

项目编号 S202310486411

武汉大学大学生创新创业训练 计划项目结题报告

基于高光谱遥感影像混合像元分解的火星 表面矿物探测研究

院（系）名 称：测绘遥感信息工程国家重点实验室

专 业 名 称 ： 遥感科学与技术、计算机科学与技术

学 生 姓 名 ： 裴席民 向雨航 汪晨倩

指 导 教 师 ： 钟燕飞 教授

二〇二三年八月

FINAL REPORT OF PLANNING PROJECT
OF INNOVATION AND
ENTREPRENEURSHIP TRAINING OF
UNDERGRADUATE OF WUHAN
UNIVERSITY

**Martian Mineral Detection Based on
Spectral Unmixing of Hyperspectral
Remote Sensing Imagery**

College : State Key Laboratory of information Engineering
in Surveying, Mapping and Remote Sensing

Subject : Remote Sensing Science and Technology,
Computer Science and Technology

Name : Ximin Pei, Yuhang Xiang, Chenqian Wang

Director : Yanfei Zhong Professor

August 2023

郑 重 声 明

本项目组呈交的结题报告，是在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果，所有数据、图片资料真实可靠。尽我们所知，除文中已经注明引用的内容外，本报告的研究成果不包含他人享有著作权的内容。对本报告所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确的方式标明。本报告的知识产权归属于培养单位。

项目组签名：_____ 日期：_____

摘 要

火星矿物的形成与星体地质演化和古水环境紧密相关，开展火星表面物质成分探查和矿物组分分析是火星探测任务的重要科学目标。目前，火星矿物探测主要采用高光谱遥感技术，高光谱数据记录了物质连续的光谱曲线，根据矿物的诊断性光谱吸收特征可解译矿物种类和丰度。

国内外对火星矿物的研究主要从多源高光谱数据出发，利用矿物探测方法，得到局部区域或全球范围的探测结果。然而，高光谱数据进行火星矿物探测的相关研究尚处于起步阶段且存在三大挑战：探测矿物类别基准不统一、探测方法自动化程度和效率有待提高、探测方法自动化程度和效率有待提高。

本项目拟以“火星矿物精细类别体系构建-基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测方法建模-火星矿物分布查询网站搭建”为研究思路，利用 CRISM 高光谱影像，研究基于混合像元分解实现火星表面矿物的全自动识别和丰度估计的算法，构建火星表面矿物识别和反演一体化理论与应用框架。本项目的创新点归纳如下：

- 1) 数据上，基于 CRISM 传感器获取的火星高光谱影像构建统一的矿物分类体系，通过阅读国内外文献统计出火星含水矿物分布研究现状的一张图；
- 2) 模型上，基于高光谱遥感影像混合像元分解技术，提出火星矿物全自动探测方法，通过端元提取得到矿物光谱，光谱分解估计矿物丰度，实现火星表面矿物种类和丰度的探测，并形成火星全球矿物分布一张图；
- 3) 应用上，搭建可视化网站展现火星地形图、矿物、高光谱影像，提供火星矿物分布查询服务。

关键词：高光谱影像；火星矿物分类体系；火星矿物分布图；可视化查询网站

ABSTRACT

At present, the interpretation research of Mars hyperspectral data is still in its infancy. Mineral exploration mainly relies on parametric models and expert interpretation. Moreover, mixed mineral mapping is difficult, and its intelligence level and processing efficiency cannot meet the requirements of large-scale and refined exploration and application.

This project intends to study the automatic recognition, content estimation and intelligent algorithm of subpixel level mineral mapping based on CRISM hyperspectral image , and build the integrated theory and application framework of recognition, inversion and mapping of Martian surface minerals. Construction of fine classification system of Mars minerals - Modeling of automatic fine detection method of Mars minerals based on hybrid pixel decomposition - Construction of Mars mineral analysis query website based on hyperspectral remote sensing "is the research idea. At the same time, using the hyperspectral image of Mars obtained by CRISM sensor, combined with the hybrid pixel interpretation technology of hyperspectral remote sensing image (end element extraction to obtain mineral spectrum, spectral decomposition to estimate mineral abundance, subpixel mapping to realize subpixel level mineral mapping, spectral Angle distance identification of mineral species), the automatic detection method of Mars minerals is proposed. To realize the exploration of the type, content and spatial distribution of minerals on the surface of Mars. Finally, the visualization website is used to display the Mars map, Mars minerals, hyperspectral images and analysis results, and to provide real-time online processing of Mars hyperspectral data, as well as mineral query and analysis services.

Key words: Hyperspectral imagery; Martian minerals; Visual website

目 录

摘 要	1
ABSTRACT	2
第 1 章 项目简介	4
1.1 研究背景与意义	4
1.2 国内外研究现状与发展动态	4
1.3 研究内容	5
1.4 研究方法	6
第 2 章 项目成果	8
2.1 基于火星高光谱影像数据集的构建	8
2.2 基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测模型	8
2.2.1 基于显著性的矿物端元自动提取	9
2.2.3 基于稀疏约束盲分解的矿物丰度反演	10
2.2.5 HyperMars 技术路线的可行性分析	11
2.3 搭建基于高光谱遥感的火星矿物分布查询网站	13
2.3.1 概述	13
2.3.2 网站框架	16
2.3.3 网站部署	20
2.3.4 网站功能	22
第 3 章 项目实施情况	25
3.1 项目完成情况	25
3.2 项目投入程度	26
3.2.1 项目日常管理	26
3.2.2 成员个人完成项目情况	27
3.3 项目经费使用情况	27
第 4 章 总结与展望	28
致谢	29
参考文献	30

第 1 章 项目简介

1.1 研究背景与意义

火星作为太阳系八大行星中与地球最为相似的星球，成为各航天大国深空探测任务的主要对象之一。火星表面广泛的干涸河床、三角洲、冲积扇和沟渠等形貌构造，表明火星表面曾经存在古水环境，火星表面在火星大气环境变化、表层地质演化以及古水环境的共同作用下产生了大量的含水矿物。在地球上，水环境的存在往往与生命活动密切相关，因此，火星表面含水矿物类型识别和空间分布特征研究对推演火星水环境历史、探测地外生命具有重要科学意义。

然而，火星含水矿物具有含量低、分布零散及背景矿物未知或不确定等特点，再加上矿物非线性混合的复杂性、仪器噪声及光谱变异性等，导致从火星高光谱图像上识别和定量化精细类别的含水矿物存在困难。另外，由于目前火星高光谱数据的解译研究尚处于起步阶段，矿物探测主要依靠参数模型和专家判读，其智能化水平和处理效率难以满足大范围、精细化探测应用需求。因此，本项目拟利用天问一号和 CRISM 获取的火星高光谱影像，针对火星表面矿物“有几种”、“有多少”、“在哪里”的探测需求，结合高光谱遥感影像混合像元解译技术，研究基于高光谱的火星表面矿物智能探测算法，构建火星表面矿物识别和反演一体化理论与应用框架。

1.2 国内外研究现状与发展动态

目前火星高光谱数据源多样、探测结果在分类体系和尺度上不统一。随着火星传感器观测技术的不断提高，火星表面矿物探测的数据源从早期的热红外光谱仪 TES 逐步向 OMEGA/CRISM/MMS 等各种可见光近红外光谱仪发展。不同高光谱数据的空间分辨率和光谱覆盖范围不同，如 OMEGA 数据的波段数为 352，空间分辨率较低，为 300-4000 米，而 CRISM 数据的光谱分辨率为 6.55nm，空间分辨率达 18-200m，这就会导致探测出的火星表面矿物类别存在差异。此外，不同学者对探测出的矿物结果分类不一致，如法国 IAS 团队利用全面的 OMEGA 和 CRISM 数据分析，形成了 5 类含水矿火星全球矿物分布图，而 NASA 针对 CRISM 高光谱数据设计了一系列表征矿物光谱吸收特征的光谱指数，已探测到的火星表面矿物分为 31 个精细类型。

目前火星表面矿物探测方法主要包括光谱特征参数法、修正高斯模型

（Modified Gaussian Model, MGM）以及基于辐射传输模型的混合像元分解方法。光谱特征参数法是利用光谱吸收峰深度、光谱比值等综合光谱参数，通过人工目视解译来判定区域内是否存在目标矿物；MGM 模型依赖专家先验知识对光谱形态进行初步分析后，用多个高斯模型拟合曲线，根据吸收光谱特性探测矿物类型；基于辐射传输模型的混合像元分解方法通常是人工设定矿物端元个数，基于矿物光谱库，通过线性光谱分解模型探测火星矿物类型和丰度。这些方法很大程度上都依赖矿物的光谱吸收特征进行解译，对于矿物精细类别探测需要目视判读，探测精度和自动化程度有待提高。

目前已有的火星相关网站有两个典型实例：中国地质大学（武汉）开发的行星地图服务网站（中国地质大学（武汉）行星地图服务 (cug.edu.cn)）以及 CRISM DATA PRODUCTS 网站（CRISM Data Products (jhuapl.edu)）。中国地质大学（武汉）开发的行星地图服务网站主要提供行星地图服务，为用户展示不同投影方式、不同图层（彩色图、红外全球拼接图等）下的火星地图，并只能提供一些前期信息检索的功能。CRISM DATA PRODUCTS 网站主要提供对 CRISM 高光光谱影像查询服务，能够通过搜索获得 CRISM 图像的 ID、经纬度范围、中心坐标信息等。CRISM DATA PRODUCTS 网站只能提供 CRISM 图像的基本信息，缺少数据分析功能。

1.3 研究内容

针对目前在火星矿物探测领域存在的问题，我们提出了自己的解决思路：1) 针对现有火星探测矿物研究的类别基准不统一的问题，构建了统一矿物精细类别体系，在该类别体系下统计了已有文献的矿物探测结果，形成矿物精细探测研究现状的一张图；2) 针对现有探测方法的自动化程度不足的问题，提出了基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测方法；3) 针对缺少火星高光光谱在线实时处理接口的问题，搭建了基于高光光谱遥感的火星矿物分析查询网站。本项目具体的研究内容包括：

