第 33 卷第 6 期 地 质 与 资 源 Vol. 33 No. 6
2024 年 12 月 GEOLOGY AND RESOURCES Dec. 2024
文章编号:1671-1947(2024)06-0770-07 中图分类号:P627 开放科学标志码(OSID):
DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2024.06.004 文献标志码:A

基于 WorldView-3 数据的蚀变矿物信息提取
——以新疆坡北地区为例

王平平[1],孔令锋[1],武保珠[1],姚 虎[2],尹艺霖[3]
1. 河南省自然资源监测和国土整治院,河南 郑州 450016; 2. 云南开放大学,云南 昆明 650000;
3. 河南省有色金属地质矿产局第一地质大队,河南 郑州 450016

摘 要: 使用 WorldView-3 数据,采用主成分分析法,确定反映铁氧化物、含 Al(OH)矿物、含 Fe,Mg(OH)矿物的主成分,利用主成分提取新疆坡北地区蚀变矿物信息,预测成矿远景区. 采用主成分分析法分析了 WorldView-3 数据的主成分特征向量矩阵,使用 USGS 波谱库分析了蚀变矿物组合的吸收反射波谱特征. 上述二者共同确定了反映蚀变矿物信息的主成分. 利用确定的主成分采用密度分割法,并结合遥感地质解译图提取蚀变矿物信息. 利用已提取的蚀变矿物信息,结合研究区内含矿地层、与矿化相关的石英脉、控制矿体分布的北东向断裂构造,预测成矿远景区.

关键词: WorldView-3;主成分分析法;蚀变矿物;成矿远景区;新疆

EXTRACTION OF ALTERED MINERAL INFORMATION BASED ON WorldView-3 DATA: An Application of Pobei Area in Xinjiang

WANG Ping-ping[1], KONG Ling-feng[1], WU Bao-zhu[1], YAO Hu[2], YIN Yi-lin[3]
1. *Institute of Natural Resources Monitoring and Comprehensive Land Improvement of Henan Province, Zhengzhou* 450016, *China*;
2. *Yunnan Open University, Kunming* 650000, *China*;
3. *No.* 1 *Geological Team, Henan Bureau of Geology and Mineral Resources for Non-ferrous Metals, Zhengzhou* 450016, *China*

Abstract: Based on the WorldView-3 data, the principal component analysis (PCA) is adopted to determine the principal components reflecting iron oxides, and Al(OH)-bearing and Fe,Mg(OH)-bearing minerals, by which the altered mineral information in Pobei area of Xinjiang is extracted to predict the metallogenic prospect area. The principal component eigenvector matrix of WorldView-3 data is analyzed by PCA, and USGS spectral library is used to analyze the absorption reflectance spectra characteristics of altered mineral associations, which both determine the principal components reflecting altered mineral information. Based on the determined principal components, the density slicing method are used, with remote sensing interpretation map, for the extraction of altered mineral information. With the extracted altered mineral information, the metallogenic prospect area is predicted by combining with the ore-bearing strata, quartz veins related with mineralization, and NE-trending fault structure controlling the distribution of orebodies in the area.

Key words: WorldView-3; principal component analysis; altered mineral; metallogenic prospect area; Xinjiang

收稿日期:2023-09-07;**修回日期:**2023-11-23. **编辑:**李兰英.
基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目"碳中和背景下高原湿地生态系统碳汇潜力研究及碳汇效益评估"(2023J0800).
作者简介:王平平(1990—),女,硕士,现从事遥感地质应用工作,通信地址 河南省郑州市郑东新区金水东路 18 号,E-mail//770697872@qq.com
通信作者:姚虎(1990—),男,博士,讲师,现从事环境地质方向教学、研究工作,通信地址 云南省昆明市五华区莲花街道中海学府路 8 号,E-mail//dhsyaohu@163.com

0　引言

遥感影像含有大量地物信息，存储着各种矿化作用所产生的围岩蚀变信息. 可以通过数字图像处理手段和技术增强提取遥感影像上的成矿信息，从而快速、有效圈定成矿远景区,为遥感地质找矿指明方向[1]. 矿物蚀变信息往往与成矿作用相生相伴,它是成矿流体移动所形成的特殊地质记录,对于找矿具有十分重要的意义[2]. 遥感技术已经成为地质研究和地质勘查不可或缺的技术手段,从遥感影像上可以获取大量地质信息. 运用技术手段提取成矿信息,可为地质找矿提供依据[3]. WorldView-3 数据丰富的短波红外波段很适合于提取含羟基蚀变，并且可以区分含 Al-OH 蚀变与含 Mg-OH 蚀变[4]. 在内蒙古卫境地区铀矿勘查中使用 WorldView-3 数据,采用主成分分析法提取蚀变矿物信息，对蚀变矿物信息和基础地质资料进行综合分析,圈定出一处铀成矿有利地段,并对部分区域开展野外查证,取得了较好的找矿效果,为该区后续铀矿勘查提供了参考[5].

