第 92 卷　第 2 期
2018年2月　395～412

地　质　学　报　ACTA GEOLOGICA SINICA

Vol. 92 No. 2 2018
Feb. 395～412

航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学研究

叶发旺[1)]，孟树[1)]，张川[1)]，徐清俊[2)]，刘洪成[1)]，武鼎[1)]

1）核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室，北京，100029；

2）中国地质大学(北京)，北京，100083

内容提要：国内外学者在航空高光谱矿物填图时，根据 Al-OH 光谱特征吸收波长位置不同将浅色云母类矿物分为 2～3 类，分别命名为高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母，但对它们的成因特点却只有零星的讨论，没有比较系统的有针对性的研究。本文在新疆雪米斯坦铀多金属成矿带获取 CASI/SASI 航空高光谱数据，并开展矿物填图的基础上，针对高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母等三种矿物的成因学专门开展了比较系统的研究。采用的方法主要是在开展详细的野外地质观察、采样的基础上，对采集的上述三类矿物蚀变岩样品进行详细的室内光谱测量、Al-OH 吸收波长位置统计、显微薄片观察、全岩 X 衍射分析、粘土 X 衍射分析等研究，并结流体成矿理论和已有矿物成因学知识，进行了详细深入的分析讨论。研究表明，高铝绢云母蚀变岩蚀变强烈，云母类蚀变矿物以绢云母、伊利石为主，且主要与叶腊石和微晶石英等矿物伴生，而低铝绢云母蚀变岩蚀变强度中等，以伊利石、伊蒙混层为主，绿泥石增加，主要与方解石、浊沸石等矿物伴生；高铝绢云母蚀变岩具有相对高的石英含量和粘土矿物总量，具有相对较低的钾长石、斜长石以及方解石含量；低铝绢云母蚀变岩则具有相对较低的石英和粘土含量，具有相对较高的斜长石、钾长石和方解石含量。通过深入分析讨论，本文提出了在研究区航空高光谱识别的高铝绢云母形成于相对高温、偏酸性的热液流体环境，低铝形成于相对低温、偏碱性的热液流体环境。这一新认识对航空高光谱遥感矿物填图结果的深入应用和深层次找矿信息反演具有重要意义。

关键词：航空高光谱；高铝绢云母；中铝绢云母；低铝绢云母；矿物成因；雪米斯坦地区

随着高光谱遥感技术的发展，航空高光谱矿物识别与填图已成为当前国内外高光谱遥感地质应用领域研究的重点和热点之一(Gan Fuping et al.，2004；Ye Fawang et al.，2011，2012；Wang Runsheng et al.，2011；Guo Na et al.，2012；Sun Yu et al.，2015，2016；Liu Dechang et al.，2016，2017；Yan Bokun et a.，2016；Yang Kai et al.，2001，2005，2011；Zadeh et al.，2014；Sandra et al.，2016；Che Yongfei et al.，2017)。在具体高光谱矿物填图实际研究和应用中，国内外均出现 Al-rich mica、Al-poor mica(Cudahy et al.，2001)或 low-Al white mica、high-Al white mica(Bierwirth et al.，2002)或高铝绢云母、低铝绢云母(Gan Fuping Ya et al.，2003；Wang Runsheng et al.，2010；Ren Guangli et al.，2013)或高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母(Ye Fawang et al.，2013；Liu Dechang et al.，2015)等矿物。可以说，与传统的地质矿物学相比，高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母等三种矿物的识别与填图是高光谱遥感矿物填图的重要特色和优势，对分析热液流体活动规律和反演深层次地质找矿信息具有重要的作用和意义。然而，国内外对高光谱识别的上述 2～3 类绢云母的成因及其地质学意义分析研究比较少，除 Van Ruitenbeek et al.(2005，2012)利用 Hymap 航空高光谱图像对西澳皮尔巴拉 Panorama 地区与 VMS 矿床有关的古热液系统的流体活动路径反演比较深入外，大多只是零星的讨论，缺乏比较系统的研究。同时，在国内外关于上述 2～3 类绢云母成因学的少量讨论中，也存在认识不清和认识不一致等问题。有的认为高铝绢云母形成于相对低温高压环境(Liu Shenwei et al.，2006)，而有的认为相对短波的高铝绢云母(或短波伊利石)形成于相对高温的环境(Yang

