秦凯，聂雅茜，郝予希，等.高分五号卫星高光谱矿物信息自动提取流程构建与应用[J].世界核地质科学，2026，43(5)：XXX-XXX. doi:10.3969/j.issn.1672-0636.2026.05.001

QIN Kai，NIE Yaxi，HAOYuxi，et al.Construction and application of an automated mineral-information extraction workflow for GF-5 satellite hyperspectral imagery[J].World Nuclear Geoscience，2026，43(5)：xxx-xxx(in Chinese).

高分五号卫星高光谱矿物信息自动提取流程构建与应用

秦凯，聂雅茜，郝予希，赵英俊，陆冬华，裴承凯

1 铀资源探采与核遥感全国重点实验室，北京 100029
2 核工业北京地质研究院，北京 100029

摘要 矿物及围岩蚀变信息是铀及多金属资源勘查中识别岩浆-热液活动、构造有利部位和成矿环境的重要线索。高分五号（GF-5）卫星搭载的高光谱成像仪（AHSI）具备可见光—近红外—短波红外连续光谱观测能力，可为铁氧化物/铁羟基、铝羟基、镁羟基、碳酸盐和硫酸盐等典型矿物信息识别提供重要数据支撑。然而，在大面积多景GF-5高光谱影像实际应用中，不同景影像成像条件、地表覆盖、影像质量和背景地物差异明显，条带噪声、坏线、阴影、水体、植被和覆盖层等因素容易影响矿物信息提取效果，制约其规模化和业务化应用。针对上述问题，本文面向GF-5 AHSI反射率数据，构建了由数据接入与预检查、质量控制、有效像元掩膜、多通道端元提取、矿物目标自动筛选、矿物族级填图、类型细化和成果产品化组成的自动化处理流程。该流程综合利用PPI、VCA和N-FINDR等端元提取方法以及ACE、CEM目标检测方法，实现矿物信息从端元组织到空间填图的流程化处理。以新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景GF-5 AHSI影像开展流程验证，并以柳园典型验证区开展矿物信息地质分析。结果表明，新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景影像数据共完成36组多通道端元提取任务，自动提取端元1 728条，筛选出66个进入填图的目标端元，形成5类矿物族填图结果，说明该流程具备较好的批量处理和矿物填图结果可追溯能力。柳园验证区提取出中铝白云母、低铝白云母、方解石、白云石、绿泥石和绿帘石等矿物信息，提取的矿物信息与花岗质岩体、岩体边界、地层接触带及断裂构造之间具有一定空间对应关系。研究表明，构建的自动化流程能够实现多景GF-5影像的规范化处理和典型矿物信息自动提取，可为区域地质遥感调查、热液型铀成矿环境与蚀变异常初步筛选，以及多源综合找矿评价提供标准化矿物信息产品。

关键词 高光谱遥感；矿物信息提取；自动化流程；端元提取；矿物填图；铀矿勘查

中图分类号 P627 **文献标志码** A **文章编号** 1672-0636（2026）05-xxxx-xx

Construction and application of an automated mineral-information extraction workflow for GF-5 satellite hyperspectral imagery

QIN Kai，NIE Yaxi，HAO Yuxi，ZHAO Yingjun，LU Donghua，PEI Chengkai

1 *National Key Laboratory of Uranium Resources Exploration-mining and Nuclear Remote Sensing*，*Beijing* 100029，*China*
2 *Beijing Research Institute of Uranium Geology*，*Beijing* 100029，*China*

基金项目：新疆高光谱遥感方法找矿预测示范及快速评价技术应用项目（编号：遥技2026-9）资助
收稿日期：2026-07-14 **改回日期**：2026-08-07
第一作者：秦凯，男，1981年生，正高级工程师，博士，主要科研方向高光谱遥感。E-mail：qinkai@briug.cn
supported by application Project of Demonstration and Rapid Evaluation Technologies for Mineral Prospecting Prediction Based on Hyperspectral Remote Sensing in Xinjiang（No. 遥技 Technology 2026-9）
Received date：2026-07-14 **revised date**：2026-08-07
First author：QIN Kai，male，born in 1981，senior engineer，PhD，focusing on hyperspectral remote sensing. E-mail：qinkai@briug.cn

Abstract: Mineral assemblages and wall-rock alteration provide important clues for identifying magmatic-hydrothermal activity, structurally favorable zones, and metallogenic environments in uranium and polymetallic exploration. The Advanced Hyperspectral Imager (AHSI) onboard the GaoFen-5 (GF-5) satellite provides continuous spectral coverage from the visible and near-infrared to the shortwave-infrared regions, offering essential data support for identifying typical minerals such as iron oxides/hydroxides, Al-bearing hydroxyl minerals, Mg-bearing hydroxyl minerals, carbonates, and sulfates. However, in large-area applications involving multiple GF-5 hyperspectral scenes, substantial differences in imaging conditions, surface cover, image quality, and background materials can occur among scenes. Factors such as striping noise, bad detector lines, shadows, water bodies, vegetation, and surficial cover may adversely affect mineral information extraction, thereby limiting its large-scale and operational application.To address these issues, an automated processing workflow was developed for GF-5 AHSI reflectance data. The workflow comprises data ingestion and preliminary inspection, quality control, valid-pixel masking, multi-channel endmember extraction, automated mineral-target screening, mineral-family mapping, mineral-type refinement, and product generation. It integrates endmember extraction methods, including the Pixel Purity Index (PPI), Vertex Component Analysis (VCA), and N-FINDR, with target detection methods such as the Adaptive Coherence Estimator (ACE) and Constrained Energy Minimization (CEM), enabling standardized processing from endmember organization to spatial mineral mapping.The workflow was validated using four GF-5 AHSI scenes covering Baicheng, Fuyun, Ruoqiang, and Hami in the Xinjiang Uygur Autonomous Region, China, and geological analysis of the extracted mineral information was conducted in the representative Liuyuan validation area. A total of 36 multi-channel endmember extraction tasks were completed for the four scenes, yielding 1 728 automatically extracted endmember spectra. Of these, 66 target endmembers were selected for mineral mapping, resulting in maps of five mineral families. These results demonstrate that the proposed workflow provides effective batch-processing capability and ensures the traceability of mineral mapping results. In the Liuyuan validation area, medium-Al muscovite, low-Al muscovite, calcite, dolomite, chlorite, and epidote were identified. The spatial distributions of these minerals exhibit correspondence with granitoid intrusions, intrusion boundaries, stratigraphic contact zones, and fault structures. The results indicate that the proposed automated workflow can support the standardized processing of multiple GF-5 scenes and the automated extraction of typical mineral information. It can provide standardized mineral information products for regional geological remote-sensing surveys, the preliminary screening of hydrothermal uranium metallogenic environments and alteration anomalies, and integrated multi-source mineral exploration assessment.

Keywords:hyperspectral remote sensing; mineral-information extraction; automated workflow; endmember extraction; Mineral Mapping

高光谱遥感通过获取连续窄波段光谱信息,能够在可见光-近红外-短波红外范围内刻画地表岩石、矿物和蚀变信息的精细光谱响应,是遥感地质调查和矿产资源勘查的重要技术手段。矿物的晶体结构、化学键和离子基团差异会在特定波段形成诊断吸收特征,高光谱影像能够利用这些光谱差异识别地表矿物类型、矿物组合及部分矿物成分变化[1-3]。与传统多光谱遥感相比,高光谱遥感不仅能够提供地表宏观影像信息,还能够在像元尺度上分析地质体中矿物种类、丰度和光谱吸收参数,在岩性识别、矿物填图、蚀变异常分带和找矿预测等方面具有独特优势[4-9]。围岩蚀变是热液矿床成矿作用的重要标志,赤铁矿、针铁矿、褐铁矿、白云母、高岭石、绿泥石、绿帘石和碳酸盐等蚀变矿物在可见光-近红外-短波红外波段具有相对稳定的光谱响应特征,能够为矿化线索识别、蚀变带圈定和地质体边界修编提供

遥感信息支撑[2-4,9]。

国际上，高光谱遥感地质应用经历了由航空高光谱精细识别向星载高光谱区域应用发展的过程。AVIRIS、HyMap等航空高光谱数据具有较高空间分辨率和较好光谱质量，被用于典型矿区矿物识别和热液蚀变填图，并推动了成像光谱技术在遥感地质中的发展[4,7]。Hyperion等早期星载高光谱数据进一步促进了区域尺度矿物填图和地质信息提取研究[8]。近年来，随着EnMAP、PRISMA等新一代星载成像光谱任务的发展，星载高光谱遥感逐渐由单景示范和典型矿区应用向多场景、大范围和产品化应用方向发展[12-13]。在方法方面，高光谱矿物识别已由早期的波段比值、主成分分析和光谱角匹配，逐步发展到最小噪声分离、端元提取、光谱解混、匹配滤波、目标检测、特征吸收参数和机器学习等多方法综合应用阶段[5-11]。这些研究为星载高光谱矿物信息提取提供了重要理论和方法基础。