（1）构建统一矿物分类体系，统计矿物分布研究现状的一张图

针对现有火星探测矿物研究的类别基准不统一的问题，整合了现有研究成果构建了 31 种矿物的分类体系。

（2）构建基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测模型

针对现有探测方法的自动化程度不足的问题，提出了基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测方法。将整个分析流程分为输入数据、预处理、核心方法、输出产品四个大部分，核心方法部分集成端元提取和光谱分解算法，基于 CRISM 高光谱影像实现火星表面矿物的全自动识别、含量估计和亚像元级矿物填图。

(3) 搭建基于高光谱遥感的火星矿物分析查询网站

针对缺少火星高光谱在线实时处理接口的问题，搭建了基于高光谱遥感的火星矿物分析查询网站。针对在线分析服务需要分别记录多用户实时状态的问题，我们利用了 java 多线程高并发的特性，使用了 SpringBoot 框架，。针对高光谱分析算法运行平台与网站平台不兼容问题，我们利用 spring 框架的可拓展性，增加了相关库文件，为算法运行提供了环境基础。

1.4 研究方法

(1) 文献研究法

利用图书馆、档案馆以及互联网等广泛查阅文献资料并进行下载有代表性、刊物级别比较高的文章，探究火星表面矿物探测研究现状与进展并学习高光谱遥感技术基本原理知识，在此基础上加以分析与整理。

(2) 跨学科研究法

本研究设计火星除了需要学习并掌握基本的高光谱遥感技术原理、火星典型矿物的高光谱吸收特征等理论知识之外，还需要对行星地球学与地质学的相关知识进行一定程度的了解。

本项目的技术路线如图 1 所示，针对高光谱遥感在应用于火星表面矿物探测时存在的问题进行研究。首先构建了统一的矿物分类体系，利用该分类体系统计了矿物精细探测现状图；构建了基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测模型，集成端元提取、光谱分解和亚像元制图技术，基于 CRISM 高光谱影像实现火星表面矿物的全自动识别、含量估计和亚像元级矿物填图。同时基于多线程技术开发一个基于高光谱遥感的火星矿物分析查询网站，便于火星矿物探测成果的展示和后续应用。

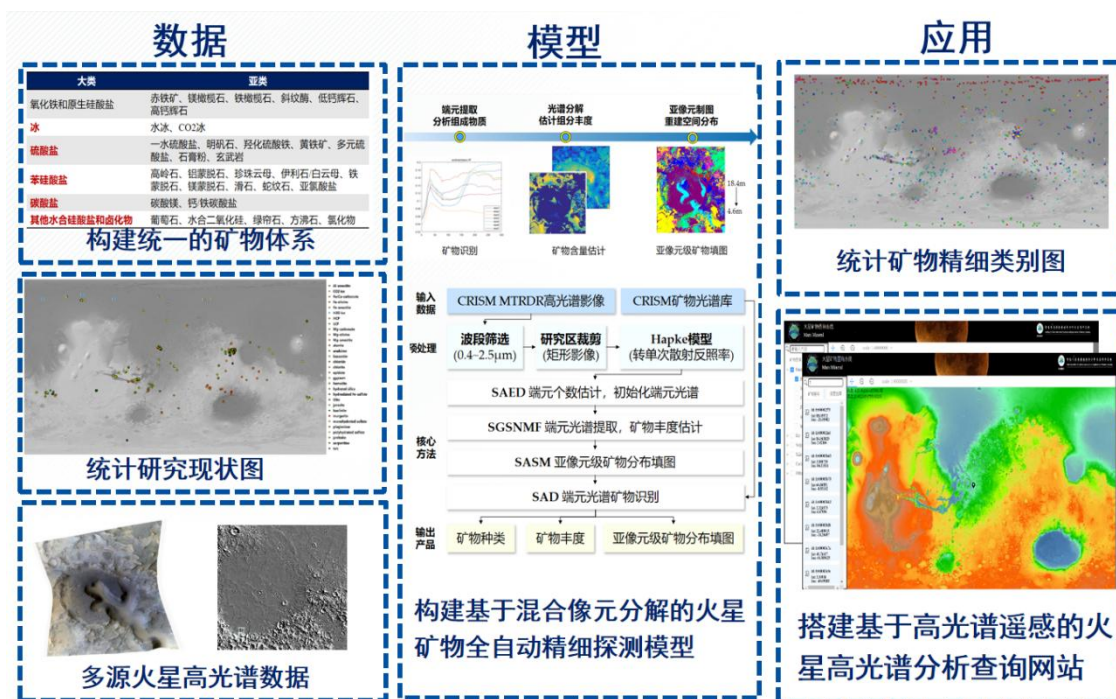


图1.1 基于高光谱遥感影像混合像元分解的火星表面矿物探测研究技术路线图

第 2 章 项目成果

2.1 基于火星高光谱影像数据集的构建

由于高光谱影像记录了物质连续的光谱曲线，根据不同矿物的光谱吸收特征，通过光谱分析可识别火星表面的矿物种类，因此高光谱影像是火星表面矿物识别的重要数据源。

目前的火星轨道光谱仪主要有 ESA 的 OMEGA 和 NASA 的 CRISM 以及我国天问一号的 MMS，其中 CRISM 数据具有较高的空间和光谱分辨率，是目前常用的火星高光谱数据。CRISM 的可见光和红外光谱仪跟踪火星表面的区域，并从 300 公里(186 英里)的高度绘制出直径小至 18 米(60 英尺)的地图。CRISM 读取反射阳光中的数百种“颜色”，以探测地表上某些矿物质的模式，包括过去水的标志性痕迹。

CRISM 成像仪的相关参数如下：

	平台	火星侦察轨道器 MRO
	光谱分辨率	波长范围 362 - 3920 nm，光谱分辨率 6.55 nm (544 channels)
	幅宽	5.8-7.4 miles (9.4-11.9 kilometers)
	空间分辨率	18.4 meter/pixel at 300 kilometer altitude

图 2.1 CRISM 成像仪及其参数

近年来，NASA 发布了 CRISM 矿物光谱库和矿物产品书 MICACRISM，其主要使用可见光、红外和近红外波长的探测器来绘制曾经有水存在的地方出现的矿物残留物。

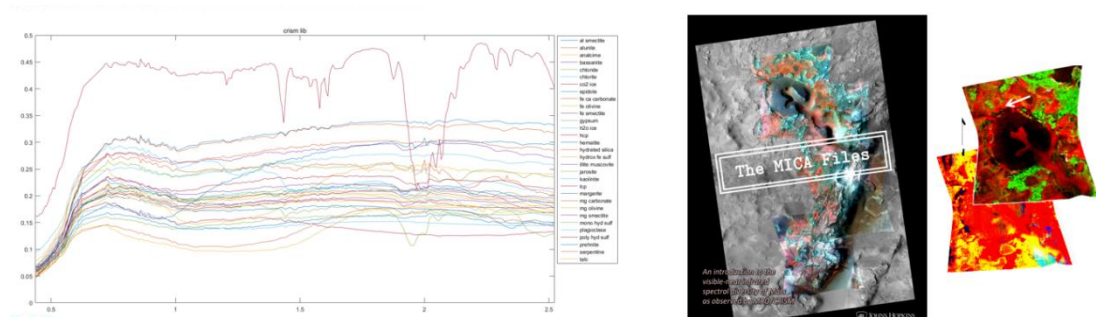


图 2.2 CRISM 矿物光谱库和矿物产品书 MICA

2.2 基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测模型

为了有效解决缺乏专家知识实现全自动识别火星表面矿物以及估计火星表面矿物组分含量精细矿物填图，基于混合像元解译的技术路线，我们研发火星矿物探测平台 HyperMars，可全自动解译火星高光谱影像的矿物种类、含量和分布，其核心算法包括：基于显著性的矿物端元自动提取（SAED）、基于稀疏约束盲分解的矿物丰度反演（SGSNMF）、基于亚像元制图的矿物精细填图（SASM）、基于光谱角距离的矿物识别（SAD）。

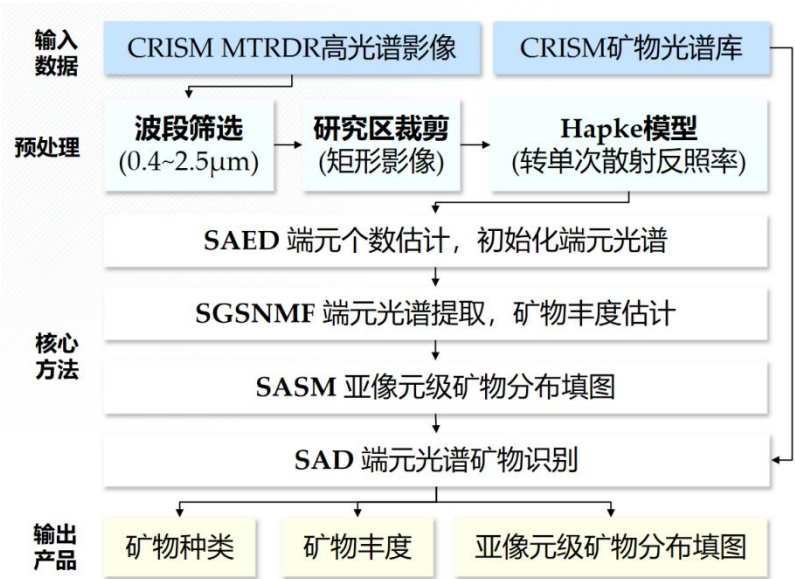


图 2.3 模型方法原理图

2.2.1 基于显著性的矿物端元自动提取

利用火星矿物在含量异常投影空间中的显著性，将“火星矿物类型数量估计”问题转化为“显著性目标探测”问题，同时考虑火星矿物光谱特性和空间分布特征进行显著性分析，迭代地将高光谱影像投影到火星矿物含量异常空间中，以过分割的超像元为基本单位计算显著性，当判断显著图中仍存在显著性目标时自动提取矿物数量光谱并更新矿物数量矩阵，当判读显著图中无显著目标时停止迭代并确定矿物数量。实现自动同时估计火星矿物种类数量与提取火星矿物光谱，解决“有几种”矿物的问题。