遥感技术在我国西北部基岩裸露区和西南部岩溶地区的区域地质调查中发挥了重要作用[6]. 新疆坡北地区地表径流及植被不发育,岩石露头出露较好,消除了植被对提取蚀变矿物信息造成的影响，是开展遥感地质调查工作的有利地区. 目前，国内对新疆坡北地区遥感蚀变信息提取方面的研究较少. 本文利用 WorldView-3 数据,利用主成分分析法,研究主成分分析法提取蚀变矿物信息的原理,分别提取铁氧化物、含 Al(OH)矿物和含 Fe,Mg(OH)矿物蚀变信息.

1　研究区地质概况

研究区位于新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州若羌县，面积约 162 km^2. 地理范围为 40°25′53″—40°32′50″N,91°31′44″—91°46′37″E. 区内气候炎热,温差变化大,地貌类型主要为中低山和盐碱地平原,平均海拔约为 1.05 km. 地表径流及植被不发育,岩石出露较好,是开展遥感地质调查工作的有利地区[7]. 矿产资源主要有金、铜、锰等.

本区大地构造位于塔里木盆地北缘，北山裂谷西南缘及天山成矿带南缘之间. 地质构造复杂,断裂、褶皱构造较为发育. 区内断裂以北东东向为主，其次为北西、北东向两组断裂. 断裂在地表无明显活动痕迹,多为隐伏小断层. 区内发育的北东向断裂对矿体起破坏作用,并且控制着区内金矿分布. 区内发育张裂隙,层间张裂隙中多填充石英脉,其与金矿化密切相关,是重要的容矿构造. 区内铜、金矿化体及含金石英脉均分布于该组层间张裂隙中. 石英脉主要产于下石炭统红柳园组下亚组(C_1h^a)中,常成群成带发育,沿北东东向次级断层及地层劈理产出，呈微晶细脉状、扁豆状、透镜状集合体硅质体. 近矿围岩硅化尤为发育,已知含金石英脉即为此类[8-9].

该区域围岩蚀变发育强烈,区内硅化蚀变强、分布广，近矿围岩的硅化强烈发育. 蚀变主要沿石英脉和北东向断裂构造碎裂岩破碎带分布，矿体主要发育于这两种矿化蚀变带中. 区内矿化可分为两个类型:一是赋存于石英脉中的金矿(化)体——大量发育的石英脉与区域构造线一致，当石英脉周围的岩石黄铁矿化、黄钾铁矾化、碳酸盐化及绢云母化蚀变较强时,金元素富集,形成金矿(化)体;二是赋存于北东向断裂构造碎裂岩破碎带中的铜金矿体——蚀变带内岩石破碎,发育较强的绢云母化、褐铁矿化、黄钾铁钒化、绿泥石化等蚀变,其中绢云母化、褐铁矿化与铜金关系密切[9]. 黄铁矿在地表易被氧化成黄钾铁矾及褐铁矿,因此区内主要的蚀变矿物为绿泥石、绿帘石、黄钾铁矾、褐铁矿、绢云母、菱铁矿、方解石和赤铁矿[10].

区内地层出露单一，主要为第四系和下石炭统红柳园组(C_1h),该套岩性控制着区内石英脉型金矿(化)体和铜矿(化)体的分布. 红柳园组地层主要由砂岩、粉砂岩、砂质板岩、碳质千枚岩、片岩、绿泥石片岩以及玄武岩组成. 根据红柳园组的岩石类型，分为红柳园组下亚组和红柳园组上亚组(C_1h^b). 其中,红柳园组下亚组主要由碳质绿泥石片岩、玄武岩、泥硅质和钙质板岩、石英片岩及铜矿体、金矿体组成. 红柳园组上亚组主要包含碳质板岩、长石岩屑砂岩和蚀变凝灰岩[8-9]. 根据前人研究可知，红柳园组下亚组为主要的含矿地层,大青山金矿就产于该组地层中[11].