国内高光谱遥感地质研究早期主要依赖航空高光谱和少量国外星载高光谱数据。2018年高分五号卫星发射后，国产星载高光谱数据在地质领域的应用能力明显提升。高分五号先进高光谱成像仪（Advanced Hyperspectral Imager，简称AHSI）覆盖可见光—近红外—短波红外谱段，具有较高光谱分辨率和较大幅宽，为我国开展区域尺度矿物信息提取、蚀变异常识别和遥感地质调查提供了重要国产数据源[14]。围绕GF-5高光谱数据的矿物识别与地质应用，国内已经开展了一系列代表性研究。董新丰等[16]基于GF-5高光谱影像，在甘肃柳园和美国Cuprite地区开展矿物精细识别研究，提出综合光谱特征增强匹配度和特征参量的矿物识别方法，实现了矿物种类、亚类及绢云母成分信息识别，并与HyMap、AVIRIS等机载高光谱数据开展对比，表明GF-5矿物识别结果具有较好可靠性，可为后续业务化应用提供技术支撑。连琛芹等[17]以广东省玉水铜矿为例，采用MNF、PPI和SAM相结合的方法，在植被覆盖区提取了赤铁矿、针铁矿、高岭石、蒙脱石和白云母等蚀变矿物信息，验证了GF-5高光谱数据在复杂地表覆盖条件下开展蚀变信息提取的可行性。孙雨等[18]以甘肃省瓜州县花牛山地区为例，建立了GF-5高光谱数据预处理和蚀变矿物填图技术流程，提出整体谱形—吸收峰位协同的光谱匹配方法，成功提取了褐铁矿、赤铁矿、绿泥石、方解石、白云石及不同波长位置云母等9种蚀变矿物，并结合岩性、构造、蚀变和野外光谱测量进行了综合验证。谭宏婕等[19]进一步利用GF-5B星载高光谱数据提取西秦岭李坝造山型金矿床围岩蚀变信息，识别了绢云母化、多硅白云母化、绿泥石化和碳酸盐化等蚀变特征，表明GF-5B AHSI数据在造山型金矿床蚀变分带和成矿远景预测中具有较好应用潜力。上述研究从不同矿床类型、不同地表覆盖条件和不同地质应用场景出发，证明了国产GF-5/GF-5B高光谱数据在矿物识别、蚀变填图和地质解释方面的有效性。与此同时，GF-5高光谱数据的业务化应用也对自动化处理流程和应用系统建设提出了更高要求。于峻川等[15]面向自然资源遥感应用需求，对高分五号卫星应用系统进行了总体设计，提出应围绕产品体系、业务流程和功能组成开展系统建设，并针对海量高光谱数据处理需求提出相应解决方案。

在铀矿勘查遥感领域，国内重点开展了CASI/SASI航空高光谱测量系统在铀矿勘查中的应用[18]以及岩心成像光谱自动编录和深部蚀变分带研究[19]。叶发旺等[20]在新疆雪米斯坦地区通过识别区域热液活动中心、高铝绢云母等铀成矿相关蚀变信息，并综合构造和有利岩性开展远景区优选，显示了高光谱矿物信息对热液型铀矿找矿的辅助指示价值。另一方面，γ测量、氡及其子体测量等放射性物探方法能够从铀系放射性响应角度提供异常信息[21]。因此，高光谱遥感与放射性测量具有明显互补性：前者侧重刻画地表矿物组成、热液蚀变和成矿地质环境，后者侧重识别放射性异常。将二者与地质、构造和地球化学资料联合，有助于形成“成矿环境—蚀变响应—放射性异常”的多源铀矿远景评价思路。

总体来看，已有研究已经较好地验证了GF-5高光谱数据在矿物精细识别、蚀变矿物填图、地质边界修编和矿床蚀变分带中的应用潜

力[22-25]，也为矿物识别、端元提取、光谱解混和目标检测提供了较成熟的方法基础[4-11]。但是，现有研究多集中于典型矿区或单景影像的矿物识别方法、蚀变填图效果和地质解释分析，对面向多景GF-5高光谱影像的自动化处理流程关注仍相对不足。实际应用中，GF-5影像波段数量多、数据体量大，不同景影像在成像条件、地表覆盖、质量状况和背景地物方面差异明显，条带噪声、坏线、异常反射率值、水体、阴影、植被和覆盖层等因素均可能影响矿物信息提取效果。若缺少统一的质量控制、自动运行和成果产品化流程，容易造成处理效率低、人工干预多、参数设置不一致、成果格式不统一和结果检查困难等问题，制约GF-5高光谱数据在遥感地质中的规模化应用。

基于上述认识，本文面向高分五号高光谱影像矿物信息提取的工程化和业务化应用需求，构建包括数据接入与格式规范化、影像质量控制、有效像元筛选、典型矿物信息自动提取、成果制图和产品输出在内的自动化处理流程，并选取典型区域开展应用验证。与已有侧重矿物精细识别方法、单景蚀变填图或矿床蚀变分带解释的研究不同，本文围绕GF-5高光谱影像“如何稳定、规范、批量地产出矿物信息产品”这一实际应用问题，探索自动化流程在遥感地质应用中的可行性。研究结果可为国产星载高光谱数据在区域地质调查、矿产资源遥感评价和矿物信息产品生产中的规范化应用提供参考，并为铀矿勘查中矿物蚀变信息与放射性、地球化学及构造资料的后续联合评价提供基础数据层。

1 数据与研究区

本文围绕高分五号（GF-5）高光谱影像矿物信息自动提取流程构建与典型应用需求，选取多景GF-5高光谱成像仪影像作为流程验证数据，并以甘肃柳园地区作为典型研究区开展矿物信息提取结果分析。数据组织上，本文区分“流程验证影像”和“典型验证影像”两类数据：前者主要用于检验自动化流程在多景影像条件下的数据接入、质量控制、矿物信息提取和成果输出能力；后者用于开展较详细的矿物信息提取结果分析及其与地质背景的对应关系验证。

1.1 GF-5 高光谱影像数据

本文采用GF-5 AHSI数据作为主要遥感数据源，为满足矿物信息提取需求，本文所用影像均以反射率数据为主要处理对象，并在进入矿物信息自动提取流程前进行数据格式、空间范围、波段信息和无效值等基础检查。

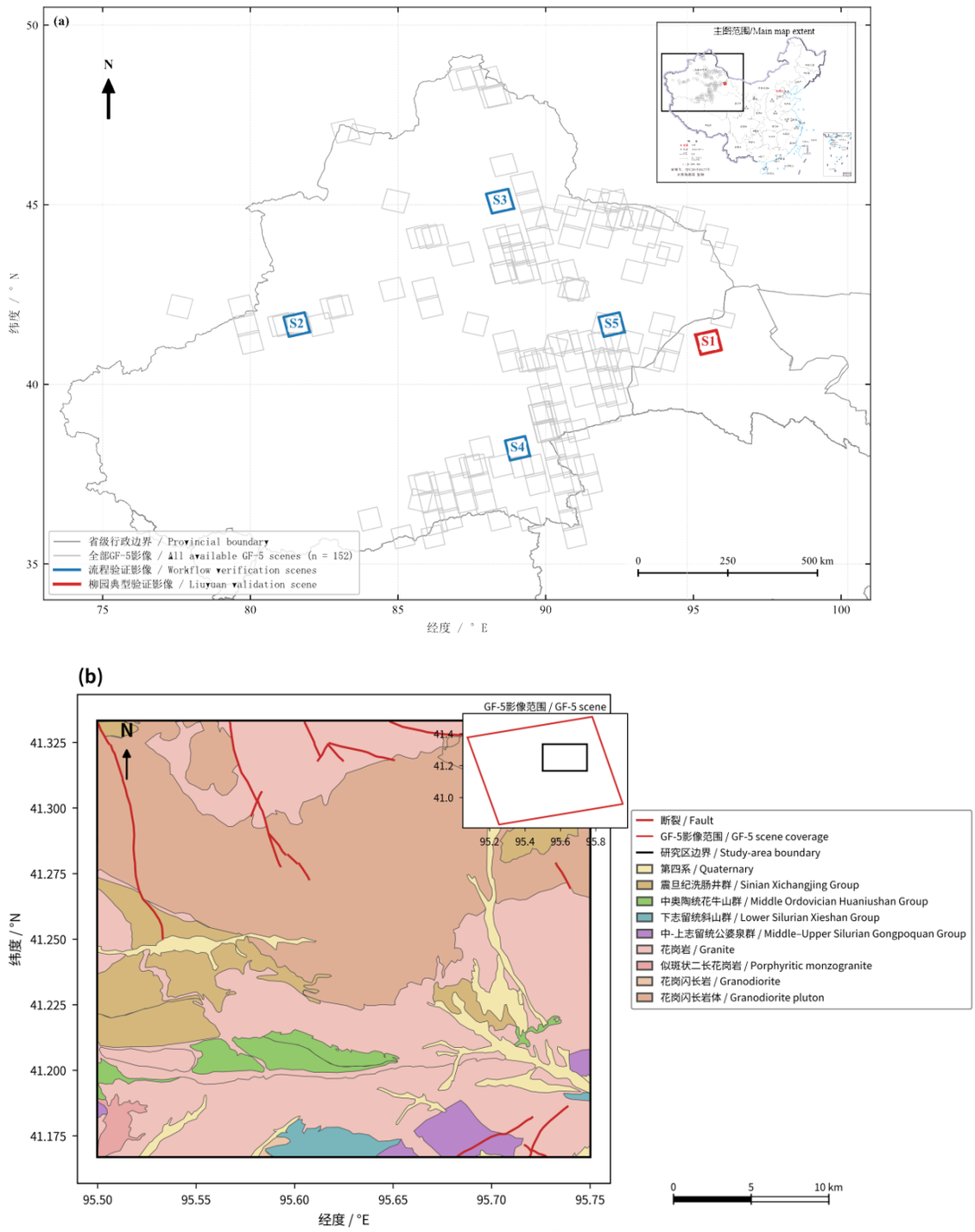
为体现流程的多景适用性，本文整理了新疆维吾尔自治区已处理的152景GF-5高光谱影像范围，并以影像覆盖范围形式进行空间表达。在此基础上，综合考虑影像空间分布、地表覆盖差异、地质背景差异和流程验证需要，从中选取拜城、富蕴、若羌和哈密4景作为流程验证影像，用于检验自动化流程在不同区域影像中的运行稳定性和成果输出一致性。与此同时，选取甘肃柳园地区1景GF-5 AHSI影像作为典型验证影像，用于开展矿物信息提取结果的详细分析。