利用 USGS 地球矿物数据模拟光谱，通过改变数据的信噪比和端元个数，进行 SAED 端元提取鲁棒性分析，结果如图 5 所示，表明 SAED 端元个数估计的鲁棒性优于 HySime 等经典算法。

<i>SNR</i> (dB)	<i>Method</i>	<i>P_F</i>	<i>The number of endmembers M</i>			
			5	8	11	14
50	<i>NWHFC</i>	10^{-3}	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	11.00 ± 0.00
		10^{-4}	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	10.00 ± 0.00
		10^{-5}	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	10.00 ± 0.00
	<i>GENE-AH</i>	10^{-3}	6.40 ± 0.58	9.05 ± 0.74	11.20 ± 0.40	14.05 ± 0.22
		10^{-4}	5.50 ± 0.59	8.30 ± 0.49	11.05 ± 0.22	14.00 ± 0.00
		10^{-5}	5.15 ± 0.36	8.05 ± 0.22	11.00 ± 0.00	14.00 ± 0.00
	<i>SPICE</i>	-	5.30 ± 0.71	8.15 ± 0.48	10.55 ± 0.86	13.25 ± 0.89
	<i>HySime</i>	-	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	11.00 ± 0.00	14.00 ± 0.00
	<i>SAED</i>	-	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	11.00 ± 0.00	14.00 ± 0.00
30	<i>NWHFC</i>	10^{-3}	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	10.50 ± 0.50
		10^{-4}	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	10.05 ± 0.22
		10^{-5}	4.60 ± 0.49	8.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	10.00 ± 0.00
	<i>GENE-AH</i>	10^{-3}	6.85 ± 1.15	9.10 ± 0.88	11.40 ± 0.73	14.05 ± 0.22
		10^{-4}	5.75 ± 0.62	8.25 ± 0.43	10.60 ± 0.58	14.00 ± 0.00
		10^{-5}	5.15 ± 0.38	8.05 ± 0.22	10.50 ± 0.59	14.00 ± 0.00
	<i>SPICE</i>	-	5.20 ± 0.51	10.50 ± 1.25	11.60 ± 1.24	14.30 ± 0.36
	<i>HySime</i>	-	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	10.00 ± 0.00	14.00 ± 0.00
	<i>SAED</i>	-	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	10.90 ± 0.30	14.00 ± 0.00
20	<i>NWHFC</i>	10^{-3}	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	7.00 ± 0.00	8.55 ± 0.50
		10^{-4}	5.00 ± 0.00	8.00 ± 0.00	6.80 ± 0.40	8.20 ± 0.51
		10^{-5}	4.40 ± 0.49	8.00 ± 0.00	6.45 ± 0.59	7.50 ± 0.59
	<i>GENE-AH</i>	10^{-3}	7.05 ± 0.86	9.15 ± 0.85	10.25 ± 0.62	12.30 ± 0.56
		10^{-4}	6.3 ± 1.10	8.10 ± 0.44	9.30 ± 0.46	11.90 ± 0.70
		10^{-5}	5.10 ± 0.30	8.10 ± 0.30	8.55 ± 0.59	11.30 ± 0.64
	<i>SPICE</i>	-	20.00 ± 0.00	20.00 ± 0.00	20.00 ± 0.00	20.00 ± 0.00
	<i>HySime</i>	-	5.00 ± 0.00	7.00 ± 0.00	9.00 ± 0.00	10.00 ± 0.00
	<i>SAED</i>	-	5.00 ± 0.00	7.25 ± 0.89	10.40 ± 0.49	13.20 ± 0.40

图2.4 不同端元个数自动估计算法的鲁棒性分析

2.2.3 基于稀疏约束盲分解的矿物丰度反演

火星矿物空间分布具有空间相关性大、数量少含量低的稀疏特点，利用超像元分割和结构稀疏正则化自适应更新矿物端元光谱、反演矿物丰度.首先利用 SLIC 超像元分割技术获取同质的超像元空间组，随后利用空间结构化稀疏约束空间组内部像元丰度，使属于同一空间组的丰度具有结构化的稀疏表达。

利用地球 Cuprite 矿区数据，使用 SGSNMF 模型进行矿物丰度反演的真实实验，如图 6 所示，结果表明 SGSNMF 适用于高度混合的 Cuprite 矿区数据，探测精度优于顶点成分分析法等方法。

<i>Endmember</i>	<i>Method</i>				
	<i>VCA</i>	<i>MVCNMF</i>	<i>L1/2NM F</i>	<i>ASSNM F</i>	<i>SGSNM F</i>
<i>Alunite</i>	4.538	7.615	5.518	5.139	6.262
<i>Andradite</i>	4.217	4.652	4.956	4.641	3.879
<i>Buddingtonite</i>	5.724	4.859	4.630	4.910	4.521
<i>Dumortierite</i>	4.125	5.248	4.853	4.125	4.887
<i>Kaolinite #1</i>	4.693	5.363	4.286	4.309	4.114
<i>Kaolinite #2</i>	3.770	3.867	3.810	4.005	4.039
<i>Montmorillonite</i>	9.265	14.926	7.254	5.884	7.506
<i>Muscovite</i>	3.426	3.845	3.501	3.358	3.317
<i>Nontronite</i>	3.810	9.104	4.572	3.948	4.400
<i>Pyrope</i>	10.565	7.156	6.755	8.606	5.065
<i>Sphene</i>	13.167	4.188	11.471	10.646	8.182
<i>Chalcedony</i>	4.733	6.119	4.440	5.907	6.635
<i>Average</i>	6.005	6.411	5.506	5.455	5.231

图2.5 Cuprite 数据下不同盲分解算法的 SAD 精度对比

2.2.5 HyperMars 技术路线的可行性分析

集成高光谱影像混合像元解译算法，研发火星矿物探测平台 HyperMars 能全自动精细探测火星矿物模型，有效提高探测方法的自动化程度和效率。对 MICA 矿物产品的 27 个研究区，31 种矿物进行测试，如图 8 所示，定性对比证明 HyperMars 矿物丰度图与 MICA 矿物产品的空间分布高度一致。如图 9 所示，对 MICA 矿物产品的 27 个研究区进行测试，对比 CRISM 光谱库（黑），定量统计 HyperMars 的矿物光谱（红）提取准确度达到 87.88%。