2　数据源与预处理

WorldView-3 数据的波谱分辨率和空间分辨率较高,且在 WorldView-3 数据的 VNIR(可见光近红外)和 SWIR(短波红外)波段具有一定的反射吸收特征. 本研究使用的 WorldView-3 数据包括 8 个 VNIR 和 8

个 SWIR 波段,波长范围分别为 0.4~1.04 μm 和 1.21~2.365 μm,空间分辨率分别为 1.24 m 和 3.7 m[12]. 由于部分原因限制, 所使用的可见光近红外波段和短波红外波段的分辨率分别为 2 m 和 7.5 m(表 1). 使用的 WorldView-3 遥感数据级别为 L2A 级,在数据生产时,已经进行了几何校正, 并消除了由于传感器的影响造成的辐射畸变,因此,本研究辐射校正只需要消除大气对辐射畸变的影响. 辐射校正过程主要分为两步,分别为辐射定标与大气校正. 数据的辐射定标利用 ENVI5.2 中的辐射定标工具对 WorldView-3 的 VNIR 和 SWIR 进行了定标, 将遥感影像中的像元亮度值(DN 值)转化为辐射亮度值. 在大气校正方面,利用 6S 大气校正模型对 VNIR 和 SWIR 进行大气校正. 6S 模型能够模拟遥感数据在太阳—目标—传感器的传输过程中所受到的不同情况下的大气影响[13-15].

表 1 WorldView-3 数据波段特点

Table 1 Characteristics of WorldView-3 data band

波段号	波段	中心波长/μm	空间分辨率/m	波段号	波段	中心波长/μm	空间分辨率/m
1	VNIR	0.425	2	9	SWIR	1.21	7.5
2		0.48	2	10		1.57	7.5
3		0.545	2	11		1.66	7.5
4		0.605	2	12		1.73	7.5
5		0.66	2	13		2.165	7.5
6		0.725	2	14		2.205	7.5
7		0.825	2	15		2.26	7.5
8		0.91	2	16		2.33	7.5

3 蚀变矿物信息提取

3.1 主成分分析法

Loughlin 提出如果一个中到高载荷特征向量的主成分图像在矿物或者矿物组合的反射和吸收波段拥有相反的符号, 那么该主成分图像可用于增强该矿物或矿物组合. 如果该主成分图像的载荷在该矿物的反射波段为正值, 则需要增强的矿物在该主成分图像中呈现明亮色调; 如果为负值, 则呈现为黑暗色调[16]. Crosta 提出主成分分析法是一个多元统计方法, 对每个主成分特征向量进行统计分析可以得知主成分图像的载荷大小和符号正负, 特征向量载荷的大小及符号正负是岩石、矿物、植被和土壤等表面材料的一种指示. 该方法在成矿带的岩性及蚀变矿物填图中发挥着重要的作用[17-18].

基于上述理论,利用 ENVI 软件中的 Forward PCA Rotation New Statistics and Rotate 模块对 WorldView-3 数据进行主成分分析[19],确定反映铁氧化物、含 Al(OH)矿物和含 Fe,Mg(OH)矿物信息的主成分.

3.2 WorldView-3 数据蚀变矿物信息提取

WorldView-3 数据由 8 个可见光近红外波段及 8 个短波红外波段组成. 可见光近红外波段的吸收峰主要是由于矿物晶体结构中存在的过渡元素 Fe^{3+}、Fe^{2+}、Mn、Cr、Ni 等发生电子跃迁引起的[20]. 因此,本研究利用 WorldView-3 数据的 VNIR 波段进行主成分分析,提取铁氧化物信息. 由于含 Al(OH)矿物和含 Fe,Mg(OH)矿物的诊断吸收特征主要位于短波红外波段, 因此本研究利用 WorldView-3 数据的 SWIR 波段进行主成分分析,提取 Al(OH)矿物和含 Fe,Mg(OH)矿物信息. WorldView-3 数据 VNIR 波段及 SWIR 波段组成主成分分析后图像的特征向量矩阵分别见表 2、3. 同样,为了便于分析铁氧化物(褐铁矿、赤铁矿和针铁矿)、含 Al(OH)矿物(高岭石、明矾石、白云母和伊利石)、含 Fe,Mg(OH)矿物(绿泥石以及碳酸盐类的方解石、白云石和菱铁矿) 在 WorldView-3 数据波段的吸收反射特征,本研究将各类矿物的波谱重采样到 WorldView-3 数据波段 (图 1). 结合特征向量矩阵主成分的载荷大小、符号正负以及矿物在 WorldView-3 数据波段的吸收反射特征,确定反映蚀变矿物信息的主成分,并通过密度分割提取矿物信息.