柳园典型验证影像的传感器为AHSI，产品级别为LEVEL1，产品格式为GEOTIFF，成像时间为2018年8月7日，空间分辨率为30 m，行列数分别为2 083行和2 008列，云量约2 %。该景影像中心点位于北纬41.167 647°、东经95.514 977°附近，影像四角坐标覆盖了柳园研究区及周边一定范围，可满足后续矿物信息提取与地质背景对比分析需要。

图1a中，浅灰色矩形表示新疆维吾尔自治区152景GF-5高光谱影像范围，蓝色矩形表示流程验证影像，红色矩形表示柳园典型验证影像；图1b显示了柳园研究区地质背景及GF-5柳园典型验证影像覆盖关系。S1为柳园典型验证影像，S2～S5为从新疆152景影像中选取的流程验证影像。

1.2 研究区范围与地质背景资料

柳园研究区范围依据带坐标的区域地质图确定，图幅范围介于东经95.50°～95.75°之间、北纬介于41.18°～41.33°之间。图1b采用已有区域地质图资料作为地质背景底图，并叠加GF-5柳园典型验证影像覆盖范围和研究区边界。该范围位于GF-5柳园典型验证影像内部，可用于开展矿物信息提取结果与地质背景



a—GF-5 高光谱影像分布及流程验证影像位置；b—柳园研究区地质背景与 GF-5 影像覆盖范围。

a-Distribution of GF-5 hyperspectral scenes and locations of workflow verification scenes; b-Geological background and GF-5 scene coverage of the Liuyuan study area.

图 1　研究数据分布及柳园研究区地质背景(审图号:GS(2019)1823 号)

Fig. 1　Distribution of image data and geological background of the Liuyuan study area

之间的空间对应关系分析。

从地质图表现看,研究区内地质单元类型较多,岩体、地层、断裂构造和局部覆盖层呈现较明显的空间分异特征。不同地质单元之间的接触关系、断裂线索及岩体边界,为后续判断遥感矿物异常与地层、岩体、构造及蚀变作

用之间的关系提供了基础地质背景。

1.3 柳园研究区地质概况

北山地区位于新疆维吾尔自治区、甘肃省和内蒙古自治区交界处，是我国西北地区重要成矿带之一。该区在长期地质演化过程中经历了复杂的构造变动、岩浆活动和变质作用，成矿地质条件较为优越，已发现多种黑色金属、有色金属、稀有金属、贵金属及非金属矿产地[16,26]。柳园研究区测区位于北山中带，处于红柳河—牛圈子—洗肠井早古生代缝合带南缘，一级构造单元属塔里木-华北板块，二级构造单元属敦煌微板块[27-28]。研究区内岩浆岩、变质岩、沉积-火山岩地层和构造破碎带发育，为高光谱矿物信息提取及其地质解释提供了典型场景[16]。

1.3.1 地 层

研究区内出露地层主要包括震旦纪洗肠井群(Zxc)、中奥陶统花牛山群(O_2hn)、下志留统斜山群(S_1xs)和中—上志留统公婆泉群(S_2-$_3$gn)。这些地层总体受后期岩浆侵入、断裂构造和区域变质作用影响，空间上呈残留体、带状或星散状分布，为遥感图像中不同矿物组合和岩性背景差异提供了重要基础[16]。

震旦纪洗肠井群受海西期和印支期岩体侵入影响，局部呈残留体状产出。其总体近EW向展布，以浅海相-滨海相碎屑岩和碳酸盐岩建造为主，主要岩性包括砂质板岩、千枚状板岩、石英大理岩、角岩化粉砂质泥岩、炭质板岩、黑云母角岩及少量硅质岩[29]等。该类岩石中发育的碳酸盐、绢云母、角岩化和铁染信息，是高光谱矿物识别的重要地质背景。

中奥陶统花牛山群多被海西期及印支期岩体侵蚀，整体呈近EW向带状展布。该群为一套海相碎屑岩、火山岩夹碳酸盐岩建造，主要岩性包括灰绿色砂板岩、板岩、变质粉砂岩、角岩、玄武岩夹大理岩以及透闪石岩、砂岩夹流纹岩等。其火山岩、碳酸盐岩及接触变质岩组合，有利于形成镁羟基、碳酸盐、铁氧化物/铁羟基等多类型遥感矿物信息响应[17]。

志留系主要包括下志留统斜山群和中—上志留统公婆泉群，斜山群以碳酸盐岩为主，岩性组合包括条带状大理岩、云母石英片岩、斜长角闪岩和角闪二云母片岩等；公婆泉群为海相火山岩沉积，主要为浅变质酸性火山熔岩夹多层陆缘碎屑岩，区域上可见片岩、砂板岩和玄武岩等[16]。上述地层的变质程度较高，并受后期岩体侵入和断裂改造影响，呈现较复杂的矿物组合和光谱响应。

1.3.2 构 造

研究区所在北山南带处于塔里木与哈萨克斯坦等构造单元的对接部位，区域构造格局复杂。测区内断裂构造较发育，空间展布和组合配套具有一定规律性：主要压性、压扭性断裂多呈EW向或近EW向展布，并伴生SN向张性断裂以及NE向、NW向扭性断裂[20]。不同方向断裂的组合为岩浆侵入、热液活动和蚀变矿物发育提供了通道和空间控制条件。

1.3.3 岩浆活动与变质作用

研究区岩浆活动强烈，花岗岩和闪长岩出露面积较大，产出形式包括岩基、岩株、岩墙及多类型脉岩。区域上可划分为海西早期、海西中期和印支期等岩浆活动阶段，其中海西中期岩浆侵入活动最为强烈，是区内重要的岩浆成矿期。海西早期岩石组合以超基性岩和花岗闪长岩为主；海西中期包括闪长岩、石英闪长岩、花岗岩、似斑状花岗岩和花岗闪长岩；印支期岩浆岩以花岗岩为主[29-30]。

测区内脉岩发育，种类从超基性到酸性均有，主要形成于海西期和印支期，多充填于地层层间、岩体节理裂隙或构造断裂之中。花牛山—察客尔呼都格大断裂以北以中性、基性脉岩为主，其次为酸性脉岩，多呈近EW向、NEE向或NWW向成群成带分布；断裂以南以基性脉岩为主，局部呈雁行状、束状或帚状组合。这些岩体和脉岩的空间展布，与断裂系统和区域构造线方向密切相关，也可能对高光谱矿物异常的形态和组合产生影响。

研究区变质作用较为发育，除第四系外，多数地层不同程度经历区域变质作用，形成片麻岩、片岩、千枚岩、板岩、变质砂岩、变质火山岩和大理岩等变质岩组合。震旦系地层多变质为低绿片岩相千枚岩、板岩和大理岩等，奥陶系地层可见斑点板岩、变质玄武岩等，志留系地层则可发育角闪斜长片麻岩、含铁铝榴石

