.4 μm处的强吸收带源自四面体片(O)和八面体片(T)层间的羟基

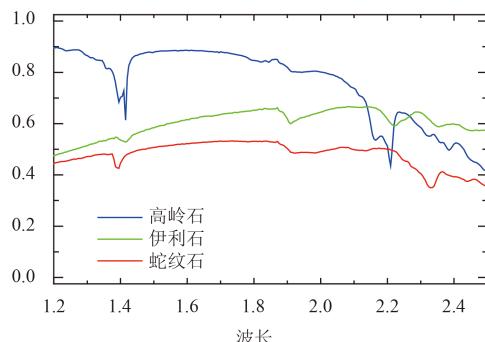


图4 粘土矿物波谱曲线图 (高岭石: 蓝色; 伊利石: 绿色; 蛇纹石: 红色)

Fig. 4 Spectral graph of clay (Kaolinite: blue; Illite: green; Serpentine: red)

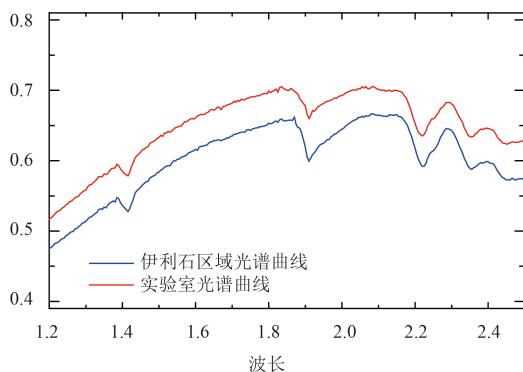


图5 伊利石区域光谱曲线（蓝）与实验室光谱曲线（红）

Fig. 5 Region spectral graph (blue) and laboratory spectrum (red) of Illite

团振动。2.2  $\mu\text{m}$ 附近的吸收带由2Al-OH振动的组合频吸收形成<sup>[20]</sup>。所以推测此区域属于高岭石族。且对比高岭石实验室光谱吸收位置可得到准确结果。

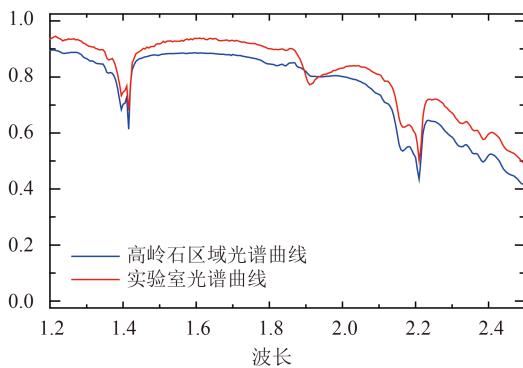


图6 高岭石区域光谱曲线（蓝）与实验室光谱曲线（红）

Fig. 6 Region spectral graph (blue) and laboratory spectrum (red) of Kaolinite

图7区域光谱曲线在2.32  $\mu\text{m}$ 有主吸收频, 另外在接近1.40、1.90  $\mu\text{m}$ 有水分子吸收特征, 另外2.11  $\mu\text{m}$ 和2.51  $\mu\text{m}$ 处有两个非常轻微的特征, 是2.32  $\mu\text{m}$ 的附加特征。其中2.32  $\mu\text{m}$ 的强特征是Mg-OH振动的组合频