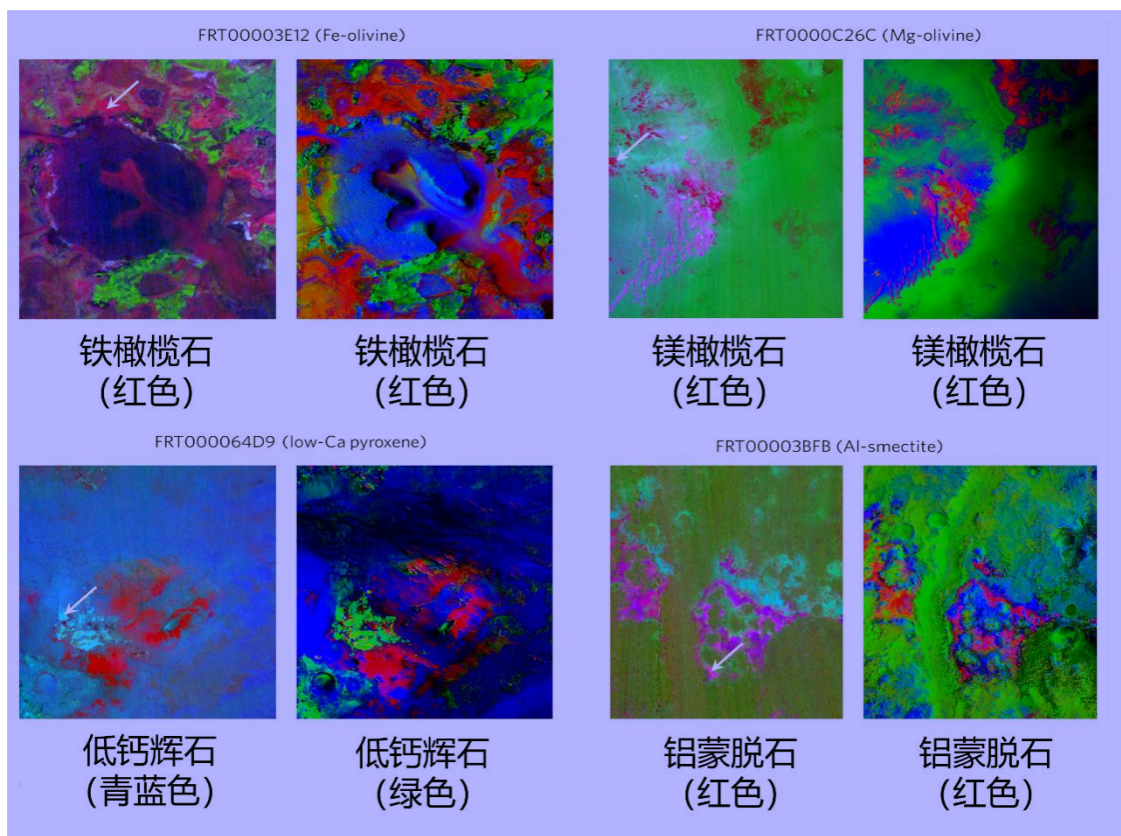


图2.7 HyperMars定性对比结果

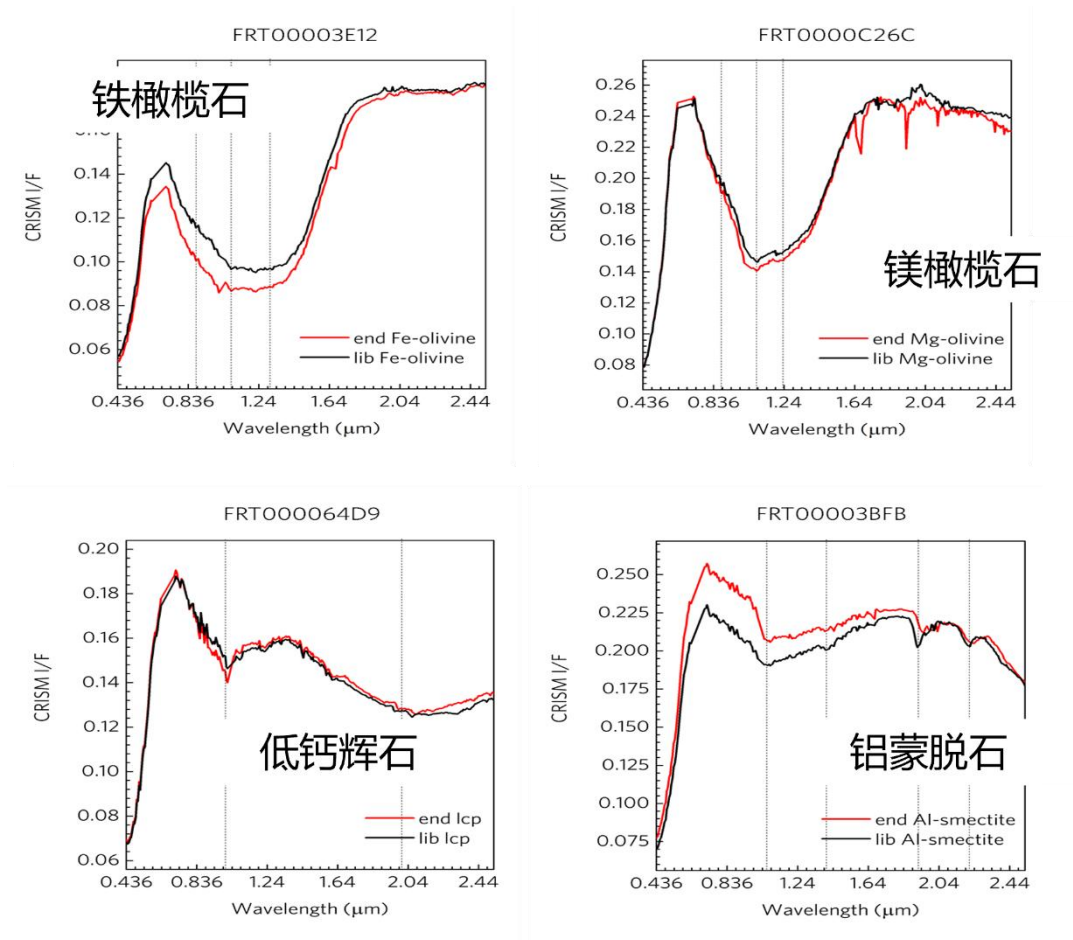


图 2.8 HyperMars 定量对比结果

2.3 搭建基于高光谱遥感的火星矿物分布查询网站

2.3.1 概述

针对缺少火星高光谱在线实时处理接口的问题，我们实现了基于高光谱遥感的火星矿物分析查询网站。该网站将利用现有火星矿物探测结果以及 CRISM 影像作为基础数据支撑，结合相应的高光谱图像分析算法，最终计划实现：

- (1) 展示火星上各种已知的矿物信息包括地理位置以及矿物种类
- (2) 展示 CRISM 图像信息，包括地理位置及具体图像
- (3) 对火星上的 CRISM 图像进行相应分析，包括预处理以及多种算法分析，展示图像中含有的各种矿物及其丰度。

该网站系统分为两个子系统：查询子系统以及分析子系统。

①基于 MyBatisPlus 数据库及 vue 前端的查询子系统：

为了实现对 CRISM 图像信息及火星矿物信息的查询及可视化，搭建了一个可视化的查询子系统。选择最常用的 mySql 数据库应用框架 MyBatisPlus 进行数据库管理，为了可视化的界面的简洁性，应用 vue 框架及 elemenUI 库来进行界面的设计。

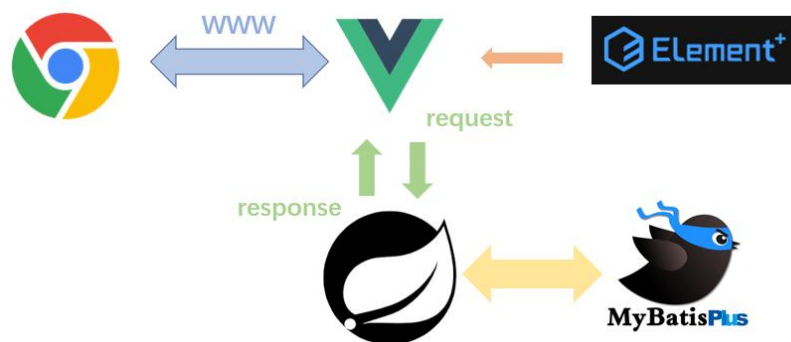


图3.1 网站查询子系统架构

采用 31 种统一矿物类别体系对矿物进行划分便于用户选择搜索。网站利用事件机制自动读取用户选择的多种矿物并对地图展示区进行刷新。

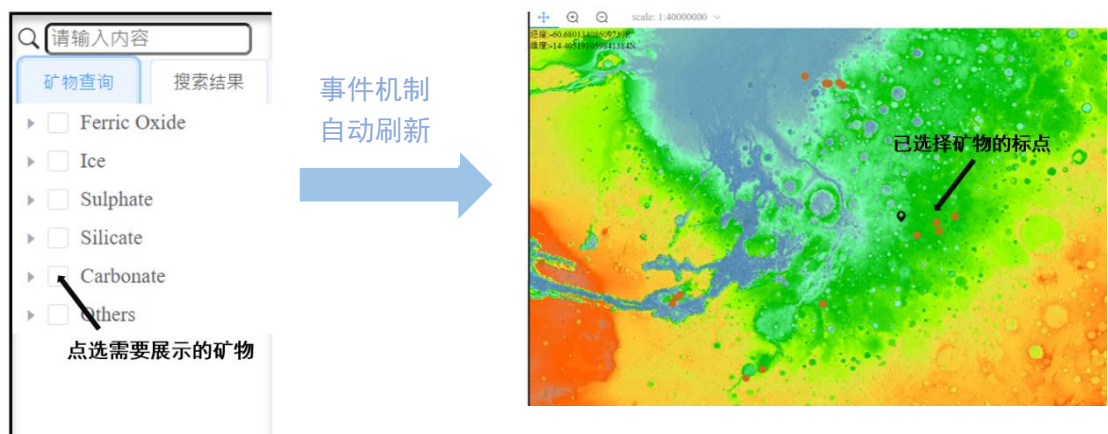


图3.2 矿物查询功能实现

数据库存入所以 CRISM 图像基本信息，用户可以通过模糊搜索获得想要的结果。网站利用事件机制获取后端数据更新页面。

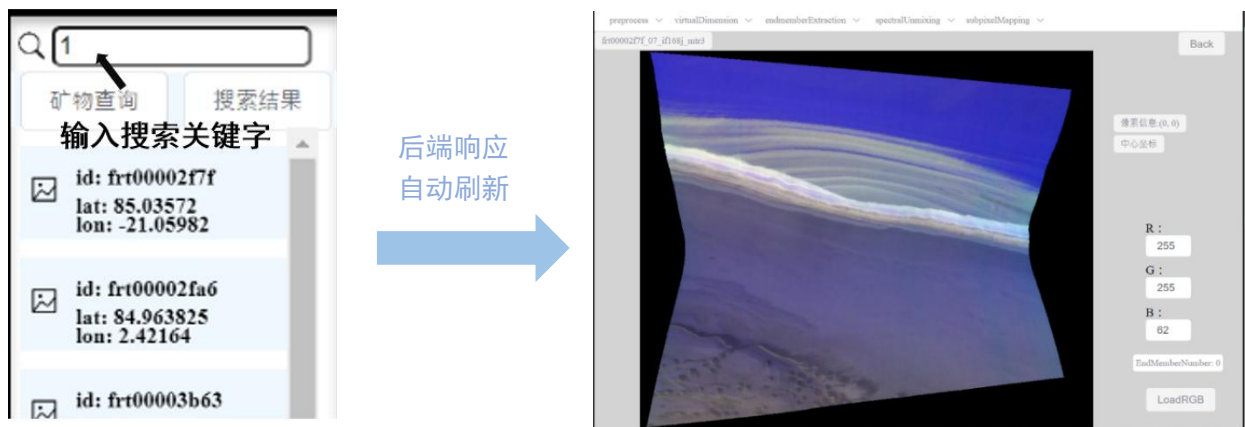


图3.3 图像查询功能实现

②基于java多线程及 lib 库文件的在线分析子系统

为了实现对 CRISM 图像的在线实时分析且展示实时分析结果，搭建了一个在线分析子系统。为了解决算法代码与网站平台不兼容问题，选择可拓展性强的 SpringBoot 后端框架，利用其 lib 文件嵌入高光谱图像处理的算法代码。为了实现多用户在线实时分析响应缓慢的问题，利用 java 的多线程机制，为不同用户均分配线程，并发执行提供效率。