黑云片岩等较高变质程度岩石[29-30]。

除区域变质作用外，研究区还发育接触变质、动力变质及热液蚀变作用，形成角岩、矽卡岩、碎裂岩和糜棱岩等岩石类型。热液蚀变主要沿断裂带及层间裂隙发育，常见蚀变类型包括褐铁矿化、蛇纹岩化、绿泥石化、绢云母化、硅化、黄铁矿化、黄铁绢云岩化和高岭土化等[16,30-31]。这些蚀变矿物与 GF-5 可见光-短波红外波段具有较明确的诊断光谱响应，是本文开展铁氧化物/铁羟基、铝羟基、镁羟基、碳酸盐等矿物信息自动提取的重要依据[22]。

2　GF-5高光谱矿物信息自动提取算法流程

针对高分五号高光谱影像数据量大、波段多、影像质量差异明显以及矿物信息提取流程人工交互较多等问题，本文构建了面向 GF-5 AHSI 反射率数据的矿物信息自动提取算法流程。该流程以高光谱反射率影像为基础，围绕数据接入、数据预检查、质量控制、有效像元筛选、矿物族级提取、矿物类型细化和成果产品输出等环节，形成从影像输入到矿物信息图件输出的自动化处理链条。算法流程见图 2。

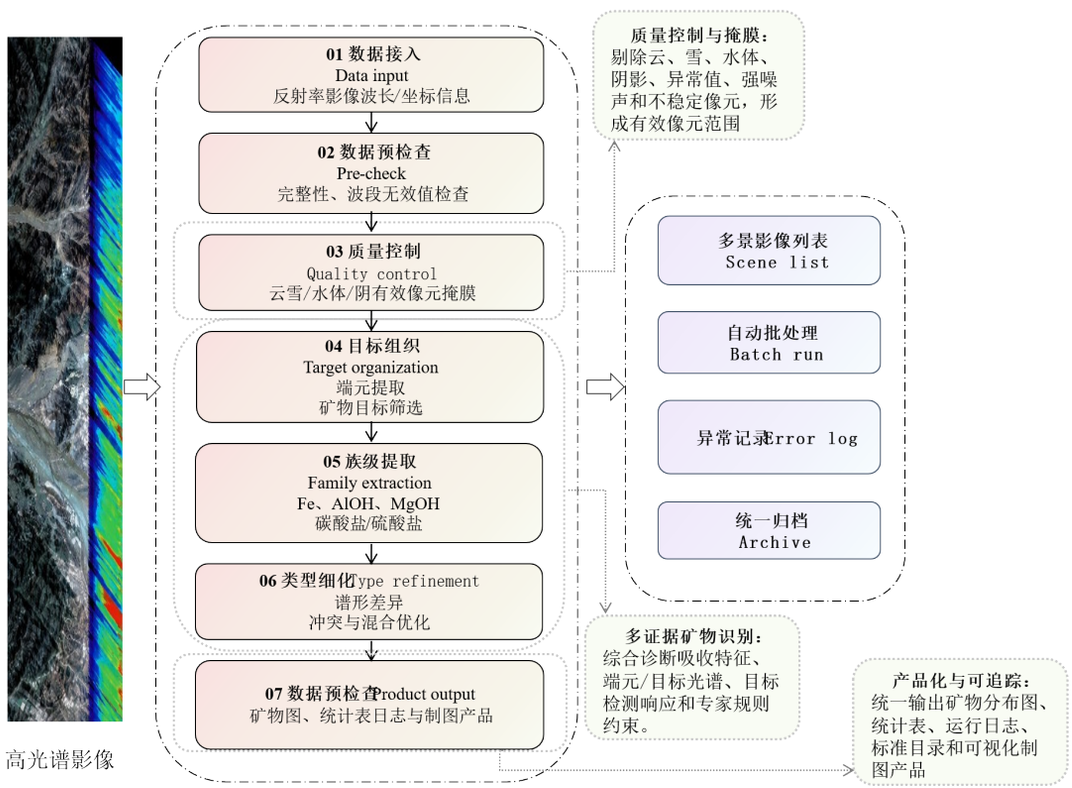


图 2　GF-5 高光谱矿物信息自动提取流程

Fig. 2　Automatic mineral information extraction workflow for GF-5 hyperspectral imagery

与传统单景人工解译或交互式高光谱处理方法相比，本文流程更加注重多景影像条件下的自动运行、过程可追踪和成果规范化输出。流程设计上综合考虑矿物诊断吸收特征、端元光谱信息、目标检测响应、有效像元掩膜和专家规则约束，以提高复杂地表条件下矿物信息提取结果的稳定性。

2.1　流程总体设计

GF-5 高光谱矿物信息自动提取流程主要包括数据接入、数据预检查、质量控制、目标组织、族级提取、类型细化和成果输出 7 个环节。首先，对 GF-5 AHSI 反射率影像、头文件、波长信息和空间参考信息进行读取与检查，确保输入数据满足后续光谱分析要求。其次，根据影像数据质量和非地质地物干扰特征，建立有效像元掩膜，剔除云、雪、水体、阴影、无效值、强噪声和明显异常像元。随后，在有效像元范围内开展端元提取和矿物目标信息筛选，构建与

影像数据相匹配的矿物目标集合。最后,结合典型矿物的诊断吸收特征和多证据约束规则,完成矿物信息提取、类型细化和成果输出。

该流程的核心思想是:在多景GF-5高光谱影像处理中,首先保证输入数据质量和有效像元范围的可靠性,再开展矿物信息识别;在矿物识别阶段,先形成相对稳定的矿物族级结果,再进一步进行矿物类型细化,从而降低单一步骤误判对最终成果的影响。

2.2 数据接入与预检查

数据接入模块主要完成GF-5高光谱影像及其相关辅助文件的自动读取和一致性检查。输入数据包括GF-5 AHSI反射率影像、影像头文件、波长信息、空间参考信息和影像范围信息等。程序首先检查影像文件是否完整,判断影像行列数、波段数、数据类型、无效值设置和波长范围是否符合处理要求;其次检查影像空间坐标、像元大小和影像范围是否能够正常读取;最后对波段信息进行统一组织,为后续质量控制和矿物信息提取提供标准化输入。

在多景批量处理时,不同影像可能存在文件命名差异、波段数量不一致、局部波段异常、空间参考缺失或无效值设置不统一等问题。数据预检查能够在流程开始阶段发现异常,并将异常信息写入日志文件,避免问题影像直接进入后续矿物提取环节,影响批处理结果的稳定性。

2.3 影像质量控制与有效像元筛选

高光谱影像质量对矿物信息提取结果具有直接影响。GF-5 AHSI数据在实际应用中可能受到条带噪声、坏线、低信噪比波段、阴影、水体、云雪、地表覆盖层和局部异常值等因素影响。为降低这些干扰对矿物识别结果的影响,本文在矿物信息提取前设置质量控制和有效像元筛选环节。

质量控制首先对影像反射率值范围、无效值比例、异常高值和异常低值分布进行检查;其次结合可见光—近红外—短波红外波段的光谱响应特征,对明显的水体、阴影、云雪和强噪声区域进行掩膜;同时对不适合参与矿物识别的像元进行剔除,形成有效像元掩膜。后续端元提取、目标检测和矿物信息识别均在有效像元范围内进行。

2.4 端元提取与矿物目标信息组织

在有效像元范围内,流程进一步开展端元光谱提取和矿物目标信息组织。端元可以理解为影像中具有代表性的纯净或近似纯净光谱响应,其光谱形态能够反映研究区内主要岩石、矿物和地表类型特征。本文流程采用多方法提取和筛选思路,结合高光谱数据降维、纯净像元搜索和端元光谱筛选等步骤,获取影像中的候选端元光谱。

候选端元并不直接等同于矿物类别。由于端元中可能包含阴影、植被、覆盖层、噪声、混合地物和非目标地物,因此需要进一步结合矿物诊断吸收特征和已有矿物光谱知识进行筛选。流程重点关注可见光-近红外-短波红外波段中与矿物识别相关的光谱特征,如铁氧化物/铁羟基在可见光-近红外波段的铁吸收和铁染响应,铝羟基矿物在2.2 μm附近的吸收特征,镁羟基矿物在2.25和2.3 μm附近的吸收组合,碳酸盐矿物在2.33 μm附近的吸收特征,以及部分硫酸盐矿物的短波红外吸收特征等。

2.5 矿物族级信息提取

矿物族级信息提取是本文流程的主体环节。考虑到GF-5影像空间分辨率为30 m,单个像元内往往存在混合地物和混合矿物响应,若直接进行矿物种级识别,容易受到噪声、覆盖层和光谱混合影响。因此,本文采用“先族级识别、后类型细化”的策略,首先提取相对稳定的矿物族级信息。