吸收所形成, 因此可以说明是含镁蛇纹石。且对比蛇纹石实验室光谱吸收位置可得到准确结果。

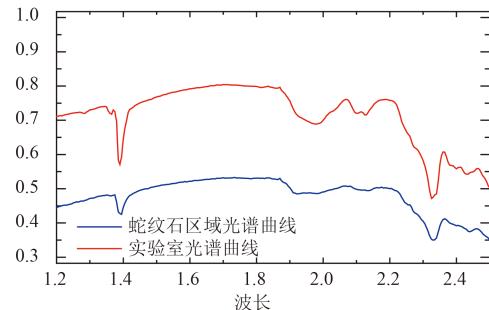


图7 蛇纹石区域光谱曲线（蓝）与实验室光谱曲线（红）

Fig. 7 Region spectral graph (blue) and laboratory spectrum (red) of Serpentine

因此, 在Holden地区frt0000580c号图幅区域探测出的粘土矿有高岭石(蓝色曲线), 伊利石(绿色曲线), 蛇纹石(红色曲线), 如图8所示。

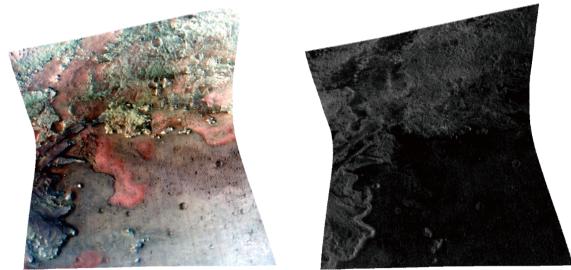


图8 CRISM原始数据 (Jezero地区frt000047a3) 以及其BDCARB参数计算图

Fig. 8 Remote sensing image and BDCARB graph of Jezero

### 3.2.2 碳酸盐类 (以Jezero地区结果为例分析)

碳酸盐在地球上是一种常见的多样化矿物沉淀, 但在火星探测中, 碳酸盐因其通常是液态水存在的证据, 成为探测热点。碳酸盐在光谱吸收中呈现出双吸收谷特征<sup>[21]</sup>, 它们分别在2.3、2.5以及3.5~3.9  $\mu\text{m}$ 处。碳酸盐矿物结构里的CO<sub>3</sub>振动造成了碳酸盐类矿物在2.3  $\mu\text{m}$ 和2.5  $\mu\text{m}$ 的吸收带, 吸收带的精确位置会因为其最主要的阳离子的不同而有轻微不同<sup>[22-23]</sup>。对比粘土矿物的主要诊断光谱都在1.0~2.6  $\mu\text{m}$ , 碳酸盐在3.5~3.9  $\mu\text{m}$ 处有一对强且宽的吸收带, 特别是3.4  $\mu\text{m}$ 与3.9  $\mu\text{m}$ 之间, 但是对于火星来说, 2.3  $\mu\text{m}$ 和2.5  $\mu\text{m}$ 处的吸收特征是识别碳酸盐的主要诊断标准<sup>[24-26]</sup>。

在前期预处理后的数据上计算碳酸盐综合产品BDCARB, 较明亮的地区代表碳酸盐露头, 对图像进行直方图改正, 得到对比更加明显的明暗对比特征。

对比其波谱曲线, 根据2.31、2.51以及3.4~3.9  $\mu\text{m}$ 处碳酸盐吸收特征分析其可靠性。对上述露头地区进行SAM和SFF特征匹配, 匹配出具体矿物类型。

鉴于CRISM数据本身在2.65  $\mu\text{m}$ 处有不可避免的断裂，导致整个光谱不连续，因此我们在断裂带对碳酸盐的光谱分开处理，分为1.02~2.50  $\mu\text{m}$ 和3.0~3.92  $\mu\text{m}$ 2个部分处理。

在图9红色、浅绿色和水蓝色表示的区域探测矿物有方解石（图10蓝色曲线）、菱镁矿（图10绿色曲线）、以及文石（图10红色曲线）。

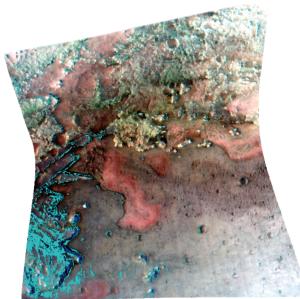


图9 Jezero地区frt000047a3图幅碳酸盐分布图  
Fig. 9 Carbonate-bearing in Jezero

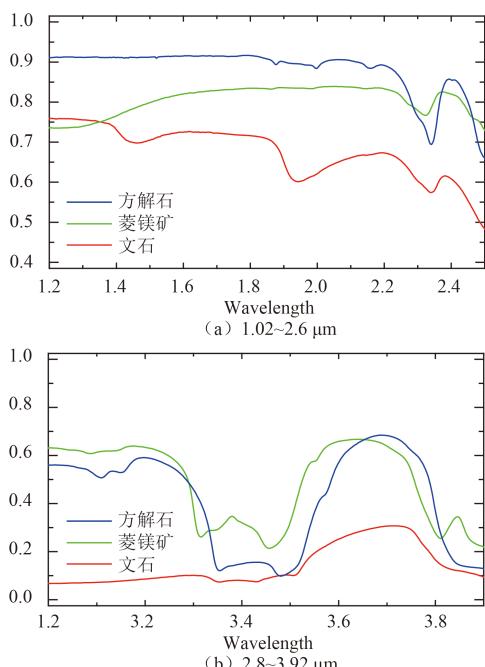


图10 Jezero地区碳酸盐（方解石：蓝色；菱镁矿：绿色；文石：红色）光谱曲线图  
Fig. 10 Spectral graph of Carbonate (Calcite: blue; Magnesite: green; Aragonite: red)