铁氧化物如褐铁矿、赤铁矿和针铁矿在 WorldView-3 数据的 VNIR 波段的 band1、2 具有较低反射率,在 band6 具有较高反射率(图 1a). 观察表 2 中 PC5 主成分中的 band2 (-0.209)与 band6 (0.513)特征向量的载荷符号相反, 且载荷较大, 因此可判断 PC5 主要反映铁氧化物信息. 由于 band6 特征向量载荷为正值,与铁氧化物在该波段呈现高反射相一致,因此铁氧化物信息在 PC5 主成分中为明亮色调,将 PC5 主成分进行密度分割取高值,得到铁氧化物信息.

含 Al(OH)矿物如高岭石、明矾石、白云母和伊利石在 2.14~2.28 μm 之间表现出主要的吸收特征,对应于 WorldView-3 数据短波红外波段的 band5、6 和 7,在短波红外波段的 band2、3 呈现较高的反射 (图1b).

表 2　WorldView-3 数据 VNIR 主成分分析特征向量矩阵

Table 2　Eigenvector matrix of WorldView-3 VNIR data by PCA

	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7	Band8
PC1	-0.296	-0.278	-0.319	-0.354	-0.357	-0.39	-0.388	-0.421
PC2	-0.686	-0.452	-0.226	0.001	0.157	0.24	0.291	0.328
PC3	-0.437	0.288	0.437	-0.124	0.391	-0.247	0.284	-0.474
PC4	0.453	-0.275	-0.288	-0.415	0.157	-0.117	0.629	-0.175
PC5	0.052	-0.209	-0.149	0.46	0.023	0.513	0.008	-0.675
PC6	-0.196	0.646	-0.343	-0.232	-0.421	0.345	0.27	-0.047
PC7	-0.044	-0.169	0.292	0.394	-0.651	-0.307	0.458	0.003
PC8	-0.043	0.264	0.59	0.516	0.262	-0.489	0.07	0.035

表 3　WorldView-3 数据 SWIR 主成分分析特征向量矩阵

Table 3　Eigenvector matrix of WorldView-3 SWIR data by PCA

	Band1	Band2	Band3	Band4	Band5	Band6	Band7	Band8
PC1	0.382	0.311	0.359	0.418	0.356	0.348	0.32	0.321
PC2	-0.824	0.379	0.163	-0.083	0.354	0.085	-0.038	0.095
PC3	0.22	0.659	0.211	-0.213	-0.298	-0.501	-0.201	0.216
PC4	0.058	0.155	0.265	0.431	0.102	-0.037	-0.435	-0.718
PC5	-0.301	-0.295	0.203	0.641	-0.302	-0.424	0.071	0.307
PC6	-0.164	0.137	0.318	-0.08	-0.675	0.403	0.394	-0.27
PC7	0.007	-0.174	0.233	-0.049	-0.21	0.469	-0.704	0.391
PC8	0.065	-0.406	0.73	-0.409	0.239	-0.24	0.1	-0.073

观察表 3 中 PC3 主成分中的 bnad2 (0.659)和 band6 (−0.501)特征向量的载荷符号相反,且载荷较大,因此可判断 PC3 主要反映含 Al(OH)矿物信息. 由于 band2 特征向量载荷为正值,与含 Al(OH)矿物在该波段呈现高反射相一致,因此含 Al(OH)矿物信息在 PC3 主成分中为明亮色调,将 PC3 主成分进行密度分割取高值,得到含 Al(OH)矿物信息.

含 Fe,Mg(OH)矿物,如绿泥石以及碳酸盐类的方解石、白云石和菱铁矿在 WorldView-3 数据短波红外波段 band7、8 波段呈现较低反射率，在 band4、5、6 波段反射率较高 (图 1c). 观察表 3 中 PC4 主成分中的band4 (0.431)和 band8 (−0.718)特征向量的载荷符号相反，且载荷较大，因此可判断 PC4 主要反映含 Fe,Mg(OH)矿物信息. 由于 band4 特征向量载荷为正值,与含 Fe,Mg(OH)矿物在该波段呈现较高反射相一致,因此含 Fe,Mg(OH)矿物信息在 PC4 主成分中为明亮色调,将 PC4 主成分进行密度分割取高值,得到含 Fe,Mg(OH)矿物信息.