族级提取主要面向铁氧化物/铁羟基、铝羟基、镁羟基、碳酸盐和硫酸盐等典型矿物信息类型。流程根据不同矿物族的诊断吸收位置、吸收深度、谱形变化和目标检测响应,结合有效像元掩膜和端元目标集合,对影像像元进行分类型判别。对于具有明确矿物光谱响应的像元,输出对应矿物族级结果;对于光谱响应弱、干扰较强或证据不足的像元,则降低其可信度或不输出矿物类型。

2.6 矿物类型细化与结果优化

在族级矿物信息提取基础上,流程进一步开展矿物类型细化。该步骤主要针对具有相似吸收位置但光谱形态存在差异的矿物类型

进行进一步区分。例如，铝羟基矿物中白云母、高岭石、伊利石等在2.2 μm附近均具有吸收特征，但其吸收峰位置、双吸收特征和肩部形态存在差异；碳酸盐矿物中方解石、白云石和含铁碳酸盐矿物在2.3 μm附近均有响应，但主吸收位置和伴随吸收特征有所不同；镁羟基矿物中绿泥石、绿帘石、角闪石、蛇纹石等也需要结合2.25、2.33和2.38 μm附近吸收组合进行综合判断。

结果优化环节重点解决两类问题：1）减少非目标地物误判；2）处理不同矿物信息之间的光谱混合和冲突。对于光谱证据不足或受覆盖层、阴影、噪声影响较强的区域，流程采用保守输出策略，避免过度解释；对于可能存在混合响应的像元，结合不同矿物族的特征强度和空间关系进行综合判断。通过该步骤，可形成更适合地质解释的矿物类型结果。

2.7　成果制图与产品输出

自动化流程最终输出多类成果产品，包括有效像元掩膜、矿物族级信息图、矿物类型细化图、像元统计表、运行日志和制图产品等。成果文件按照统一目录结构进行归档，便于多景影像批处理结果管理和后续对比分析。

其中，有效像元掩膜用于说明参与矿物信息提取的像元范围；矿物族级信息图用于展示主要矿物信息类型的空间分布；矿物类型细化图用于进一步反映典型矿物类别差异；统计表用于记录不同矿物类型的像元数量、面积比例和输出状态；日志文件用于追踪每景影像的处理过程、异常信息和运行状态。通过统一成果输出，流程能够为GF-5高光谱矿物信息提取提供规范化产品，也为后续区域地质解释、矿产远景分析和多景成果对比提供数据基础。

2.8　流程特点

总体来看，本文构建的GF-5高光谱矿物信息自动提取流程具有以下特点：1）流程完整性较强，覆盖了从数据接入、质量控制、矿物识别到成果输出的主要环节，能够减少传统高光谱处理中的人工重复操作；2）具有一定批处理能力，适用于多景GF-5影像的统一处理和成果归档；3）强调质量控制和有效像元筛选，避免将明显受干扰区域直接纳入矿物识别；4）采用“族级提取—类型细化”的分级识别思路，在保证结果稳定性的基础上提高矿物信息表达能力；5）成果输出形式较规范，便于与地质图、断裂、岩体、矿点和地面验证资料进行叠加分析。为进一步明确流程各环节的自动化程度、参数来源以及人工干预边界，本文对数据预检查、有效像元筛选、端元提取、矿物判定和成果输出等环节进行了归纳，具体见表1。

表1 GF-5高光谱矿物信息自动提取流程的自动处理与人工复核边界

Table 1 Automated processing and manual review boundaries in the GF-5 hyperspectral mineral information extraction workflow

流程环节	处理方式	参数来源	是否人工干预
数据接入与预检查	自动	固定数据规范	否
有效像元掩膜	自动	预设反射率及指数阈值	否，异常影像可复核
PPI/VCA/N-FINDR端元提取	自动	参数模板	否
候选端元筛选	自动筛选	吸收位置、深度及谱形规则	否，可人工复核
ACE/CEM目标检测	自动	统一阈值或自适应阈值	否
矿物族级判定	自动	矿物族规则库	否
矿物类型细化	自动	吸收中心及组合特征	否
栅格转矢量	自动	最小图斑及邻域规则	否
地质解释与图面整饰	人工	专家知识	是

3　GF-5高光谱矿物信息自动提取结果与成果表达

针对GF-5 AHSI高光谱影像波段数量多、数据体量大、影像质量差异明显以及矿物光谱响应容易受噪声、覆盖层和混合像元影响等问题，本文构建了面向多景数据的矿物信息自动提取流程。该流程以反射率影像为输入，以质量控制、端元组织、矿物目标筛选、族级填图、类型细化和成果归档为主线，形成从数据接入到矿物成果输出的连续化处理链条。

与单景人工交互式处理相比，本文流程强

调批量化和可追踪性。一方面，通过统一的数据检查、掩膜构建和多通道端元提取，降低不同景影像之间预处理状态和质量差异对矿物识别结果的影响；另一方面，通过端元表、候选目标表、矿物族填图结果、类型细化结果和日志文件等中间成果，实现矿物信息提取过程的逐级记录和复核。

3.1 新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景数据自动化运行情况

为检验流程在多景GF-5数据中的批量运行能力，本文选取新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景GF-5 AHSI反射率影像开展自动化处理试验。四景数据作为一个整体进入统一流程，依次完成数据预检查、有效像元掩膜构建、多通道端元提取、矿物目标筛选、族级填图和成果产品化输出。表2给出了新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景数据的自动化处理环节、通道设置、运行统计和主要输出。

表2 GF-5新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景高光谱矿物信息自动提取流程运行统计

Table 2 Automated workflow statistics of mineral-information extraction from four GF-5 hyperspectral scenes in Xinjiang

流程环节	自动化处理内容	多通道/多方法设置	多景运行情况	主要输出及作用
数据接入与预检查	自动读取4景GF-5 AHSI反射率数据，检查影像行列数、波段数、空间参考、无效值和目录结构，统一组织后续处理输入	统一采用批处理入口；按景建立标准化输入、输出和日志目录	4景数据全部完成接入与预检查；总像元数为16 774 928个	形成预检查报告和规范化反射率数据，为后续质量控制和端元提取提供统一数据基础
质量控制与有效像元掩膜	自动识别无效值、异常反射率、阴影、水体、云雪及低质量像元，生成推荐有效像元掩膜，并记录质量控制结果	面向VNIR、SWIR和全谱段数据分别进行质量诊断；结合有效像元掩膜约束后续矿物识别	4景有效像元共13 330 410个，占总像元的79.47%	输出有效像元掩膜和质量诊断结果，减少无效背景和噪声像元对矿物识别的干扰
多通道端元提取	在有效像元范围内自动提取代表性端元，并按光谱通道和提取方法组织端元结果	设置VNIR_Fe、SWIR_Mineral、Selected_Full等3类通道；每景组合PPI、VCA、N-FINDR等3种端元提取方法	4景共形成36组端元提取任务，自动提取端元1 728条	输出端元光谱、端元位置、端元候选表和端元质量信息，提高矿物目标召回能力
矿物目标自动筛选	依据诊断吸收位置、吸收深度、谱形质量、矿物族规则和异常背景约束，对端元进行自动筛选和归类	面向铝羟基类、碳酸盐类、镁羟基类、铁氧化物/铁氢氧化物类、硫酸盐类等矿物族建立规则筛选	4景形成物种级候选目标93个，最终筛选出进入填图的目标端元66个	输出矿物目标库和候选/剔除记录，使端元选择过程可追踪、可复核
矿物族级自动填图	以筛选后的目标端元为输入，自动计算目标响应并生成矿物族级空间分布结果	采用ACE和CEM等目标检测方法，结合矿物族约束进行综合判别	4景形成5类矿物族填图结果；可能矿物信息像元816 662个，较可靠像元171 861个，高置信像元57 067个	输出矿物族级栅格图、响应强度图和可信度分级结果，用于多景矿物信息快速筛查
成果产品化与归档	对矿物提取结果进行统一命名、地理参考、统计汇总和成果归档，形成可直接用于制图和分析的产品	按景输出栅格成果、统计表、日志文件和中间过程文件；统一成果目录结构	4景均完成从预检查到成果输出的完整自动化流程	形成可复现的矿物信息产品包，为大范围GF-5矿物填图和后续地质解释提供数据支撑

注：表中统计对象为新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景GF-5 AHSI反射率数据，柳园验证区结果不计入本表。可能矿物信息像元、较可靠像元和高置信像元分别对应矿物族级提取结果中的不同可信度等级