注：本文为中核集团龙腾二期项目“铀及多金属矿产勘查高光谱遥感综合应用示范研究”(遥 LTY1604)和国家自然科学基金项目“航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母成因机理研究”(41772354)联合成果。

收稿日期：2016-11-18；改回日期：2017-08-22；责任编辑：郝梓国。

作者简介：叶发旺，男，1974 年生，博士，高级工程师(研究员级)，研究生导师，主要从事铀矿勘查遥感新技术研究及找矿应用工作。Email：yfwbeijing2008@sina.com。

Zhiming et al.，2012；Yang Kai et al.，1999；Harraden et al.，2013），还有的将发育短波（＜2205nm）和长波（＞2208nm）白色云母的地段均解释为海水在渗入水下热液对流系统中形成的热液蚀变相（Van Ruitenbeek et al.，2006）。总之，针对高光谱识别的2～3类云母矿物，其地质内涵和矿物成因学还很不清晰，认识也很不一致，这使得遥感地质人员在进行高光谱矿物填图和填图信息地质分析时常常产生混淆和疑惑，对高光谱遥感技术在地质规律研究和找矿中应用效果的充分发挥十分不利。航空高光谱遥感识别的这2～3种云母类矿物到底是什么矿物，与岩石矿物学中的白云母、绢云母、伊利石、蒙脱石等矿物有什么区别，具体有什么地质内涵和找矿意义，这些矿物的矿物成因学特点如何等科学问题是当前遥感地质学者利用高光谱遥感技术进行找矿应用时最想深入分析却又最易出错的问题，但这些问题在国内外鲜见有专门研究和讨论。本文从国际先进的CASI/SASI航空高光谱测量系统在新疆雪米斯坦地区识别的高铝、中铝、低铝等三类绢云母蚀变矿物出发，对其所在蚀变岩的光谱特征、显微特征、全岩X衍射特征、粘土X衍射特征、以及流体成因、温压条件等进行比较系统的探讨和分析，旨在为国内外高光谱遥感矿物信息的深化研究和找矿应用提供新的认识和依据。

1 航空高光谱识别三类绢云母矿物基本原理

高光谱分辨率遥感技术是在电磁波谱的紫外、可见光、近红外、中红外、热红外区域，获取许多非常窄且光谱连续的“图谱合一”的遥感数据的技术，在可见光（400～700 nm）、近红外区（700～1100 nm）、短波红外区（1100～2500nm）区间，光谱分辨率高达纳米级，为几纳米～十几纳米。高光谱遥感细致的光谱信息，使得其对地物的研究从鉴别上升到直接识别（Wang Runsheng et al.，2010）。在400～2500 nm，地物吸收光谱产生机理主要是地物内部微粒的电子跃迁过程或振动过程（Hunt et al.，1970）。常见的阳离子包括Fe^{2+}、Fe^{3+}、Cu^{2+}等，常见的主要阴离子基团包括铝羟基（Al-OH）、镁羟基（Mg-OH）、铁羟基（Fe-OH）、碳酸根（CO_3^{2-}）等。含上述阳离子或阴离子基团的岩石矿物通常在400～2500nm区间具有明显的光谱特征（Hunt，1977；Liu Yanjun et al.，1993），是高光谱遥感地质应用中进行矿物识别和提取的基础。Clark et al.（1990）详细地阐述了含Al-OH矿物（如高岭石、白云母）、含Mg-OH矿物（角闪石，绿泥石）和碳酸盐（如方解石、白云石）等在短波红外区间的光谱识别吸收特征。

白云母、绢云母、伊利石、多硅白云母等含Al的浅色云母类矿物是地质找矿研究中最为重要、最为普遍的一类矿物。这些云母类矿物在2200nm附近存在明显的Al-OH光谱吸收特征，在2345nm附近存在次级明显光谱吸收特征。同时，这些矿物在2200nm附近的Al-OH光谱吸收特征波长位置的偏移与矿物结构中八面体铝离子（$Al^{Ⅵ}$）含量比例的微小变化密切相关（Jones et al.，2005），即$Al^{Ⅵ}$含量比例增高，Al-OH吸收峰位置向短波方向（2190nm）偏移，$Al^{Ⅵ}$含量比例降低，Al-OH吸收峰向长波方向（2215nm）偏移（Liu Shengwei et al.，2006；Liang Shuneng et al.，2012；Duke，1994；Herrmann et al.，2001；Carsten et al.，2011）。据此，国内外学者在航空高光谱矿物填图时，根据高光谱图像像元曲线在2200nm和2345nm附近的光谱吸收特征组合，以及在2200nm附近Al-OH吸收峰具体波长位置的不同，识别和命名出高铝、中铝、低铝等三种或高铝、低铝等两种不同的绢云母矿物。