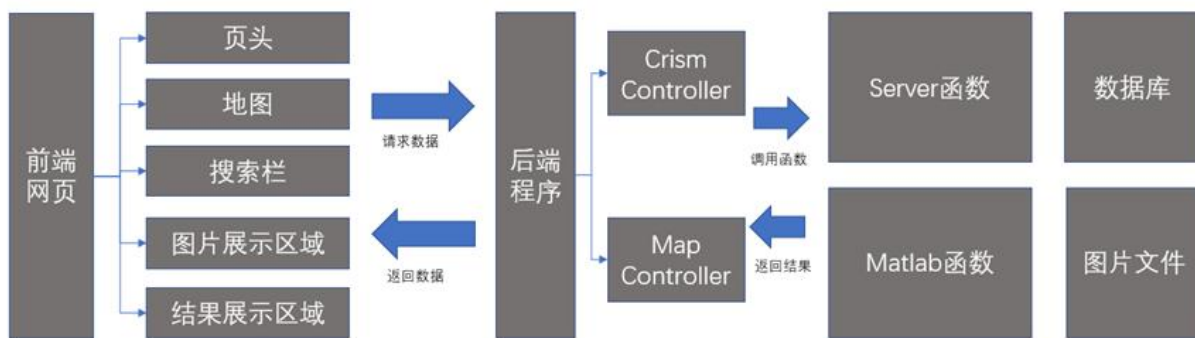


图3.4 网站实时分析子系统框架

http 请求是前后无关不具有上下文环境的，因此用户前端需要存储用户实时分析的状态。然而高光谱图像在线分析的特殊性在于其单个分析请求响应时间长、中间结果数据量大，因此在多用户同时提出分析请求时，会进行请求排队，总有用户需要付出数倍于分析时间的等待时间，这严重影响了用户体验。因此我们利用 java 的多线程机制，为每位用户的分析请求分配单独线程，并发执行，极大地提高了用户体验。

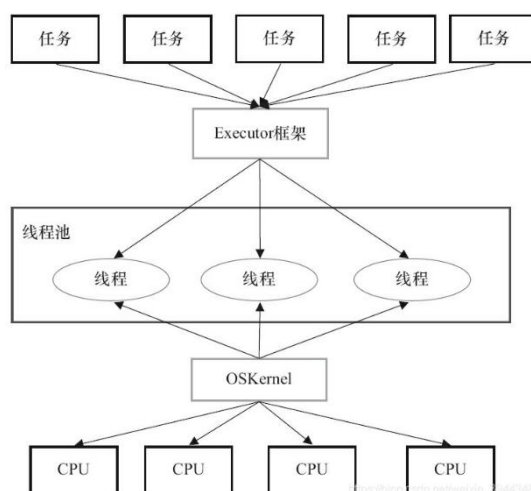


图3.5 服务器多线程运行结构

高光谱分析算法由 matlab 语言写成，不兼容于 java 语言运行环境，因此不能直接调用。但是 JAR 文件是一个很好的中间桥梁，matlab 程序提供了将代码打包为 JAR 文件的接口，将 JAR 文件导入 lib 库当中。Spring 会将其作为库文件解析进而得到算法输入输出的接口，实现对跨平台算法的调用。

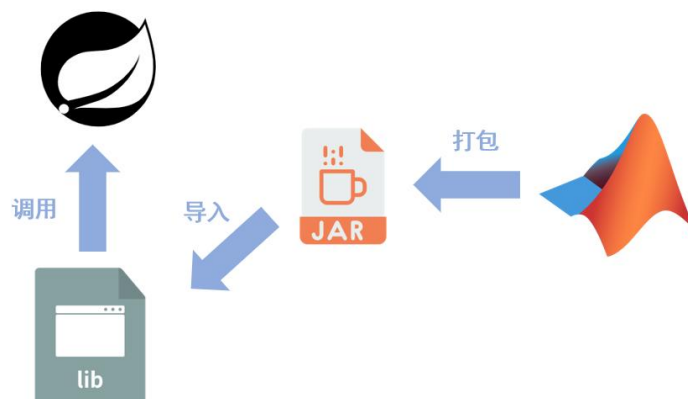


图3.6 matlab代码跨平台过程

2.3.2 网站框架

网站的基本技术框架为,使用 SpringBoot+MyBatisPlus 框架进行后端搭建,使用 vue 框架进行前端搭建。同时针对 crism 图像的分析功能将通过使用 matlab 程序实现算法功能之后,将相应的 matlab 代码打包成与 java 兼容的 jar 包,并将 jar 包接入后端代码之中,通过后端程序调用 jar 包当中的函数实现相应的算法功能。

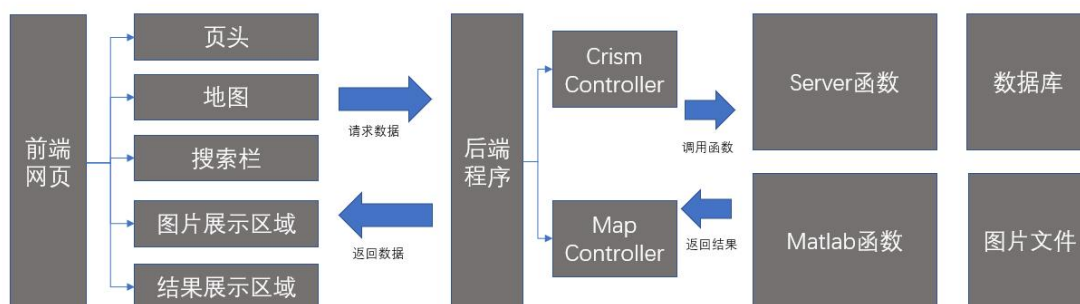


图3.7 网站的基本技术框架示意图

①前端部分框架

前端分为页头、地图、搜索栏、图片展示区域、结果展示区域五个部分。其中页头部分用于展示网站基本信息。



图3.8 网页头

地图部分由于没有已有的火星地图框架，所以采取组合相同比例尺下不同位置的火星图片形成地图的方式进行展示。根据不同比例尺、不同位置对火星图片进行编号，然后通过编号请求不同的图片进行组合。

其中，通过相应的算法对图片的编号进行转化，将新得到的编号发送到相应的后端程序，前端获取新的图片重新渲染地图，就能够完成地图基本的放大、缩小、拖拽功能。

选择每张图片的左上角作为基准点，获取鼠标相对于当前地图的某张图片基准点的相对位置，然后根据图片编号计算图片的精准位置，将两者结合就可以得到鼠标所在位置的经纬度信息。

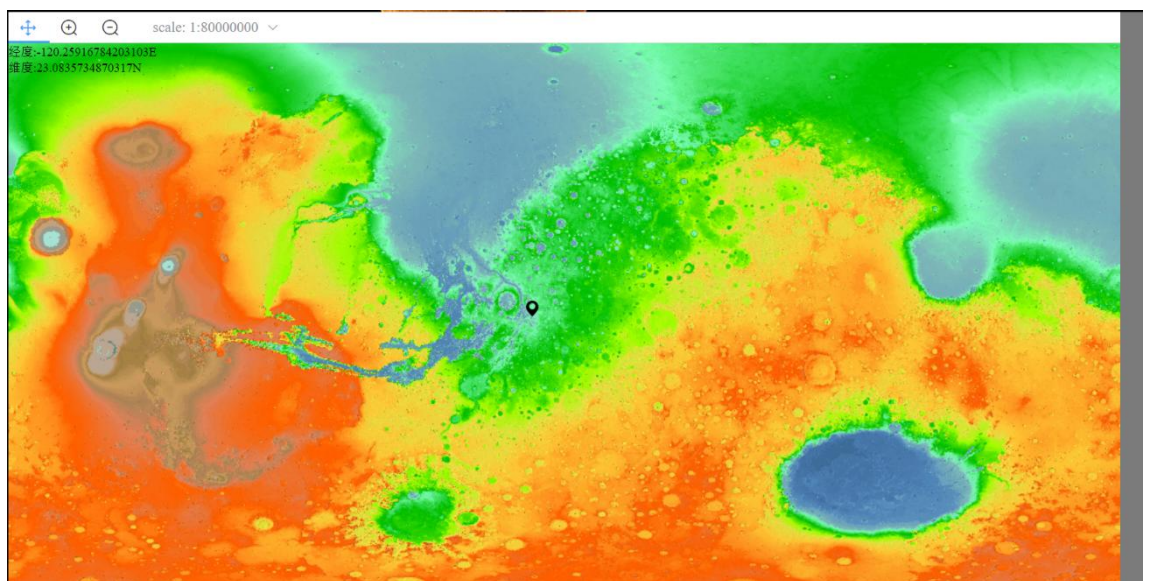


图3.9 网站核心展示端

搜索栏部分既可以展示火星矿物分类的树状结构，通过点击可以选择多种



图3.10 网站核心检索栏

矿物展示其在火星地图上的分布，也可以展示对 CRISM 影像的搜索结果。

点击 CRISM 图片之后将进入图片展示区域。图片展示区域用于展示高光
谱影像，以及对高光谱影像分析处理过程中的各种图片。其中该部分将在头部
展示高光谱图像分析处理的各个步骤以及相应算法，在图片左上角展示图片 ID，
在图片右侧展示该高光谱图像中心位置的经纬度坐标，在右下角展示预处理图
片时使用的 RGB 信息。

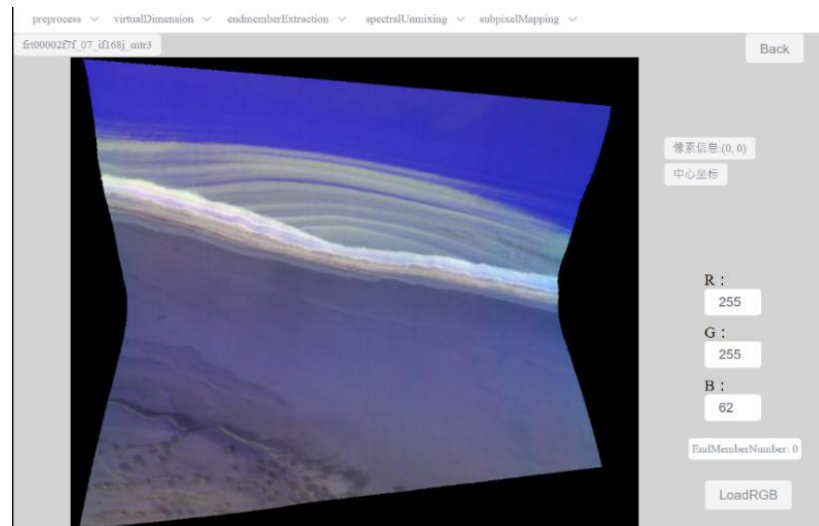


图3.11 网站核心算法界面

结果展示区域用于展示，在对高光谱图像分析过程中，产生的光谱图、丰
度图。这些图片可以进行下载。



图3.12 网站光谱图、丰度图展示区

其中上部分用于展示光谱图，下半部分用于展示丰度图。由于位置受限，在右侧部分只展示相应图片的缩略图，用户可以点击查看具体图片。

②后端部分框架

后端部分采取 SpringBoot 结构，分为 controller、server、dao、domain 四层。其中 controller 用于响应前端请求，并进行一些简单的数据处理与包装，server 层完成网站服务的核心功能，dao 层负责对数据库进行操作，domain 指实体类，用于定义 crism 图像等类的方法和属性。另外，后端 lib 部分导入了 matlab 代码打包生成的.jar 文件，该部分主要负责对高光谱图像的分析工作，相当于 MVC 架构当中的 server 层，所以由 controller 直接调用其函数。