由表2可见，本文流程能够在多景数据上保持统一的处理链条和成果组织方式。新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景数据共完成36组多通道端元提取任务，自动提取端元1 728条，并通过规则筛选形成66个进入填图的目标端元。该结果说明，本文流程不仅能够输出矿物空间分布结果，也能够对端元提取、目标筛选和填图过程进行数量化记录，体现了较强的自动化和可追踪特征。

3.2 柳园验证区矿物提取结果

柳园典型验证区提取出的矿物主要包括中铝白云母、低铝白云母、方解石、白云石、绿泥石和绿帘石。不同矿物类型在研究区内呈现出一定的空间分异特征。

白云母类矿物主要分布于花岗质岩体内部、岩体边界及局部接触带附近，其中中铝白

云母和低铝白云母在部分区域表现出不同的空间组合关系。方解石和白云石等碳酸盐类矿物主要与部分地层单元、碳酸盐岩及岩性转换部位有关。绿泥石和绿帘石则多分布于断裂附近、岩体边部以及镁铁质蚀变或低级变质作用较明显的区域。

矿物信息与地层、岩体边界、接触带及断裂构造之间具有一定的空间对应关系，表明GF-5 AHSI影像提取结果能够反映研究区主要矿物组合及其地质背景，可为岩性分析、蚀变异常识别和后续野外验证提供参考。

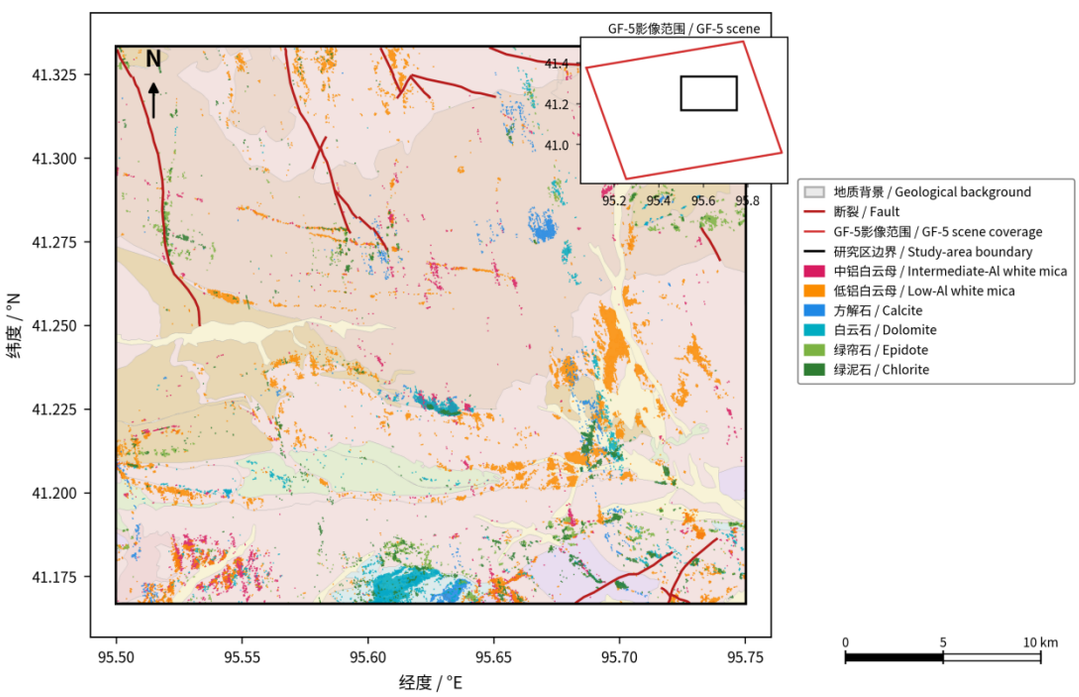


图 3　柳园验证区矿物矢量提取结果图（图 1a S1）

Fig. 3　Extracted mineral vector map of the Liuyuan validation area

3.3　成果组织与结果组织

新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密 4 景影像均形成了矿物族级栅格图、目标响应图、可信度分级结果、矿物类型细化结果、矿物矢量图斑及统计表等成果。各景影像的端元光谱、候选目标、填图目标及矿物图斑均保留了相应记录，可用于检查矿物异常的端元来源和判别依据。

矿物矢量成果采用统一的属性字段和分类体系，可直接用于专题制图及与地质资料的空间叠加。不同景影像的结果采用一致的目录结构和命名方式，便于开展多景成果汇总、矿物异常对比和后续复核。

总体而言，新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密 4 景数据获得了稳定的矿物族级和可信度分级结果，柳园验证区进一步识别出白云母、碳酸盐、绿泥石和绿帘石等典型矿物。矿物分布与地层、岩体及断裂构造之间表现出一定的地质对应关系，说明提取结果可为区域矿物填图、遥感地质解释和矿物异常筛选提供数据支撑。

4　典型区矿物提取结果与地质分析

4.1　柳园验证区地质背景与矿物信息总体特征

柳园验证区内出露地层和侵入岩类型较多，地质背景较为复杂。根据地质图，研究区内主要发育第四系覆盖层、震旦纪洗肠井群、中奥陶统花牛山群、下志留统斜山群、中—上志留统公婆泉群，以及花岗岩、似斑状二长花岗岩和花岗闪长岩体等侵入岩单元。区内断裂构造较发育，局部岩体边界、地层接触带和构造交汇部位明显，为开展高光谱矿物信息提取与地质解释提供了较好的验证条件。

基于 GF-5 高光谱影像自动提取结果，柳

园验证区内识别出白云母类、碳酸盐类和绿泥石-绿帘石类等典型矿物信息。其中,白云母类矿物包括中铝白云母和低铝白云母,碳酸盐类矿物包括方解石和白云石,镁铁质蚀变矿物主要包括绿泥石和绿帘石。从空间分布上看,矿物信息并非均匀分布,而是呈现出局部集中、沿带展布和受地质边界控制的特征。矿物图斑总体沿地层界线、岩体边部、断裂附近及不同岩性单元接触部位分布,说明矿物矢量成果与研究区地质背景之间具有一定对应关系。

4.2 白云母类矿物与花岗质岩体及接触带关系

图3中白云母类矿物是柳园验证区内较为突出的矿物信息之一,主要包括中铝白云母和低铝白云母两类。白云母类矿物在空间上与花岗质侵入岩、岩体边界及局部接触带具有较好的对应关系,尤其是在花岗岩、似斑状二长花岗岩及相关花岗闪长岩体周缘,白云母类矿物图斑较为发育。这一特征说明,GF-5高光谱数据能够较好捕捉与长英质岩浆活动、围岩蚀变或热液作用有关的含铝羟基矿物信息。

从地质意义上看,白云母类矿物常与绢云母化、钾化、泥化或酸性蚀变作用有关。在花岗质岩体及其边部,岩浆-热液活动往往会促使围岩或岩体自身发生不同程度的蚀变,形成白云母、绢云母、高岭石等含铝矿物组合。图3中白云母类矿物并非完全覆盖整个花岗质岩体,而是在岩体边缘、局部接触部位和断裂附近呈片状或带状分布,这种空间特征更符合蚀变矿物局部富集的实际情况,也说明自动提取流程没有简单地将整片岩体误判为白云母异常。

中铝白云母和低铝白云母在研究区内既有相邻分布,也存在局部差异。中铝白云母相对更可能反映Al-OH吸收位置较稳定、白云母光谱特征较典型的区域;低铝白云母则可能与白云母成分变化、伊利石化或不同蚀变强度有关。二者的并行出现说明,GF-5高光谱数据不仅能够识别白云母族矿物,还能够在一定程度上反映白云母类矿物内部的光谱差异。虽然这种细分仍需依赖实测光谱或样品验证进一步确认,但从遥感地质分析角度看,其空间分异特征对于判断蚀变分带和岩体边部作用具有参考价值。

4.3 碳酸盐类矿物与地层单元及岩性边界关系

方解石和白云石是图3中提取出的主要碳酸盐类矿物。与白云母类矿物相比,碳酸盐类矿物分布相对零散,但在部分地层单元、岩性转换部位和构造附近仍表现出一定的空间聚集特征。结合图1b地质背景可见,碳酸盐类矿物主要出现在地层接触关系较复杂、岩性变化明显或构造影响较强的局部地段,说明其分布可能受到原始沉积岩性、后期热液充填及风化淋滤作用的共同影响。

中奥陶统花牛山群和中—上志留统公婆泉群等地层单元在研究区内具有一定展布范围,局部可能包含碳酸盐质岩性、钙质组分或受后期构造-热液作用影响的碳酸盐化现象。图3中方解石和白云石局部出现在这些地层或其邻近部位,说明高光谱矿物提取结果能够为判断碳酸盐质地层、碳酸盐化蚀变或含碳酸盐矿物的岩性组合提供线索。