图中波谱曲线中2.3  $\mu\text{m}$ 附近和2.5  $\mu\text{m}$ 附近处的碳酸盐吸收特征很明显，不同矿物根据其阳离子性状不同有轻微位移，均符合碳酸盐类诊断标准。在1.9  $\mu\text{m}$ 处为含水参考特征，方解石和菱镁矿较明显。在2.8~3.92  $\mu\text{m}$ 的波谱曲线分析中，碳酸盐与有机物特征非常明显。方解石特征在3.40  $\mu\text{m}$ 处有双吸收特征，在3.9  $\mu\text{m}$

处也有吸收特征、菱镁矿吸收特征分布在3.42  $\mu\text{m}$ 与3.9  $\mu\text{m}$ 、文石吸收特征分布在3.44  $\mu\text{m}$ 和3.9  $\mu\text{m}$ 处，均符合碳酸盐类诊断标准。

因为文石与方解石互为同质多像，在自然界中很容易蚀变成为方解石，因此在最后结果（表2）中把文石归为方解石统计。

### 3.2.3 其他矿物填图-橄榄石，辉石（以Jezero地区结果为例分析）

在识别铁镁质矿物时，可以利用OLINDEX、LCPINDEX和HCPINDEX综合参数来计算。这3种参数指代了火星上常见的铁镁质矿物：橄榄石，低钙辉石和高钙辉石。在填图后提取区域谱线进行分析。

辉石主要具有1  $\mu\text{m}$ 和2  $\mu\text{m}$ 两个明显吸收带，随着钙含量的增加，吸收中心向长波方向偏移。选取以顽火辉石(enstatite)为代表的低钙辉石波谱曲线（蓝色曲线），以透辉石(diopside)为代表的高钙辉石波谱曲线（红色曲线），分析图11中辉石区域波谱曲线（绿色曲线）。

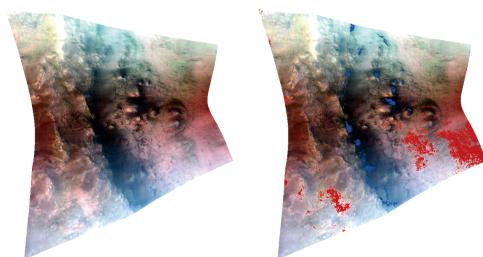


图11 CRISM原始数据（Jezero地区frt00005850图幅）以及橄榄石（蓝），辉石（红）矿物填图  
Fig. 11 CRISM raw data and olivine (blue), pyroxene (red) in Holden region

图12中顽火辉石的吸收特征在0.91  $\mu\text{m}$ 和1.88  $\mu\text{m}$ ，而透辉石的吸收特征在1.03  $\mu\text{m}$ 和2.37  $\mu\text{m}$ 。可以看到区域平均波谱曲线具有辉石吸收特征，且与低钙辉石波谱曲线分布类似，认为该地区为低钙辉石。

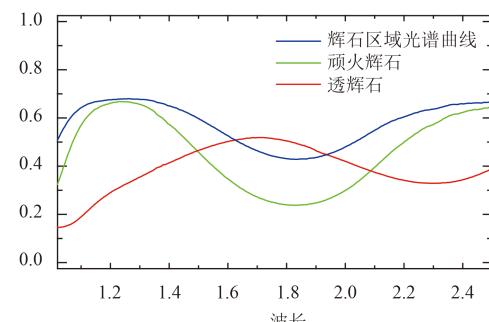


图12 辉石区域光谱曲线（绿色曲线）与实验室光谱曲线（顽火辉石：蓝色曲线；透辉石：红色曲线）  
Fig. 12 Region spectral graph (green) and laboratory spectrum (Enstatite: blue, Diopside: red) of Pyroxene

如13所示, 橄榄石在1 μm附近具有一个复杂的, 且范围较宽的吸收特征。吸收中心强度和宽度会随着铁含量的增加而增加。蓝色地区平均波谱曲线(蓝色曲线)与橄榄石实验室光谱(红色曲线)波谱特征相似, 图11蓝色地区为橄榄石。