Controller 部分分为 mapController 以及 crismController。其中所有与 map 操作相关的请求都往 mapController 发送，包括地图的基本操作、勾选矿物种类导致的地图刷新，所有与 crism 图像操作相关的请求都往 crismController 发送，包括对 crism 图像的分析、查找。

MapController 当中，getMolaMap()函数用于按照编号查找火星 mola 图并且返回；getCrismPlace()接收用户传来的具体 mola 图信息，经过转换之后返

回该 mola 图区域当中存在的 crism 图像信息，并且转换为前端直接可用的数据之后封装返回；**getMineralPlace()**接收前端传来的 mola 图信息以及用户勾选的矿物类型信息，采用两者作为条件在数据库中查找处于该 mola 图范围的火星矿物信息，转换为前端直接可用数据之后封装返回，用于在前端展示局部矿物信息；**getAllMineral()**函数只接收用户选择的矿物种类信息然后再火星全球范围内查找相关矿物信息，然后封装返回，用于再前端展示全球矿物信息。

CrismController 当中，**searchCrismImg()**函数，接收用户传来的搜索关键词，在数据库当中进行模糊查找，返回相关的 crism 图片编号；**getUserId()**函数用于随机为用户生成唯一的用户 ID，相当于为不同进程分配的进程号，网站将某一浏览器对某一图片的处理视为一个用户为其分发用户 ID，在对同一图片的处理过程中，服务器将存储处理过程中产生的图片信息，并使之与同一用户 ID 对应，如果同一浏览器切换新的图片进行处理，则视为新用户需要重新分配用户 ID；**getCrismImg()**函数，接收用户传来的用户 ID 以及 crism 图片 ID 信息，将两者结合后在服务器内调用 matlab 函数处理后生成图片，然后查找相应的图片并返回，该函数用于首次获取用户图片；**getRGB()**函数，与 **getCrismImg()**函数相似，调用 matlab 代码获取首次加载图片时随机生成的 rgb 信息，并将其返回。

在当前后端框架下，网站功能具有较强的可拓展性。由于后端 java 代码只用于搭建平台，沟通数据库，并不负责具体的算法处理部分，具体的算法处理交给 matlab 代码封装。这就使得如果有新的分析算法出现，可以使用更方便的 matlab 代码进行描述，将其打包后插入当前框架，不影响已有部分的运行。目前后端部分只是完成了基本框架的搭建，算法分析部分正在逐步加入。计划将在所有的算法模块都加入之后，对所有的算法部分进行整合，将所有的算法代码整合为一个.jar 代码包，将不同算法封装为不同的函数，java 后台再同一从一个.jar 代码包当中调用函数进行图片处理，简化系统，提高效率。

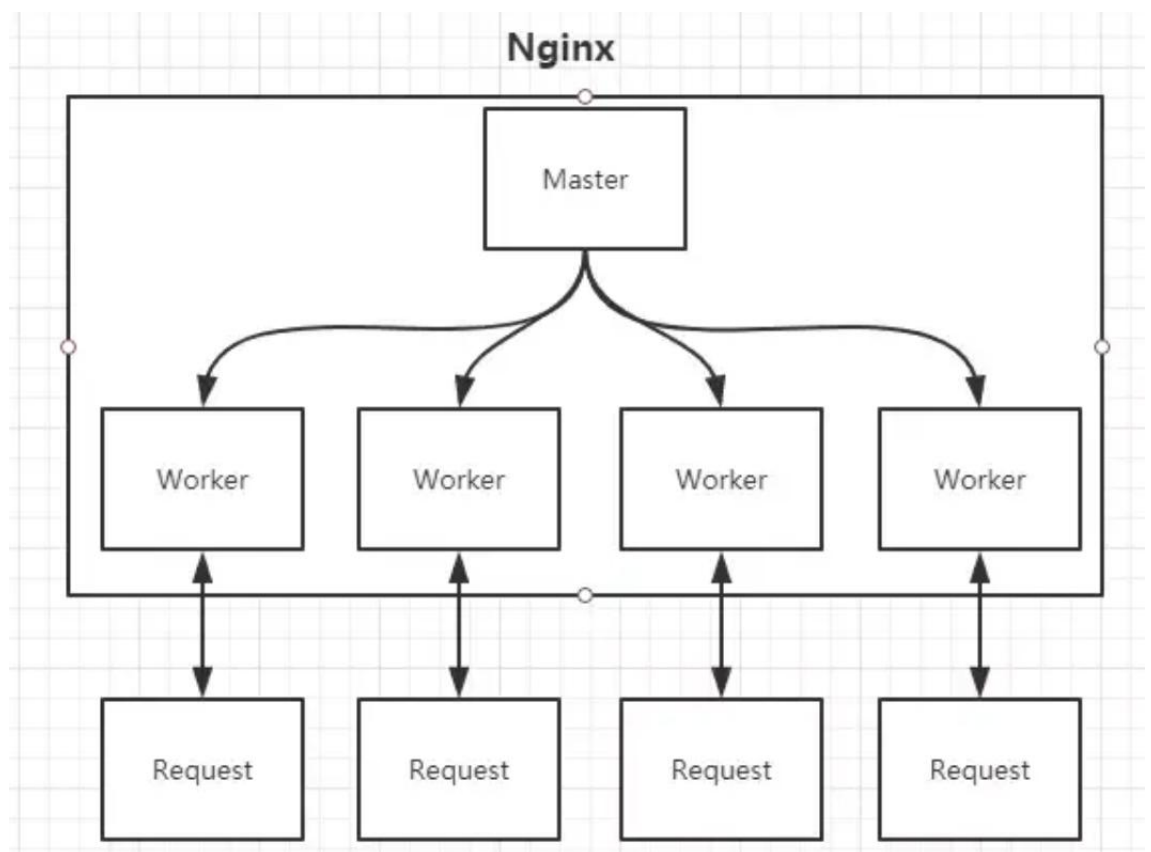
2.3.3 网站部署

为便于后续开发和应用，我们购买了华为云服务器并开始了部署工作，目前已完成了前端的部署工作。目前可以通过网址：<http://121.37.118.130:8080/#/>

访问网页前端。在部署时，我们选用了 Nginx 作为反向代理服务，以提高服务端的高并发性能。

Nginx (engine x) 是一个高性能的 HTTP 和反向代理 web 服务器，同时也提供了 IMAP/POP3/SMTP 服务。它也是一款轻量级的 Web 服务器/反向代理服务器及电子邮件（IMAP/POP3）代理服务器，在 BSD-like 协议下发行。其特点是占有内存少，并发能力强，nginx 的并发能力在同类型的网页服务器中表现较好。

Nginx 是高性能的 HTTP 和反向代理的 web 服务器，处理高并发能力是十分强大的，能经受高负载的考验,有报告表明能支持高达 50,000 个并发连接数。同时其支持热部署，启动简单，可以做到 7*24 不间断运行。几个月都不需要重新启动。



我们针对 Nginx 进行了相关配置，将前端服务配置到 Nginx 代理当中，提高了服务端性能。


```
#access_log logs/host.access.log main;

location / {
    root    html;
    index  index.html index.htm;
}

location /api/{
    proxy_set_header Host      \${host};
    proxy_set_header X-Real-IP \${remote_addr};
    proxy_set_header REMOTE-HOST \${remote_addr};
    proxy_set_header X-Forwarded-For \${proxy_add_x_forwarded_for};
    proxy_pass http://localhost:8081/;
}

#error_page 404                /404.html;

# redirect server error pages to the static page /50x.html
#
error_page 500 502 503 504 /50x.html;
location = /50x.html {
    root    html;
}
}
```

2.3.4 网站功能

功能一：火星地图的展示

地图的基础功能，包括通过鼠标拖拽、通过滑轮实现对火星地图的缩放，也可以通过顶部的工具栏相关按钮进行比例尺的选择。前端通过捕捉用户的鼠标、滑轮事件，确定鼠标所在位置的 mola 图片编号，针对不同的事件采取不同的转换算法，将 mola 图片编号转变为新的 mola 图片编号。前端收到新的 mola 图片编号后自动进行发起请求，从后端获得数据流后自动进行渲染，生成新的火星地图。