从光谱识别角度看,方解石和白云石在短波红外2.3 μm附近具有较典型的诊断吸收特征,是高光谱遥感中相对具有识别基础的一类矿物。但实际应用中,碳酸盐类矿物也容易受到混合像元和相近吸收特征的影响。例如,部分绿泥石、绿帘石或其他镁羟基矿物也可能在2.25～2.35 μm附近产生吸收响应,导致碳酸盐类和镁铁质蚀变矿物之间存在一定混淆。因此,碳酸盐类矿物图斑在地质解释时应重点结合地层单元、岩性背景、断裂构造和邻近矿物组合进行综合判断,而不宜单独作为岩性边界划分依据。

4.4 绿泥石-绿帘石类矿物与构造及中基性岩性关系

绿泥石和绿帘石是研究区内重要的镁铁质蚀变矿物信息。图3显示,绿泥石和绿帘石多呈局部片状、条带状或斑块状分布,其空间位置与部分断裂附近、岩体边界、地层接触带及中基性岩性相关区域具有一定对应关系。这种分布特征表明,绿泥石—绿帘石类矿物可能反映了区域内绿泥石化、绿帘石化等蚀变作

用，也可能与某些原岩成分较富镁铁质的岩性单元有关。

在区域地质分析中，绿泥石和绿帘石常见于低级变质作用、基性—中性岩石蚀变、热液蚀变以及构造破碎带附近。柳园验证区内断裂构造较发育，侵入岩体与地层单元之间存在多处接触关系，构造活动和岩浆热液活动均可能为绿泥石、绿帘石等矿物的形成或富集提供条件。图 3 中绿泥石-绿帘石类矿物在断裂附近和部分岩体边缘出现，说明自动提取结果能够反映一定的构造—蚀变响应。

同时，绿泥石和绿帘石之间的光谱差异相对较细微，二者在短波红外波段均可能表现出与 Mg-OH、Fe-OH 有关的吸收特征。在 GF-5 卫星空间分辨率和复杂地表覆盖条件下，自动区分绿泥石和绿帘石仍存在一定不确定性。因此，在地质解释中可将二者作为镁铁质蚀变矿物组合进行综合分析，重点关注其与断裂、岩体边界和地层接触带之间的空间关系，而不宜过度强调单个图斑的矿物种属边界。

4.5　矿物组合特征及其地质指示意义

从矿物组合角度看，柳园验证区内白云母类、碳酸盐类和绿泥石-绿帘石类矿物共同构成了较为典型的高光谱矿物信息组合。白云母类矿物主要指示含铝羟基矿物响应，可与绢云母化、泥化或长英质岩体相关蚀变有关；碳酸盐类矿物反映方解石、白云石等钙镁碳酸盐矿物响应，可能与碳酸盐质地层、碳酸盐化蚀变或脉体充填有关；绿泥石-绿帘石类矿物则反映镁铁质蚀变或低级变质矿物组合，常与中基性岩性、构造破碎带或热液蚀变有关。

这些矿物信息在空间上的并行叠加关系具有一定地质意义。若某一区域同时出现白云母类矿物和碳酸盐类矿物，可能指示含铝蚀变与碳酸盐化作用叠加，或反映不同岩性单元之间的接触过渡关系。若白云母类矿物与绿泥石-绿帘石类矿物共同分布于岩体边部或断裂附近，则可能反映较复杂的热液蚀变分带。若碳酸盐类矿物与绿泥石-绿帘石类矿物在地层接触带附近相伴出现，则可能与原岩组成差异、构造改造或后期热液作用有关。

因此，图 3 矿物矢量成果的价值不仅在于识别单一矿物类型，更在于揭示不同矿物组合与地质单元之间的空间关系。通过将矿物矢量与地质图并行叠加，可以从“岩性单元—构造背景—矿物响应”三个层面开展综合分析，从而为区域蚀变信息识别、岩性辅助判别和重点部位圈定提供依据。

4.6　自动提取结果的可靠性与局限性

从柳园验证区应用结果看，GF-5 高光谱矿物信息自动提取流程能够较为有效地识别白云母、碳酸盐、绿泥石和绿帘石等典型矿物信息，并且提取结果与地质图中的岩体、地层和构造具有一定空间对应关系。这说明该流程具备较好的地质解释基础，不是单纯的光谱分类结果，而是能够为遥感地质分析提供具有地质含义的矿物信息产品。

但同时也应注意，高光谱矿物提取结果仍存在一定局限性。首先，GF-5 影像空间分辨率为 30 m，单个像元内可能包含多种矿物、岩屑、覆盖层和阴影信息，混合像元会影响矿物识别精度。其次，研究区部分地段存在第四系覆盖、风化壳和坡积物，地表覆盖会削弱基岩矿物的光谱响应。再次，不同矿物之间存在光谱相似性，尤其是碳酸盐类矿物与部分镁羟基矿物、绿泥石与绿帘石之间，可能出现局部混淆。

因此，本文提取的矿物矢量成果更适合作为地质解释和异常筛选的辅助信息。对于重点图斑和关键矿物组合区，后续仍需结合野外调查、样品测试、实测光谱、岩石薄片和已有地质资料进行验证。特别是在白云母类矿物集中区、碳酸盐类矿物与断裂交汇区、绿泥石—绿帘石类矿物沿接触带分布区，应优先开展针对性核查，以进一步明确其地质成因和应用价值。

综合地质图和矿物矢量成果分析，柳园验证区 GF-5 高光谱矿物提取结果总体具有较好的地质合理性。白云母类矿物主要与花岗质岩体、岩体边界和局部蚀变带有关；碳酸盐类矿物与部分地层单元、岩性转换部位及构造影响区存在一定关系；绿泥石-绿帘石类矿物则主要反映镁铁质蚀变、低级变质或构造-岩体边部相关矿物响应。不同矿物类型之间的空间组合关系为识别蚀变分带、岩性变化和重点

地质部位提供了有效线索。

总体而言，GF-5高光谱矿物信息自动提取流程不仅能够实现矿物类型的自动识别和矢量化表达，还能够与地质图、断裂构造和岩体分布进行联合解释。柳园验证区结果表明，该方法在复杂地质背景下具有较好的应用潜力，可为大范围高光谱矿物填图、遥感地质解释和后续地质调查工作提供技术支撑。

5 结 论

1）本文面向GF-5 AHSI高光谱影像矿物信息自动提取需求，构建了涵盖数据预检查、质量控制、有效像元掩膜、多通道端元提取、矿物目标筛选、矿物族级填图、类型细化及成果产品化的自动处理流程。该流程融合多种端元提取方法与矿物诊断光谱特征，采用“族级识别—类型细化”的分级提取策略，实现了多景影像的规范化、批量化处理，并提高了成果的可追踪性和复用性。

2）新疆维吾尔自治区拜城、富蕴、若羌和哈密4景GF-5影像共完成36组多通道端元提取任务，获得1 728条端元，筛选出66个填图目标端元，形成5类矿物族填图结果，表明该流程具有较好的批量运行能力。柳园验证区识别出白云母类、方解石、白云石、绿泥石和绿帘石等矿物，其空间分布与花岗质岩体、岩体边界、地层接触带及断裂构造具有一定对应关系，说明提取结果具有地质合理性和解释价值。

3）受GF-5影像30 m空间分辨率、混合像元、地表覆盖、阴影及残余条带噪声影响，部分光谱相似矿物仍可能发生混淆，自动提取成果应主要作为地质解释和异常筛选的辅助信息。从铀矿勘查与核地质应用角度看，本文提取的白云母、碳酸盐、绿泥石-绿帘石以及铁氧化物/铁羟基等矿物信息，可作为识别岩浆-热液活动、断裂构造、岩体接触带及潜在围岩蚀变组合的间接线索，但不能直接等同于铀含量异常或放射性异常。后续应扩大多景影像和典型铀矿区验证样本，加强实测光谱、岩石矿物测试和野外地质核查，并融合航空或地面γ能谱、土壤氡、U-Th-K地球化学异常、构造、岩体、地层及矿产地资料，构建“矿物蚀变信息—放射性异常—成矿地质条件”多源联合评价模型，进一步提高铀成矿有利地段筛选和找矿预测的可靠性。

致谢：感谢核工业北京地质研究院项目组成员孙雨正高级工程师、田丰正高级工程师在遥感地质解译、矿物识别结果分析和论文修改过程中提出的建设性意见。

参考文献

1 Hunt G R. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared[J]. Geophysics, 1977, 42(3): 501-513.

2 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: 12653-12680.

3 CLARK R N. Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy[M]//RENCZ A N. Manual of Remote Sensing. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1999: 3-58.

4 Goetz A F H, Vane G, Solomon J E, et al. Imaging spectrometry for earth remote sensing[J]. Science, 1985, 228(4704): 1147-1153.