3.3　提取结果分析

利用 WorldView-3 数据，采用主成分分析法,分别提取出了铁氧化物(褐铁矿、赤铁矿和针铁矿)、含 Al(OH)矿物(高岭石、明矾石、白云母和伊利石)、含 Fe,Mg(OH)矿物(绿泥石以及碳酸盐类的方解石、白云石和菱铁矿)蚀变信息,并结合研究区遥感地质解译图(图 2a)对提取出的矿物蚀变信息进行优选得到铁氧化物(褐铁矿、赤铁矿和针铁矿)、含 Al(OH)矿物

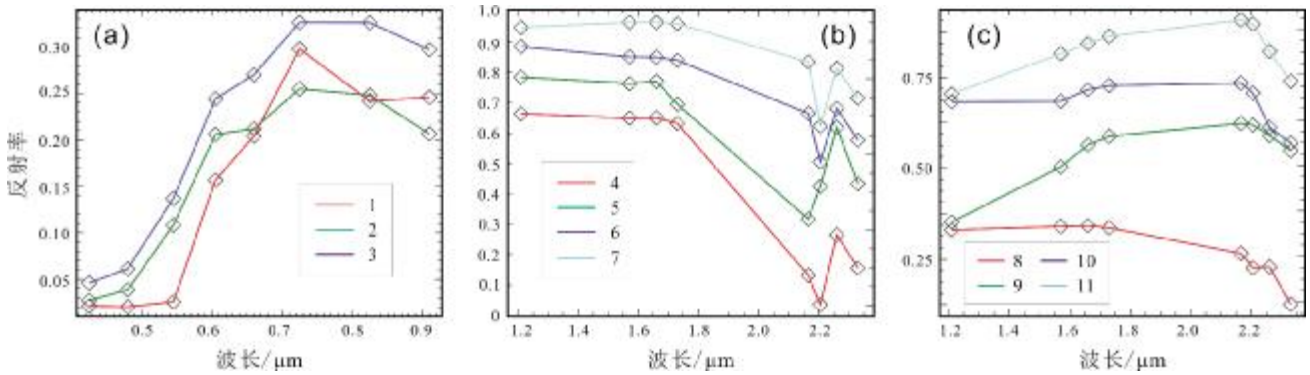

图 1 各类矿物波谱重采样至 WorldView-3 数据波段

Fig. 1 Resampling of spectra of various minerals to the WorldView-3 data band

a—铁氧化物重采样至 WorldView-3 数据 VNIR 波段（resampling of iron oxide to VNIR band of WorldView-3 data）；b—含 Al（OH）矿物重采样至 WorldView-3数据SWIR 波段(resampling of Al(OH)-bearing minerals to SWIR band of WorldView-3 data)；c—含 Fe,Mg(OH)矿物重采样至 WorldView-3数据SWIR波段(resampling of Fe,Mg(OH)-bearing minerals to SWIR band of WorldView-3 data)；1—赤铁矿(hematite)；2—褐铁矿(limonite)；3—针铁矿(goethite)；4—高岭石(kaolinite)；5—明矾石(alunite)；6—伊利石(illite)；7—白云母(muscovite)；8—方解石(calcite)；9—菱铁矿(siderite)；10—绿泥石(chlorite)；11—绿帘石(epidote)

(高岭石、明矾石、白云母和伊利石)、含 Fe,Mg(OH)矿物(绿泥石以及碳酸盐类的方解石、白云石和菱铁矿)蚀变信息（图 2b). 蚀变信息主要分布在研究区的东南、西南、东北、西北 4 个区域. 其中,含 Fe,Mg(OH)矿物、含 Al(OH)矿物提取效果较好;与含矿地层叠合较好,铁氧化物提取效果较差,区域内提取效果不明显. 同时，在研究区东北角发现该区域 3 类蚀变矿物信息叠合度较高,并与含矿地层红柳园组下亚组、与矿化相关的石英脉、控制矿体分布的北东向断裂构造吻合较好,该区域可能为成矿远景区(图 2b 黑框).