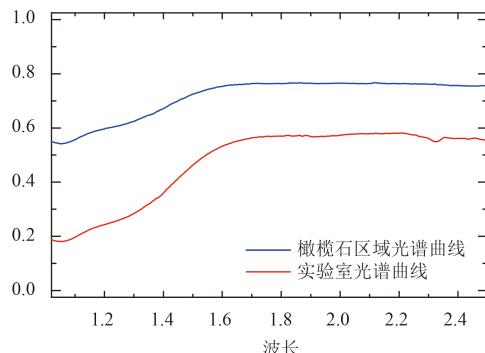


图13 橄榄石区域光谱曲线(蓝色)与实验室光谱曲线(红色)  
Fig. 13 Region spectral graph(blue) and laboratory spectrum(red) of Olivine

## 4 结 论

本文通过CRISM高光谱数据探测到Jezero地区和Holden地区的多种矿物。由于含水层状硅酸盐矿物、碳酸盐矿物和含水硫酸盐类矿物形成于不同的气候条件下, 其中层状硅酸盐矿物和碳酸盐矿物生成于中性到碱性条件的诺亚纪, 而含水硫酸盐多形成于更富酸性环境且火山活动密集的西方纪。这表明Holden地区经历了从中性环境到酸环境的演化, 但是中性的湿润气候较后期的酸性气候持续了更长的时间。由于酸性硫酸盐风化作用会导致碳酸盐的分解, 因此在Jezero地区碳酸盐的大量存在表明尽管酸性硫酸盐风化作用曾在大部分火星表面起主导作用, 但是在这片区域内却并非如此而是经历了不同的演化过程。

## 参 考 文 献

- [1] Barlow N G. Mars: an introduction to its interior, surface and atmosphere[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008, 303.
- [2] 韩同林. 火星地貌与地质[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [3] Han T L. Martian landforms and geology[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007.
- [4] Bibring J P, Soufflot A, Berthé M, et al. OMEGA: Observatoire pour la Minéralogie, l'Eau, les Glaces et l'Activité[J]. Mars Express the Scientific Payload, 2004 (1240) : 37-49.
- [5] Bibring J P, Langevin Y, Gendrin A, et al. Mars surface diversity as revealed by the OMEGA/Mars Express observations[J]. Science, 2005, 307 (5715) : 1576-1581.
- [6] Bibring J P, Langevin Y, Mustard J F, et al. Global mineralogical and aqueous mars history derived from OMEGA/Mars Express data[J]. Science, 2006, 312 (5772) : 400-404.
- [7] Gendrin A, Mangold N, Bibring J P, et al. Sulfates in martian layered terrains: the OMEGA/Mars Express view[J]. Science, 2005, 307 (5715) : 1587-1591.
- [8] Yves L, François P, Bibring J P, et al. Sulfates in the north polar region of Mars detected by OMEGA/Mars express[J]. Science, 2005, 307 (5715) : 1584-1589.
- [9] Murchie S, Arvidson R, Bedini P, et al. Compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on Mars reconnaissance orbiter (MRO) [J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112 (E5) : 431-433.
- [10] Mustard J F, Murchie S L, Pelkey S M, et al. Hydrated silicate minerals on Mars observed by the Mars reconnaissance orbiter CRISM instrument[J]. Nature, 2008, 454 (7202) : 305-309.
- [11] McGuire P C, Bishop J L, Brown A J, et al. An improvement to the volcano-scan algorithm for atmospheric correction of CRISM and OMEGA spectral data[J]. Planetary & Space Science, 2009, 57 (7) : 809-815.
- [12] Murchie S L, Mustard J F, Ehlmann B L, et al. A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars reconnaissance orbiter[J]. Journal of Geophysical Research Planets, 2009, 114 (E2) : 396-412.
- [13] 陈述彭. 遥感地学分析[M]. 北京: 测绘出版社, 1990.
- [14] Chen S P. Geography analysis for remote sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990.
- [15] 浦瑞良, 宫鹏. 高光谱遥感及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [16] Pu R L, Gong P. Hyperspectral remote sensing and its applications[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [17] Zhang L P, Zhang L F. Hyperspectral remote sensing[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 1990.
- [18] Pelkey S M, Mustard J F, Murchie S, et al. CRISM multispectral summary products: parameterizing mineral diversity on Mars from reflectance[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2007, 112 (E8) : 1-18.
- [19] Cabrol N A, Grin E A, Newsom H E, et al. Hydrogeologic evolution of Gale crater and its relevance to the exobiological exploration of Mars[J]. Icarus, 1999, 139 (2) : 235-245.
- [20] Clark R N, King T V V, Klejwa M, et al. High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 1990, 95 (B8) : 12653-12680.
- [21] Arvidson R E, Poulet F, Bibring J P, et al. Spectral reflectance and morphologic correlations in eastern Terra Meridiani, Mars[J]. Science, 2005, 307 (5715) : 1591-1594.
- [22] Giese R F. Kaolin minerals: structures and stabilities[J]. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 1988, 19 (1) : 29-66.
- [23] 张渊智, 安璐, 黄朝君. 基于天空风化的尖晶石二向性反射特性研究[J]. 深空探测学报, 2014, 1 (3) : 210-213.
- [24] Zhang Y Z, An L, Huang Z J. The study of bidirectional reflectance feature of the spinel based on the space weathering[J]. The Journal of Deep Space Exploration, 2014, 1 (3) : 210-213.
- [25] Gaffey S J. Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and