5 Green A A, Berman M, Switzer P, et al. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1988, 26(1): 65-74.

6 Kruse F A, Lefkoff A B, Boardman J W, et al. The spectral image processing system (SIPS)—interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data [J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 44(2/3): 145-163.

7 Green R O, Eastwood M L, Sarture C M, et al. Imaging spectroscopy and the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 65(3): 227-248.

8 Kruse F A, Boardman J W, Huntington J F. Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2003, 41(6): 1388-1400.

9 van der Meer F D, van der Werff H M A, van Ruitenbeek F J A, et al. Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 14(1): 112-128.

10　Keshava N, Mustard J F. Spectral unmixing[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2002, 19(1): 44-57.

11　Bioucas-Dias J M, Plaza A, Dobigeon N, et al. Hyperspectral unmixing overview: Geometrical, statistical, and sparse regression-based approaches[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2012, 5(2): 354-379.

12　Guanter L, Kaufmann H, Segl K, et al.The EnMAP spaceborne imaging spectroscopy mission for earth observation[J]. Remote Sensing, 2015, 7(7): 8830-8857.

13　Loizzo R, Guarini R, Longo F, et al. PRISMA: The Italian hyperspectral mission [C]//2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Valencia, Spain: IEEE, 2018: 175-178.

14　Liu Yinnian, Zhang Jing, Zhang Ying, et al. The advanced hyperspectral imager: aboard China's GaoFen-5 satellite[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, 2019, 7(4): 23-32.

15　于峻川，甘甫平，闫柏琨，等. 面向自然资源遥感应用的高分五号卫星应用系统设计[J]. 上海航天，2019，36(S2)：192-198.
Yu Junchuan, Gan Fuping, Yan Baikun, et al.Design of GF-5 satellite application system for remote sensing application of natural resources [J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(S2): 192-198 (in Chinese).

16　刘德长，赵英俊，叶发旺，等. 航空高光谱遥感区域成矿背景研究——以甘肃柳园—方山口地区为例[J]. 遥感学报，2017，21(1)：136-148.
Liu Dechang, Zhao Yingjun, Ye Fawang, et al. Study on the metallogenic background of the Liuyuan - Fangshankou area by using airborne hyperspectral remote sensing[J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(1): 136 - 148 (in Chinese).

17　杨惠麟，赵英俊，秦凯，等. 基于多种机器学习方法的 SASI 机载高光谱数据矿物蚀变填图研究[J]. 世界核地质科学，2026，43(3)：624-636.
YANG Huilin, ZHAO Yingjun, QIN Kai, et al. Alteration mineral mapping from airborne hyperspectral SASI data using multiple machine learning approaches[J].World Nuclear Geoscience, 2026, 43(3): 624-636 (in Chinese).

18　叶发旺，刘德长，赵英俊. CASI/SASI 航空高光谱遥感测量系统及其在铀矿勘查中的初步应用[J]. 世界核地质科学，2011，28(4)：231-236.
Ye Fawang, Liu Dechang, Zhao Yingjun. Airborne hyperspectral survey system CASI/SASI and its preliminary application in uranium exploration[J]. World Nuclear Geoscience, 2011, 28(4): 231-236 (in Chinese).

19　叶发旺，张川，邱骏挺，等. 铀矿勘查岩心高光谱技术研究及应用十年进展[J]. 世界核地质科学，2022，39(4)：623-636.
Ye Fawang, Zhang Chuan, Qiu Junting, et al.. Ten years' achievements of hyperspectral technology for core and its application in uranium exploration[J]. World Nuclear Geoscience, 2022, 39(4): 623-636 (in Chinese).

20　叶发旺，张杰林，张川，等. 航空高光谱遥感技术在铀矿找矿中的典型应用——以新疆雪米斯坦地区为例[J]. 世界核地质科学，2024，41(2)：233-249.
Ye Fawang, Zhang Jielin, Zhang Chuan, et al. Typical applications of airborne hyper-spectral remote sensing technology in uranium exploration: a case study of Xuemisitan area, Xinjiang [J]. World Nuclear Geoscience, 2024, 41(2): 233-249 (in Chinese).

21　张凯，付锦，龚育龄，等. 主要放射性物探方法在砂岩型铀矿勘查中的应用分析[J]. 世界核地质科学，2015，32(1)：46-50.
Zhang Kai, Fu Jin, Gong Yuling, et al.. Analysis on the application of major radioactive geophysical methods for sandstone type uranium deposits[J].World Nuclear Geoscience, 2015, 32(1): 46-50 (in Chinese).

22　董新丰，甘甫平，李娜，等. 高分五号高光谱影像矿物精细识别[J]. 遥感学报，2020，24(4)：454-464.
Dong Xinfeng, Gan Fuping, Li Na, et al. .Fine mineral identification of GF-5 hyperspectral image[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(4): 454-464 (in Chinese).

23　连琛芹，姚佛军，陈懋弘，等. GF-5高光谱数据在植被覆盖区的蚀变信息提取研究：以广东省玉水铜矿为例[J]. 现代地质，2020，34(4)：680-686.
Lian Chenqin, Yao Fojun, Chen Maohong, et al.. The study on alteration information extraction of GF-5 hyperspectral data in vegetation coverage area: a case study of the Yushui copper deposit in Guangdong province.[J]. Geoscience, 2020, 34(4): 680-686 (in Chinese).

24　孙雨，刘家军，赵英俊，等. 基于GF-5高光谱数据的蚀变矿物填图及地质应用——以甘肃省瓜州县花牛山地区为例[J]. 中国地质，2022，49(2)：558-574.
Sun Yu, Liu Jiajun, Zhao Yingjun, et al. Alteration

mineral mapping based on the GF-5 hyperspectral data and its geological application: an example of the Huaniushan area in Guazhou county of Gansu province [J]. Geology In China, 2022, 49(2): 558-574 (in Chinese).

25 谭宏婕,邱昆峰,刘洪成,等. 西秦岭李坝造山型金矿床围岩蚀变特征:基于高分五号02星(GF-5B)星载高光谱数据信息提取[J]. 岩石学报,2024,40(6):1784-1800.
Tan Hongjie, Qiu Kunfeng, Liu Hongcheng, et al.. Alteration characteristics of wall rocks in the Liba orogenic gold deposit, West Qinling: based on information extraction from GF-5B spaceborne hyperspectral data[J]. Acta Petrologica Sinica, 2024, 40(6): 1784-1800 (in Chinese).

26 王永江,耿树方,李长江. 北山大地构造深部成因与浅部成矿特征遥感综合分析[J]. 中国地质,2009,36(3):714-727.
Wang Yongjiang, Geng Shufang, Li Changjiang. A remote sensing analysis of deep genesis of geotectonics and shallow ore-forming characteristics in the Beishan Mountain[J]. Geology In China, 2009, 36(3): 714-727.

27 杨合群,李英,赵国斌,等. 北山蛇绿岩特征及构造属性[J]. 西北地质,2010,43(1):26-36 (in Chinese).
Yang Hequn, Li Ying, Zhao Guobin, et al. Character and Structural Attribute of the Beishan Ophiolite[J]. Northwestern Geology, 2010, 43 (1): 26-36 (in Chinese).

28 李俊建,张锋,任军平,等. 中蒙边界地区构造单元划分[J]. 地质通报,2015,34(4):636-662.
Li Junjian, Zhang Feng, Ren Junping, et al. Tectonic Unit Division in the China - Mongolia Border RegionGeological Bulletin Of China[J]. 2015, 34(4): 636-662 (in Chinese).

29 田丰,孙雨,赵英俊,等. 航空热红外高光谱在岩性识别中的应用——以甘肃柳园地区TASI数据为例[J]. 世界核地质科学,2023,40(3):863-873 (in Chinese).
Tian Feng, Sun Yu, Zhao Yingjun, et al. Application of Airborne Thermal Infrared Hyperspectroscopy in Lithology Identification: A case study of TASI Data in Liuyuan, Gansu[J]. World Nuclear Geoscience, 2023, 40(3): 863-873 (in Chinese).

30 刘德长,田丰,邱骏挺,等. 柳园—方山口地区航空高光谱遥感固体矿产探测及找矿效果[J]. 地质学报,2017,91(12):2781-2795.
Liu Dechang, Tian Feng, Qiu Junting, et al. Application of Airborne Hyperspectral Remote Sensing in Solid Mineral Exploration in the Liuyuan - Fangshankou Area[J]. Acta Geologica Sinica, 2017, 91(12): 2781-2795 (in Chinese).

31 胡辉,周萍,基于ASTER的甘肃柳园地区蚀变信息提取与找矿预测[J]. 中国地质调查,2017,4(5):86-92.
Hu Hui, Zhou Ping.Extraction of alteration information and oreprospecting based on ASTER data in Liuyuan area of Gansu Province [J]. Geological Survey Of China, 2017, 4(5): 86-92 (in Chinese).