4 结论

本研究利用 WorldView-3 数据，采用主成分分析法,确定了铁氧化物(褐铁矿、赤铁矿和针铁矿)蚀变信息的主成分为 VNIR 波段的 PC5,密度分割取高值;含 Al(OH)矿物(高岭石、明矾石、白云母和伊利石)蚀变信息的主成分为 SWIR 波段的 PC3,密度分割取高值;含 Fe,Mg(OH)矿物(绿泥石以及碳酸盐类的方解石、白云石和菱铁矿)蚀变信息的主成分为 SWIR 波段的 PC4，密度分割取高值. 但是，相比较下来,含 Fe,Mg(OH)矿物和含 Al(OH)矿物提取效果胜于铁氧化物. 结合研究区遥感地质解译图、含矿地层红柳园组下亚组、与矿化相关的石英脉、控制矿体分布的北东向断裂构造,预测了成矿远景区,为研究区下一步遥感地质调查提供参考.

参考文献(References):

[1]白龙洋,代晶晶,王楠,等. 基于 GF-5 卫星的西藏珠勒-芒拉地区矿物蚀变信息提取及找矿前景分析[J]. 中国地质，2024，51(3)：995-1007.

Bai L Y，Dai J J，Wang N，et al. Extraction of mineral alteration information and mineralization prospecting analysis based on GF-5 hyperspectral in Zhule-Mangla，Tibet[J]. Geology in China，2024，51(3)：995-1007.

[2]王生礼，李志军. 遥感蚀变信息提取研究综述[J]. 地质与资源，2023，32(4)：462-470.

Wang S L，Li Z J. A review of remote sensing alteration information extraction techniques[J]. Geology and Resources，2023，32(4)：462-470.

[3]曹会，张廷秀，李雨柯，等. 基于中、高分辨率遥感影像的羟基和铁染蚀变信息提取与成矿预测——以吉林市等六幅为例[J]. 地质与资源，2021，30(6)：710-715，706.

Cao H，Zhang T X，Li Y K，et al. Hydroxyl and iron-stained alteration information extraction and metallogenic prediction based on medium-high-resolution remote sensing images：A case study of six map sheets in Jilin City[J]. Geology and Resources，2021，30(6)：710-715，706.

[4]Sun Y Q，Tian S F，Di B G. Extracting mineral alteration information using WorldView-3 data[J]. Geoscience Frontiers，2017，8(5)：1051-1062.

[5]张元涛，余长发，潘蔚，等. WorldView-3 影像与 ASTER 热红外影像在内蒙古卫境地区铀矿勘查中的应用[J]. 铀矿地质，2020，36(5)：408-417.

Zhang Y T，Yu C F，Pan W，et al. Application of WorldView-3 and ASTER TIR for the exploration of uranium in Weijing，Inner Mongolia[J]. Uranium Geology，2020，36(5)：408-417.