2 研究区地质概况

新疆雪米斯坦（又称谢米斯台）火山岩带，大地构造上处于准噶尔板块北缘古生代陆缘活动带内晚古生代成熟岛弧之上（Dong Huilian et al.，2010），地质构造较复杂，是新疆北部重要的铀多金属成矿带（Sheng Ping et al.，2010；Wang Mou et al.，2013；Wang Juli et al.，2014）。该火山岩带地层分区属西准噶尔分区沙布尔提山小区，主要出露泥盆系、下石炭统的海相、海陆交互相的沉积碎屑岩、中基性岩、中酸性火山岩及火山碎屑岩。断裂构造发育，主要以东西向构造及其派生的北东向、北西向、北东东向等构造为主。岩浆岩方面，带内发育多期海西晚期花岗侵入岩、次火山岩、以及中性、基性岩脉，且热液活动明显。受近东西向构造带对主要构造形态、沉积建造、岩浆活动、热液活动的明显控制作用，火山岩带铀多金属成矿明显呈东西向展布，自西向东主要发育白杨河铀铍矿床和一系列铀矿点、铜矿点。矿化主要赋存于陆相为主的次火山岩、中酸性火山岩及火山碎屑岩中，受控于大型“入字型”断裂锐角夹持区。与铀、铍、钼成矿相关的蚀变主要为萤石化、赤铁矿化、微晶石英化、水云母化等（Xiu Xiaoqian et al.，2011）；铜矿化岩石中发育强烈的绿

帘石化、绿泥石化、碳酸盐化、硅化,局部发育泥化(Wang Juli et al.,2014)。晚期侵入的辉绿岩、闪长岩等中基性脉岩对成矿,尤其是铀成矿具一定控制与促进作用,为铀成矿提供了成矿流体和活化迁移的矿化剂(Wang Mou et al.,2013)。研究区区域变质作用弱,受埋深变质作用影响,古生代地层在区调资料中划分为亚绿片岩相和葡萄石绿纤石相(Wang Zhe,2013),区域动力变质作用、接触变质作用、碎裂变质作用等仅极有限地段出现。

3　航空高光谱遥感矿物填图与样品采集、测试

为了开展铀矿勘查航空高光谱遥感技术方法研究,2011 年核工业北京地质研究院遥感信息与图像分析技术国家级重点实验室利用国外引进的先进的 CASI/SASI/TASI 航空高光谱测量系统在雪米斯坦火山岩带获取了近 4200km^2 具有高光谱分辨率和高空间分辨率的 CASI、SASI、TASI 三种航空高光谱数据(Ye Fawang et al.,2013)。其中,CASI 空间分辨率 0.8m,36 波段,光谱分辨率约 18nm;SASI 空间分辨率 1.8m,100 波段,光谱分辨率约 15nm;TASI 空间分辨率 1.8m,32 波段,光谱分辨率约 110nm。根据航空高光谱矿物识别原理和矿物填图技术,在雪米斯坦火山岩带识别和填出了高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母、绿泥石、绿帘石、叶腊石、迪开石、高岭石、明矾石、方解石、黄钾铁钒、石膏、赤铁矿、褐铁矿等 14 种矿物(Ye Fawang et al.,2013)。其中,高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母的图像端元曲线如图 1 所示。从图中可以看出,本次航空高光谱识别的高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母在 2200nm 和 2345nm 附近的两处吸收峰特征明显,且曲线形态基本相同。其中,高铝绢云母以 2195nm 附近的主吸收峰和 2345nm 的次级吸收峰为特征,中 Al 绢云母以 2210nm 的主吸收峰和 2345nm 的次级吸收峰为特征,低 Al 绢云母的以 2225nm 附近的主吸收峰和 2345nm 的次级吸收峰为特征。即本次航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物的 Al-OH 中心吸收位置波长分别为 2195nm、2210nm、2225nm。