- near infrared (O. 35-2.55 microns) ; calcite, aragonite, and dolomite[J]. American Mineralogist, 1986, 71 (1-2) : 151-162.
- [23] Hunt G R, Salisbury J W. Visible and near infrared spectra of minerals and rocks: II. carbonates[J]. Modern Geology, 1971 (2) : 23-30.
- [24] Ehlmann B L, Mustard J F, Murchie S L, et al. Orbital identification of carbonate-bearing rocks on Mars[J]. Science, 2008, 322 (5909) : 1828-1832.
- [25] Ehlmann B L, Mustard J F, Fassett C I, et al. Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars[J]. Nature Geoscience, 2008, 1 (6) : 355-358.
- [26] Ehlmann B L, Mustard J F, Swayze G A, et al. Identification of hydrated silicate minerals on Mars using MRO - CRISM: geologic context near Nili Fossae and implications for aqueous alteration[J]. Journal of Geophysical Research: Planets, 2009, 114 (10) : 1-33.

作者简介：

杨懿（1990-），女，硕士，主要研究方向：行星表面识别以及行星遥感。

通信地址：上海市徐汇区南丹路80号上海天文台（200030）

电话：（021）34775293

E-mail: yiyang@shao.ac.cn

## Identification and Geological Evolution of Hydrated Minerals at Holden and Jezero Impact Craters Mars Using MRO CRISM Hyperspectral Data

YANG Yi<sup>1, 2</sup>, JIN Shuanggen<sup>1</sup>, XUE Yansong<sup>1</sup>

(1. Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Science, Shanghai 200030, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Identification of mineral components in different regions on the Mars is crucial to understand the Martian geology and environmental changes. By recognizing the Martian surface mineral, the Martian's environment condition and geological evolution can be understood. Meanwhile, it can be used for further exploration of the habitability of the Mars. The compact reconnaissance imaging spectrometer for Mars (CRISM) on the Mars reconnaissance orbiter (MRO) is the most recent hyperspectral imager that has reached the Mars in order to detecting the minerals. The spectrometer covers the wavelength from visible to near infrared along with enhanced spectral resolution, which provides the ability to map the mineralogy on Mars. In this paper, based on the spectrum matching and calculating CRISM summary product, mineral composition and geological evolution of the Jezero and Holden craters on the Mars are analyzed. These two craters were proposed as the candidates of the landing sites for the Mars 2020 mission due to their complex geological characteristics. Therefore, identification of mineral components of these two sites can not only further analyze the typical geological characteristics and evolutions of the climate of Mars, but also provide practical significance for the analysis of future landing sites on the Mars. We have detected several kinds of hydrated minerals including carbonate, hydrated silicate and hydrated sulfate in the study areas. These minerals suggested the possibility that the Holden and Jezero craters have experienced long time water-rock interactions. Also, the diversity of the minerals found in these regions indicates the aqueous activities in multiple distinct environments and the different environment changes in the study areas. For example unlike the dominating environment evolution from neutral to acidic on the Mars, the evolution around the Jezero may be from neutral to alkaline.

**Key words:** Mars; CRISM; hyperspectral; identification of mineral

[责任编辑：杨晓燕]