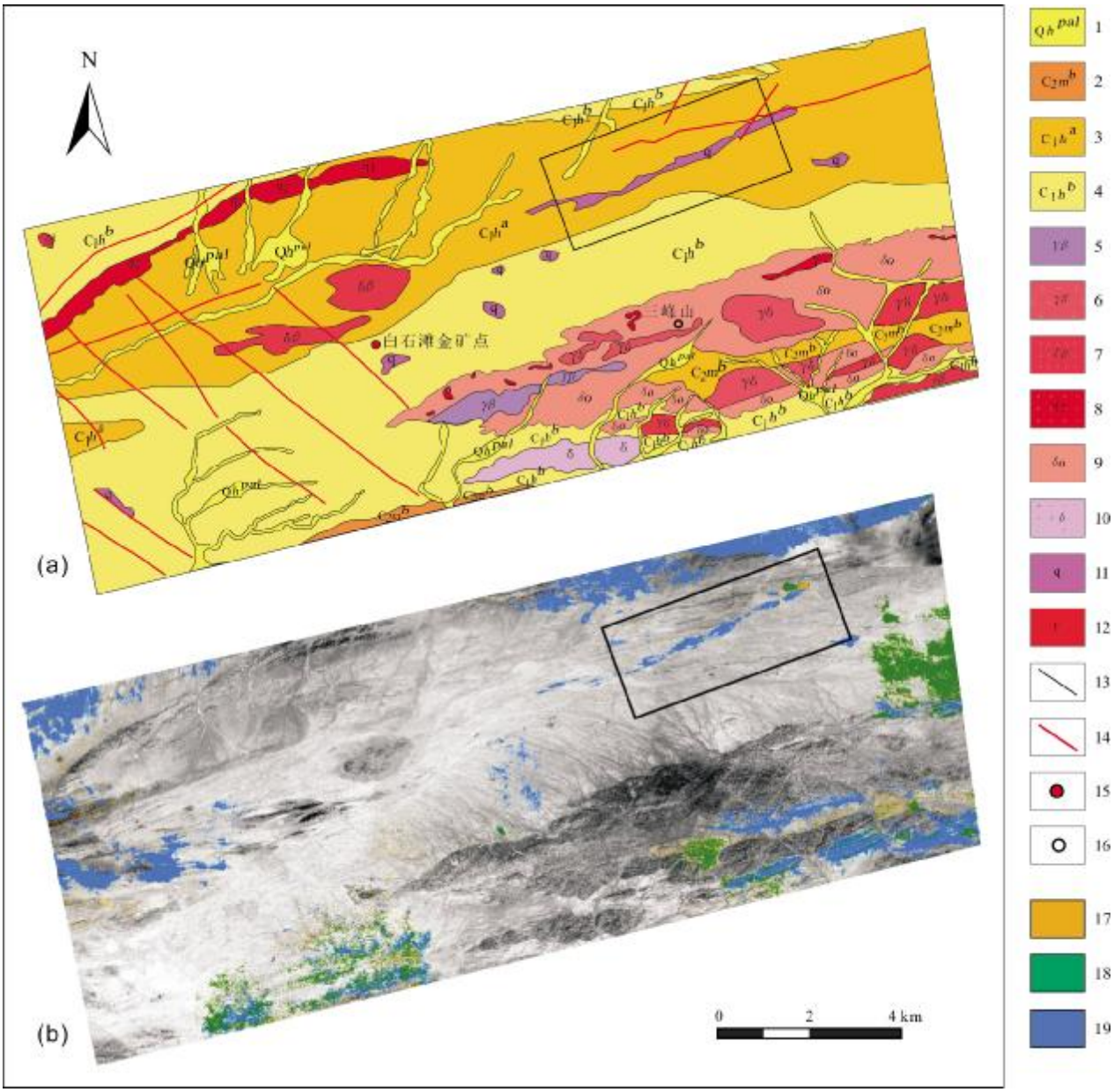

图 2　研究区 1:25 000 遥感地质解译图与 WorldView-3 数据主成分分析法矿物信息叠加结果图

Fig. 2　1:25 000 remote sensing geological interpretation map of the study area and mineral information superposition results based on WorldView-3 data by PAC

1—冲积、洪积物（alluvium-diluvium）；2—粉砂质板岩、长石岩屑砂岩、绿帘阳起石英片岩（silty slate, feldspar lithic sandstone and epidote actinote quartz schist）；3—碳质绿泥石片岩、玄武岩、泥硅质和钙质板岩、石英片岩以及铜矿体（carbonaceous chlorite schist, basalt, muddy siliceous and calcareous slate, quartz schist, and copper orebody）；4—灰黑色黑云母石英片岩,含碳质板岩、长石岩屑砂岩和蚀变凝灰岩局部夹有透镜状的锰硬矿层、灰绿色绿泥片岩(grayish black biotite quartz schist, carbonaceous slate, feldspar lithic sandstone and altered tuff with lenticular psilomelane layer and grayish green chlorite schist)；5—灰色中粒黑云母二长花岗岩（gray medium-grained biotite monzogranite）；6—灰白色中粒花岗闪长岩（grayish white medium-grained granodiorite）；7—灰黑色黑云母闪长岩（grayish black biotite diorite）；8—浅红色细粒白云母二长花岗岩（light red fine muscovite monzogranite）；9—灰色细粒黑云母石英闪长岩(gray fine biotite quartz diorite)；10—灰绿色弱绿泥石化中细粒闪长岩(grayish green weakly chloritized fine-grained diorite)；11—石英脉（quartz vein）；12—酸性岩脉（acidic dike）；13—岩性界线（lithologic boundary）；14—断裂（fault）；15—矿点(ore occurrence)；16—地名(place name)；17—铁氧化物(iron oxide)；18—含 Al（OH）矿物(Al(OH)-bearing mineral)；19—含 Fe,Mg(OH)矿物(Fe,Mg(OH)-bearing mineral)

[6]周传芳，陈卓，孙彦峰，等. 遥感在大兴安岭森林覆盖区地质矿产调查中的应用——以黑龙江洛古河 1:5 万区域地质矿产调查工作为例[J]. 地质与资源，2022，31(5)：632-641，613.
Zhou C F，Chen Z，Sun Y F，et al. Remote sensing applied in geological and mineral survey in forest-covered area of Daxinganling Mountains：A case study of 1∶50 000 regional geological and mineral survey in Luoguhe，Heilongjiang Province[J]. Geology and Resources，2022，31(5)：632-641，613.