在航空高光谱矿物识别和填图的基础上,对 14 种填图矿物分别进行了空间分布特征分析及野外地面光谱测量验证和采样。针对高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母等三种绢云母填图结果的验证点和样品采集点分布如图 2。这些验证点基本上分布

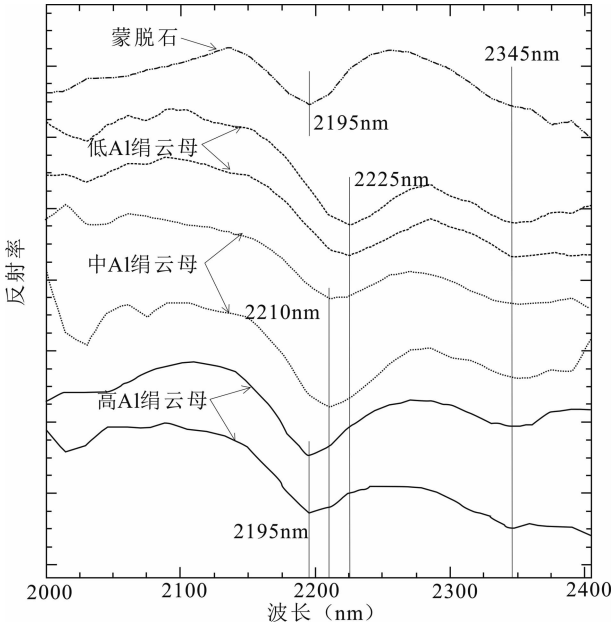


图 1　三种绢云母 SASI 航空高光谱图像端元曲线图

Fig. 1　Airborne hyperspectral image end-member curve acquired by SASI for 3 kinds of sericite

(注:为了更清楚显示各条曲线特征,将纵坐标的反射率进行了叠置)

(Note: Superposition has been carried on the reflectance to enhance the curve characteristic)

在整个雪米斯坦火山岩地区,空间分布具有较好的代表性。针对采集的三种绢云母化蚀变岩样品,在室内专门开展了室内光谱测试和光谱分析、显微薄片观察、全岩 X 衍射分析、粘土 X 衍射分析等。其中,光谱测试采用美国 ASD 公司生产的 TerraSpec 便携式光谱仪在室内标准光谱测量条件下测试,光谱测试范围为 350～2500nm,光谱分辨率在 350～1050nm 为 3nm;1050～2500nm 为 8nm,光谱采样间距为 2nm,插值为 1nm。光谱测试完成后,对各样品的光谱曲线分别进行了光谱特征分析和 Al-OH 特征吸收波长位置的计算和统计。显微薄片观察和全岩 X 衍射分析、粘土 X 衍射分析等室内分析和研究分别在核工业北京地质研究院地质矿产所和核工业北京地质研究院分析测试中心进行。航空高光谱识别的高铝、中铝、低铝三种绢云母蚀变岩样品采集点分布见图 2,各样品室内光谱测量曲线的 Al-OH 光谱特征吸收位置及各种分析测试结果见表 1。