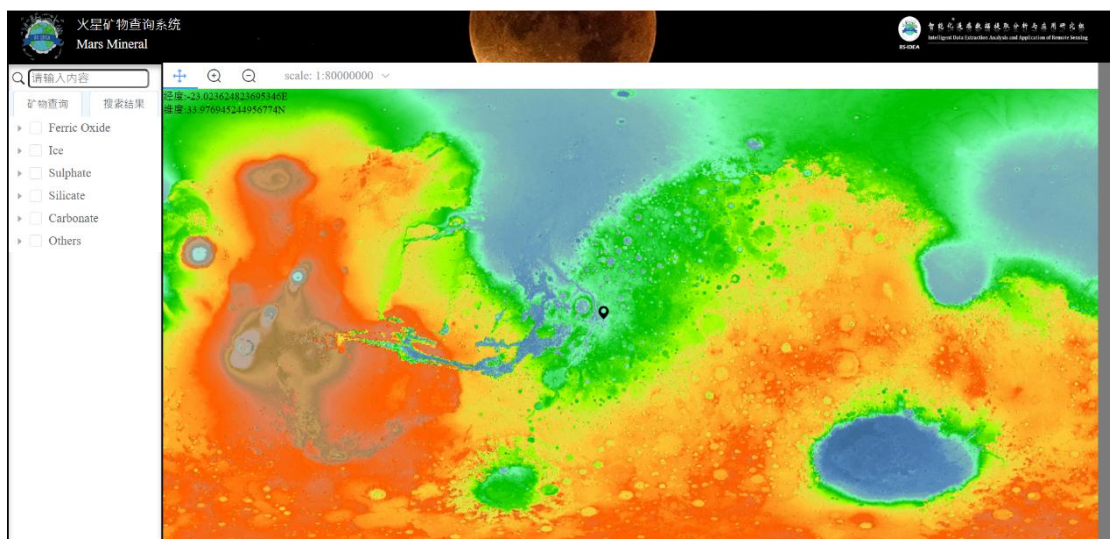


图3.13 网站全局图

功能二：火星地图上已知的矿物查询

通过网页左侧的一个矿物分类的树状结构可以对火星上的矿物进行选择，网页前端将使用一个数组记录用户选择的多种矿物种类。向后端发起请求时自动携带该数组的内容，后端程序自动识别数组内容，进入数据库带入条件查询。根据前端地图板块是局部展示状态还是全球展示状态调取不同的函数，获取信息后封装为专门用于前后端数据传输的对象数组，传递给前端。封装对象当中，将矿物的经纬度信息处理为矿物标点距离地图展示区域左部和顶部的像素距离，可以直接用于前端样式，前端解析后使用数组存储标点信息并进行渲染。当地图进行放大、缩小和拖拽时，前端将重新发起请求，重置标点数组。

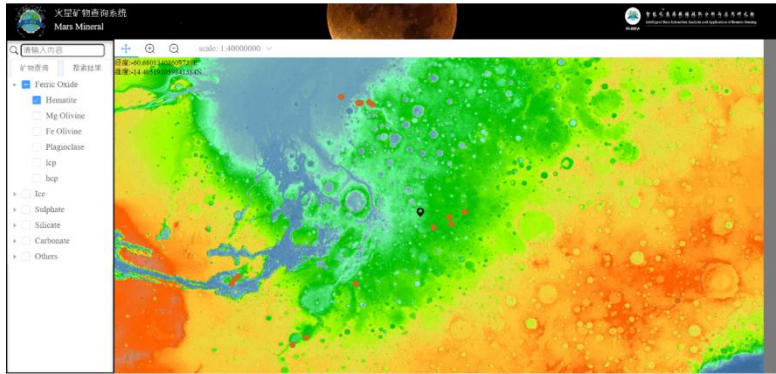


图3.14 网站矿物分布展示1

功能三：搜索 CRISM 图像功能

在左侧顶部搜索框种可以输入相应的 crim 标点的编号，网页将获取输入的关键词信息，用户点击搜索按钮后，前端将关键词信息传递给后端。后端通过关键词对数据库进行模糊搜索，返回原始信息之后，将原始信息进行封装，采用相应的前后端传递信息专用类，前端解析后循环渲染。

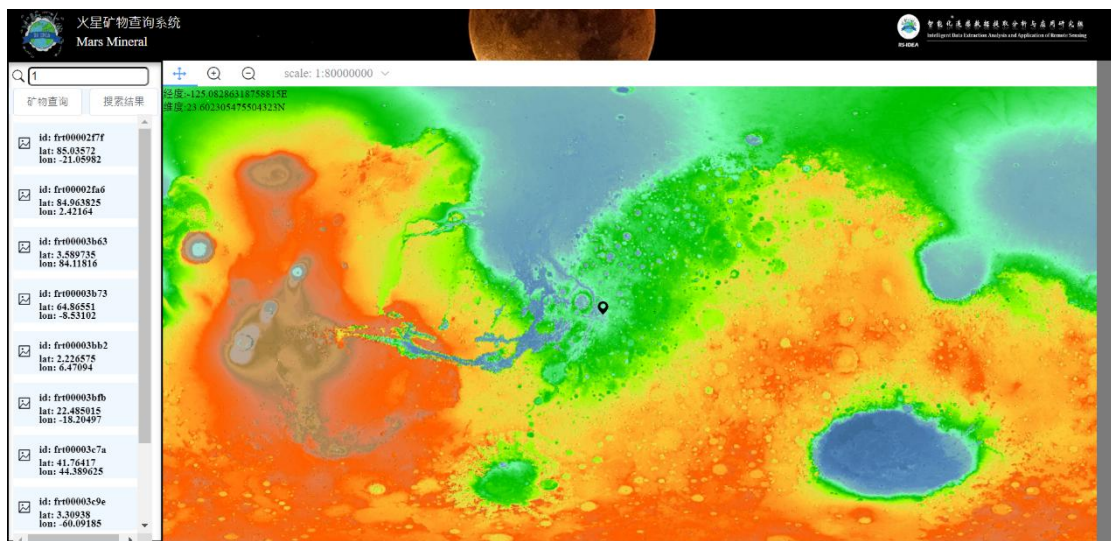


图3.16 网站CRISM图像搜索

第 3 章 项目实施情况

3.1 项目完成情况

本项目基于高光谱遥感的火星表面矿物探测研究，从火星高光谱影像数据集及分类体系、基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测模型、火星矿物查询及 CRISM 图像分析网站三个方面开展了工作，项目按计划稳步推进，并针对出现的问题及时调整技术路线，项目完成情况与计划内容基本相符，详细的工作进度见下表。

时间	工作内容
2022.06- 2022.09	1. 利用 HyperMars 模型分析 CRISM 图像，并记录矿物分布 2. 阅读相关文献，提取其研究结果当中的矿物分布信息并进行记录
2022.09- 2022.10	1. 整理 CRISM 图像矿物信息，绘制火星矿物全球分布一张图 2. 整理文献研究成果统计结果，绘制火星矿物研究现状一张图
2022.10- 2021.11	1. 完成网站框架搭建，选定技术方案，制定开发计划 2. 利用 Vue 前端框架，完成网站前端页面框架搭建 3. 整理火星 mola 图，建立火星地图展示系统
2022.11- 2023.01	1. 基于 SpringBoot 及 Mybatis-Plus 框架搭建网站后端架构 2. 打包算法代码，实现网站接入 CRISM 分析算法 3. 导入火星矿物分布数据，基于已搭建的火星地图系统增加火星矿物查询标点功能
2023.01- 2023.04	1. 学习相关算法，优化算法代码 2. 网站持续导入算法文件，补充 CRISM 图像分析功能 3. 优化后端架构，增加算法结果缓存层提高网站响应速率
2023.04- 2023.07	1. 优化网站架构，打包网站代码 2. 购买云服务器，配置服务器相关环境 3. 配置 Nginx 服务，部署网站前端

表 7 项目进展

	项目成果
数据	1. 火星矿物全球分布一张图 2. 火星矿物研究现状一张图 3. 火星矿物分类体系
模型	1. 基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测模型
应用	1. 基于 Vue 和 SpringBoot 的火星矿物查询与分析网站 2. 基于 Vue 的火星地图系统 3. 基于 SpringBoot 后端导入.jar 文件的 CRISM 图像分析系统

表 8 项目成果

3.2 项目投入程度

3.2.1 项目日常管理

本项目从 2022 年 6 月开始，到 2023 年 8 月为止，已经进行 437 天，约 62 周的时间。

项目组实行每周提交周报的制度，要求每位组员在每周六中午 12 点前向项目负责人提交每周工作汇报，既能督促组员的进度，也能很好的记录每位组员的研究经历和过程，便于大家进行项目的研讨和团队的整合。

项目组实行每周线上会议制度，每个周一的晚上八点半大家都会根据周报的内容对本周的工作进行汇报，会议流程先由组长或副组长进行项目的总体汇报，再到每个组员依次汇报本周的工作，如果遇到问题大家一起讨论，一起解决，老师和师兄师姐会针对我们的工作进行指导和监督，体现了一个团队的凝聚力和效率。汪晨倩同学会记录会议上讨论的问题，并且形成会议纪要，按时发送给每位老师同学。

同时除每周例会外，本科生成员会每周不定期进行会议或集体办公。主要目的在于加强算法部分负责同学和网站开发负责同学的交流，及时发现项目推进当中的问题，调整双方负责部分的数据接口、方法参数等，提高开发效率。

3.2.2 成员个人完成项目情况

本项目研究分为数据、模型、应用三部分内容，结合各位同学的学科背景和能力我们进行了以下分工，基于火星高光谱影像数据集的构建由汪晨倩、雨航、裴席民三位同学共同完成，CRISM 图像处理算法的优化与构建由向雨航和汪晨倩完成，基于高光谱遥感的火星矿物查询及 CRISM 图像分析网站由裴席民同学完成。大家都按照项目计划保质保量的完成了自己的任务，并且在完成的过程中极大提升了自己各方面的能力。具体的任务安排与完成情况如下表：

成员	任务	具体工作	去向
裴席民	应用	基于高光谱遥感的火星矿物查询及 CRISM 图像分析网站	参加工作
向雨航	模型	基于混合像元分解的火星矿物全自动精细探测模型的优化	大三在读
汪晨倩	数据	基于火星高光谱影像数据集的构建	大三在读

表 9 项目个人完成情况

3.3 项目经费使用情况

在项目经费使用上，除了组员最终收到的补助金外，我们还租用了一台华为云耀云服务器，花费 1,841 元，总共 6000 元。

第 4 章 总结与展望

经过一年时间的学习、讨论与工作，我们在基于高光谱遥感的火星表面矿物探测研究这一课题下已经取得了一定的进展和成果。在老师和学姐的指导下，我们使用 `matlab` 程序分析了大量火星的高光谱影像，并将其结果进行统计，最终制成了火星矿物分布一张图。在完成火星矿物分布图之后，我们收集并阅读了大量与火星矿物探测相关的论文，对论文当中的观点和结论进行了分析和记录，随后结合论文内容以及多方面的资料对论文当中的研究成果进行了校对。最终收集了上千条火星矿物的研究记录绘成了火星研究现状一张图。