[7]段磊，秦友平，滕海清，等. 若羌县昌运三峰山金矿地质特征[J]. 新疆有色金属，2014，37(1)：44-47.
Duan L，Qin Y P，Teng H Q，et al. Geological characteristics of the Sanfengshan gold deposit in Changyun，Ruoqiang County [J]. Xinjiang Nonferrous Metals，2014，37(1)：44-47.（in Chinese）

[8]王啟宴，李山，范家盟，等. 新疆若羌县三峰山铜矿区地质特征及矿床成因初探[J]. 山东国土资源，2013，29(7)：20-24，30.
Wang Q Y，Li S，Fan J M，et al. Primary analysis on geological characteristics and origin of Sanfengshan copper deposit in Ruojiang County of Xinjiang Uygur Autonomous Region[J]. Shandong Land and Resources，2013，29(7)：20-24，30.

[9]赵月平. 新疆若羌县三峰山铜金矿床地质特征及成因分析[J]. 新疆有色金属，2014，37(S1)：70-73.
Zhao Y P. Geological characteristics and genetic analysis of the Sanfengshan copper gold deposit in Ruoqiang County，Xinjiang[J]. Xinjiang Nonferrous Metals，2014，37(S1)：70-73.（in Chinese）

[10]Shalimba E. Geology and geochemistry of the Sanqingshan Cu-Au deposit in Ruoqiang County，Xinjiang，China[D]. Beijing：China University of Geosciences，2014.

[11]徐卫东，王兴保，李生全，等. 新疆若羌县大青山金矿构造控矿特征[J]. 地质与勘探，2006，42(1)：34-37.
Xu W D，Wang X B，Li S Q，et al. Daqingshan gold deposit in Ruoqiang County，Xinjiang[J]. Geology and Exploration，2006，42(1)：34-37.

[12]Wang T，Zhang H S，Lin H，et al. Textural-spectral feature-based species classification of mangroves in Mai Po Nature Reserve from WorldView-3 imagery[J]. Remote Sensing，2016，8(1)：24.

[13]阿布都瓦斯提·吾拉木，秦其明，朱黎江. 基于 6S 模型的可见光、近红外遥感数据的大气校正[J]. 北京大学学报(自然科学版)，2004，40(4)：611-618.
Ghulam A，Qin Q M，Zhu L J. 6S model based atmospheric correction of visible and near-infrared data and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis，2004，40(4)：611-618.

[14]张勇. 基于 6S 辐射传输模型的大气校正研究与应用[D]. 长沙：中南大学，2014.
Zhang Y. Investigation and application of atmospheric correction based on 6S radiative transfer model[D]. Changsha：Central South University，2014.

[15]周婷婷. 遥感影像辐射校正研究与应用[D]. 福州：福建师范大学，2010.
Zhou T T. Research and application of remote sensing radiometric correction[D]. Fuzhou：Fujian Normal University，2010.

[16]Loughlin W P. Principal component analysis for alteration mapping [J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing，1991，57(9)：1163-1169.

[17]Crósta A P，Moore J M. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minais Gerais State，Brazil：A prospecting case history in greenstone belt terrain[C]//Thematic Conference on Remote Sensing for Exploration Geology. Calgary：1989：1173-1187.

[18]吴志春，叶发旺，郭福生，等. 主成分分析技术在遥感蚀变信息提取中的应用研究综述[J]. 地球信息科学学报，2018，20(11)：1644-1656.
Wu Z C，Ye F W，Guo F S，et al. A review on application of techniques of principle component analysis on extracting alteration information of remote sensing[J]. Journal of Geo-Information Science，2018，20(11)：1644-1656.

[19]王辉，秦绪文，范玉海，等. 高分遥感技术在西昆仑大红柳滩-俘虏沟地区地质找矿中的应用[J]. 中国地质，2018，45(6)：1289-1301.
Wang H，Qin X W，Fan Y H，et al. The application of high resolution remote sensing technology to ore-prospecting in Dahongliutan-Fulugou area of West Kunlun Mountains[J]. Geology in China，2018，45(6)：1289-1301.

[20]Pour A B，Hashim M. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data，SE Iran[J]. Journal of Asian Earth Sciences，2011，42(6)：1309-1323.