4　结果分析

4.1　野外验证结果

从表 1 中 28 个绢云母蚀变岩样品地面 ASD 光谱测量曲线中计算出来的 2200nm 附近的 Al-OH

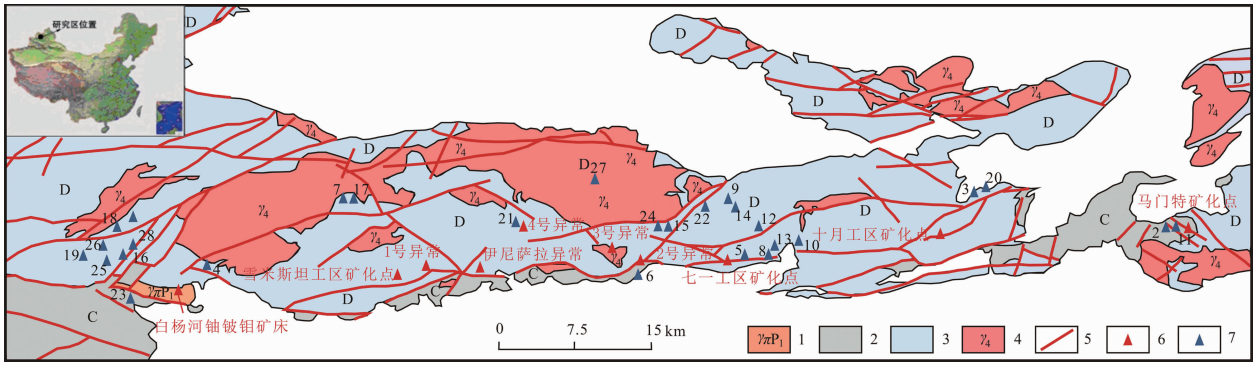


图 2 雪米斯坦火山岩带地质简图(据 Wang Mou et al.,2013 修改)

Fig. 2 Geological sketch map of Xuemisitan volcanic rock zone (after Wang Mou et al.,2013)

1—早二叠世花岗斑岩;2—石炭系;3—泥盆系;4—华力西花岗岩;5—断裂;6—铀矿化点;7—样品采集点编号

1— Granite porphyry in lower Permian period; 2—Carboniferous system; 3—Devonian system; 4—granite in Variscan period; 5—fault; 6—uranium mineralization dot; 7—number for sample collective situation

表 1 航空高光谱识别的高铝、中铝、低铝等三类绢云母蚀变岩 X 衍射组成(样品位置见图 1)

Table 1 The X ray diffraction compositions for three kinds of alteration rocks respectively with high-Al, medium-Al and Low-Al sericite

采集点编号	样品编号	野外名称	航空高光谱识别类型	Al-OH 吸收波长位置(nm)	蚀变岩样品全岩 X 衍射结果(%)							样品粘土 X 衍射分析(%)				
					石英	钾长石	斜长石	方解石	浊沸石	硬石膏	粘土总量	伊利石	蒙皂石	伊蒙混层	高岭石	绿泥石
1	No. 279-6	浅黄绿蚀变岩	高铝绢云母	2198	65.8	/	/	/	/	/	34.2	86	1	11	2	/
2	No. 91-2	灰红色蚀变岩	高铝绢云母	2197	68.5	/	5.2	/	/	/	26.3	100	/	/	/	/
3	No. 239-3	灰绿色蚀变岩	高铝绢云母	2203	48.2	/	/	/	/	/	51.8	79	/	21	/	/
4	No. 333-3	蚀变岩	高铝绢云母	2195	58.1	/	/	/	/	/	41.9	82	/	18		/
5	No. 197-2	玫瑰红蚀变岩	高铝绢云母	2198	51.1	/	3.1	/	/	/	45.8	74	/	25	1	/
6	No. 169-3	蚀变岩	高铝绢云母	2200	74.5	/	/	/	/	/	25.5	72	/	27	1	/
7	No. 145-7	灰绿白蚀变岩	高铝绢云母	2196	69.3	/	/	/	/	4.6	26.1	86	/	14	/	/
8	No. 198-1	黄绿色蚀变岩	高铝绢云母	2199	68.4	/	/	/	/	/	31.6	83	/	17	/	/
9	No. 218-5	白色蚀变岩	高铝绢云母	2200	52.5	6.2	8.9	/	/	/	32.4	39	/	60	/	1
10	No. 205-1	灰浅红蚀变岩	高铝绢云母	2203	61	10.3	/	/	/	/	28.7	94	/	5	1	/
11	No. 87-1	灰白色蚀变岩	中铝绢云母	2207	40.3	11.3	26.8	/	/	/	21.6	34	22	39	5	/
12	No. 235-4	蚀变岩	中铝绢云母	2209	55.4	6.2	15.4	/	/	/	23	77	/	22	1	/
13	No. 202-3	灰黄色蚀变岩	中铝绢云母	2205	61.3	5.2	3.9	/	/	/	29.6	83	1	15	1	/
14	No. 221-1	灰绿色凝灰岩	中铝绢云母	2209	40.6	/	22.8	/	/	/	36.6	73	2	24	1	/
15	No. 186-3	蚀变流纹岩	中铝绢云母	2205	55	/	10.2	/	/	/	34.8	84	1	14	/	1
16	No. 292-1	黄绿色蚀变	中铝绢云母	2205	59.4	/	7.7	6.9	/	/	26	84	/	16	/	/
17	No. 102-1-6	蚀变岩	中铝绢云母	2206	49.2	/	/	/	/	/	50.8	68	/	8	2	3
18	No. 281-7	蚀变岩	中铝绢云母	2207	54.9	/	/	/	/	/	45.1	28	/	72	/	/
19	No. 268-9	灰白色蚀变岩	中铝绢云母	2209	60.8	/	3.9	/	/	/	35.3	44	/	55	/	1
20	No. 255-5	灰色岩石	中铝绢云母	2209	53.2	/	13.8	9.8	/	/	23.2	35	/	51	2	12
21	No. 266-1	黄绿色蚀变岩	中铝绢云母	2210	50.6	5.4	8.2	/	/	/	35.8	57	2	40	1	/
22	No. 227-2	浅黄绿蚀变岩	低铝绢云母	2213	45.3	/	31.1	/	/	/	23.6	74	/	23	/	3
23	No. 375-1	黄绿色蚀变岩	低铝绢云母	2215	60.1	10.9	18	/	/	/	11	56	6	23	/	15
24	No. 184-5	浅灰粉蚀变岩	低铝绢云母	2215	51.8	/	31.8	/	/	/	16.4	62	4	27	2	5
25	No. 162-5	灰绿白蚀变岩	低铝绢云母	2217	53.5	10.9	/	/	5.4	/	30.2	76	2	21	/	1
26	No. 267-9	灰紫色凝灰岩	低铝绢云母	2218	23.6	/	21.6	9.4	/	/	45.4	28	/	38	/	34
27	No. 181-3	灰白色蚀变岩	低铝绢云母	2221	59.6	9.2	18.3	/	/	/	12.9	59	4	31	2	4
28	No. 291-3	黄绿色蚀变岩	低铝绢云母	2221	60.6	8.5	/	4.9	/	/	26	81	/	19	/	/