研究过程中，我们需要理解和学习很多高光谱影像分析相关的算法。在刚开始的时候，项目推进得十分困难，因为我们既不熟悉高光谱相关的专业知识，对于搭建网站也不甚精通。我们在开发过程中克服了很多问题，因为没有找到切合应用的火星地图框架，所以只能自己搭建地图，使用多张火星 `mola` 图进行组合形成地图。搭建网站使用的 `java` 语言并不适合描述高光谱图像分析算法，所以我们将分析算法的 `matlab` 代码进行打包，使其能够兼容 `java` 程序，实现能够在网站上在线进行图像分析的功能。在这过程中产生了非常多的问题，例如：如何让服务器同时处理不同用户的分析需求？如何让服务器区分不同用户在分析的过程中产生的大量数据？尤其是因为高光谱图像数据偏大，对一张图像进行分析，在分析过程中产生的中间结果的大小往往接近 1GB，这就需要我们必须对中间结果的存储和删除进行管理。同时也不可避免的产生了在前后端传输数据缓慢的问题。包括后端程序一些冗杂、低效的问题，这些都需要我们进行更深入的研究和改进。

我们已经完成了项目计划当中的大半工作，后续工作主要是继续理解算法，将更多的算法组合到网页平台当中来。这一部分我们将参照之前的相关工作经验，相信能够顺利完成。在完成算法添加之后，我们计划对系统和算法进行进一步的梳理，去除在开发中考虑不周的部分，将算法过程更加集成、明确，提高系统的效率，提升算法的运行效率。

致谢

经历一年的努力，我们的大创双一流项目研究经过即将完成，这是一次十分难忘的经历，这个项目从开题到中期答辩最后结题是一个是从无到有的过程：我们有幸结识了钟燕飞老师、宋蜜老师以及柯天师姐，在他们的带领下我们开启了一段充实的科研旅程，这一年半我们付出了很多时间和努力，也收获了很多，成长了很多，这段经历是我们宝贵的人生财富。

感谢我们尊敬的钟燕飞老师，老师对待科研实事求是、一丝不苟的态度深深影响着我们，老师对细节的讲究也使我们受益匪浅，非常感谢老师的悉心指导，在项目推进遇到困难，成员失去信心完成这个项目时，钟老师时刻鼓励着我们，给予我们非常大的关心与帮助。

感谢我们亲爱的宋蜜老师与柯天师姐，每周一次的大创例会宋老师严格要求我们参会，让我们能够在规定时间内完成相应的任务，每个项目材料提交前都会仔细一遍遍帮我们审改，总是在我们遇到困难的时候给予我们鼓励和安慰，每次项目遇到问题宋老师与柯天师姐总是第一个帮我们想出解决方案，我们大家都非常感恩。

感谢我们小组的每一位成员，正是大家的努力付出才有我们现在的项目成果，尤其是疫情期间大家即便不能到校进行科研活动，但是我们每周的周报组会和任务都能按时完成，大家都辛苦了。

最后祝愿各位老师幸福安康、工作顺利，祝愿各位学长学姐、同学们身体健康、前程似锦！

参考文献

- [1] Mustard.Olivine and Pyroxene Diversity in the Crust of Mars[J].Science,2005,Vol307 :1594-1497
- [2] Poulet.Phylosilicates on Mars and implications for early martian climate[J].Nature,2005,Vol438:624-627
- [3] Mustard.Mineralogy of the Nili Fossae region with OMEGA/Mars Express data:1. Ancient impact melt in the Isidis Basin and implications for the transition from the Noachian to Hesperian[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2007,Vol112:E08S03
- [4] Ehlmann.Clay minerals in delta deposits and organic preservation potential on Mars[J].Nature,2008,Vol307 :355-358
- [5] Ehlmann.Orbital Identification of Carbonate-Bearing Rocks on Mars[J].Science,2008,Vol322 :1828-1832
- [6] Squyres.Detection of silica-rich deposits on Mars[J].Science,2008,Vol320 :1063-1067
- [7] Murchie.A synthesis of Martian aqueous mineralogy after 1 Mars year of observations from the Mars Reconnaissance Orbiter[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2009,Vol114:E00D06
- [8] Mustard.Composition Morphology and Stratigraphy of Noachian Crust[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2009,VOL114:E00D12
- [9] Ehlmann.Geologic setting of serpentine deposits on Mars[J].GEOPHYSICAL RESEARCH LETTERS, 2010,VOL37:L06201
- [10] Lichtenberg.Stratigraphy of hydrated sulfates in the sedimentary deposits of Aram Chaos, Mars[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2010,VOL115:E00D17
- [11] Milliken.Sources and sinks of clay minerals on Mars[J].Philosophical Magazine,2010,,VOL90:2293-2308
- [12] Morris.Identification of Carbonate-Rich Outcrops on Mars by the Spirit Rover[J].Science,2010,Vol329 :421-424
- [13] Ehlmann.Subsurface water and clay mineral formation during the early history of Mars[J].Nature,2011,Vol479:53-60
- [14] Ody.Global investigation of olivine on Mars Insights into crust and mantle compositions[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2013,VOL118:234-262
- [15] Viviano.Using THEMIS data to resolve the discrepancy between CRISM/OMEGA and TES modeled phyllosilicate abundance in Mawrth Vallis[J].Icarus,2013,VOL226:497-509
- [16] Sun.The geology and mineralogy of Ritchey crater Mars Evidence for post-Noachian clay formation[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2014,VOL119:810-836
- [17] Goudge.Assessing the mineralogy of the watershed and fan deposits of the Jezero crater Paleolake System, Mars[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2015,VOL120:775-808

- [18] Liuyang.End-member identification and spectral mixture analysis of CRISM hyperspectral data:A case study on southwest Melas Chasma, Mars[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2016,VOL121:2004-2036
- [19] Liuyang.Implications for the aqueous history of southwest Melas Chasma,Mars as revealed by interbedded hydrated sulfate and Fe/Mg-smectite deposits[J].Icarus,2016,VOL271:283-291
- [20] Goudge.Sedimentological evidence for a deltaic origin of the western fan deposit in Jezero crater, Mars and implications for future exploration[J].Earth and Planetary Science Letters,2017,VOL458:357-365
- [21] Wray.Columbus crater and other possible groundwater-fed paleolakes of Terra Sirenum, Mars[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2011,VOL116:E01001
- [22] Ruff.Characteristics distribution origin and significance of opaline silica observed by the Spirit rover in Gusev crater, Marst[J].JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2011,VOL116:E00F23
- [23]Christensen Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer[J] JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH,2001, Volume 106, Issue E10
- [24]Bibring Mars surface diversity as revealed by the OMEGAMars[J] Science,2005,Volume 307, Issue 5715
- [25]Bishop Phyllosilicate diversity and past aqueous activity revealed[J] Science,2008,Volume 321, Issue 5890
- [26]Boynton Evidence for Calcium Carbonate at the Mars Phoenix[J]2009, ScienceVolume 325, Issue 5936
- [27]Brown Hydrothermal formation of Clay-Carbonate alteration assemblages in the Nili Fossae region of Mars[J] Earth and Planetary Science Letters,2010,Volume 297, Issue 1.
- [28]Flahaut Identification distribution and possible origins of sulfates[J] Journal of Geophysical Research: Planets.2010.Volume 115, Issue E11.
- [29]Carter Orbital identification of clays and carbonates in Gusev crater[J] Icarus.2012.Volume 219, Issue 1
- [30]zhangxia Combining SWIR and TIR spectral features for regnizaion of phyllosilicate of martian surface[C] 2016 8th Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS)
- [31]Bramble The geological history of Northeast Syrtis Major, Mars[J] Icarus.2017.Volume 293
- [32]Buczkowski Anomalous Phyllosilicate-Bearing Outcrops South of Coprates Chasma A Study of Possible[J] Journal of Geophysical Research: Planets.2020.Volume 125, Issue 1
- [33]Beck A search for early- to mid-Noachian chloride-rich deposits on Mars[J] Icarus.2020.Volume 338, Issue C
- [34]Brown Olivine-Carbonate Mineralogy of the Jezero Crater Region[J] Journal of Geophysical Research: Planets.2020.Volume 125, Issue 3
- [35]Dapremont Igneous or Mud Volcanism on Mars The Case Study of Hephaestus Fossae[J] Journal of Geophysical Research: Planets.2021.Volume 126, Issue 2
- [36]Horgan The mineral diversity of Jezero crater[J] Icarus.2020.Volume 339, Issue C

- [37]Kamps Defining Surface Types of Mars Using Global CRISM Summary Product Maps[J] Journal of Geophysical Research: Planets.2020.Volume 125, Issue 8
- [38]Alemano Detection of aqueous alteration minerals in Martian open and closed[J] Planetary and Space Science.2021.Volume 208
- [39]baihongchun Spatial distributions and origin of hydrated sulfate minerals at the mineral[J] Planetary and Space Science.2021.Volume 207
- [40]Harish Evidence for fluvial and glacial activities within impact craters that[J] Icarus.2021.Volume 361
- [41]Horvath Evidence for geologically recent explosive volcanism in Elysium[J] Icarus.2021.Volume 365
- [42]liuzhenghao Inverted channel belts and floodplain clays to the East of Tempe Terra,[J] Earth and Planetary Science Letters.2021.Volume 562
- [43]Saranathan Adversarial feature learning for improved mineral mapping of CRISM data[J] Icarus.2021.Volume 355
- [44]Tarnas Characteristics Origins and Biosignature Preservation Potential of Carbonate-Bearing Rocks[J] Journal of Geophysical Research: Planets.2021.Volume 126, Issue 11
- [45]wuxing Imaging Mars analog minerals' reflectance spectra and testing mineral[J] Icarus.2021
- [46]wuxing Joint Hapke Model and Spatial Adaptive Sparse Representation with Iterative Background Purification for Martian Serpentine Detection[J] Remote Sensing.2021.Volume 13, Issue 3
- [47]liuyang Zhurong reveals recent aqueous activities in Utopia Planitia, Mars[J] Science Advances.2022.Volume 8, Issue 19