吸收特征波长位置可以看出,雪米斯坦地区航空高光谱识别的高铝绢云母蚀变岩(样品序号为 1～10)ASD 地面光谱测量曲线的 Al-OH 光谱吸收特征波长位置主要位于 2195～2203nm,而中铝绢云母蚀变岩 Al-OH 光谱吸收特征波长位置主要位于 2207～2210nm,低铝绢云母蚀变岩 Al-OH 光谱吸收特

征波长位置主要位于 2213～2221nm。上述三个区间分别与前述的高铝、中铝、低铝等三种矿物的航空高光谱图像端元曲线的 2195nm、2210nm、2225nm 等三个吸收峰中心位置所在的区间基本是一致的。同时,也可以看出整个雪米斯坦地区绢云母蚀变岩样品地面光谱 Al-OH 吸收特征波长位置处于 2195～2221nm 之间,最长波长与最短波长相差近 26 个 nm,远大于航空高光谱 SASI 的 15nm 光谱分辨率和地面光谱仪的 8nm 的分辨率。上述表明雪米斯坦地区航空高光谱识别的高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母从地面遥感验证角度来说是正确的、可靠的。

4.2　三种绢云母矿物空间分布特征

从雪米斯坦地区航空高光谱遥感矿物填图结果来看,高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母具有较明显的空间分布特征及差异。高铝绢云母通常与中铝绢云母密切分布在一起,且空间上与叶腊石、明矾石、迪开石等酸性流体蚀变矿物具有密切的联系或伴生(图 3);低铝绢云母或单独分布,或与中铝绢云母共生,空间上与碳酸盐、绿泥石等偏碱性流体蚀变矿物具有密切的联系或伴生(图 3)。高铝绢云母蚀变岩在野外通常表现为灰红、黄绿、黄白等偏亮颜色,而低铝绢云母蚀变岩通常表现为灰绿色、灰色等偏暗颜色,而且常穿插有较多的石英细脉、方解石细脉等(图 4)。

4.3　三种绢云母化蚀变岩显微分析结果

对表 1 中三种绢云母化蚀变岩的 28 个样品进行显微特征观察和研究。研究结果表明,高铝绢云母多数样品均发生强烈的绢云母化、伊利石化和粘土化,绢云母强烈交代岩屑和基质,岩石的原岩结构被热液蚀变完全改造,粒度较大的石英颗粒被强烈溶蚀(图 5a),粒度较小的微晶石英呈粒状集合体与

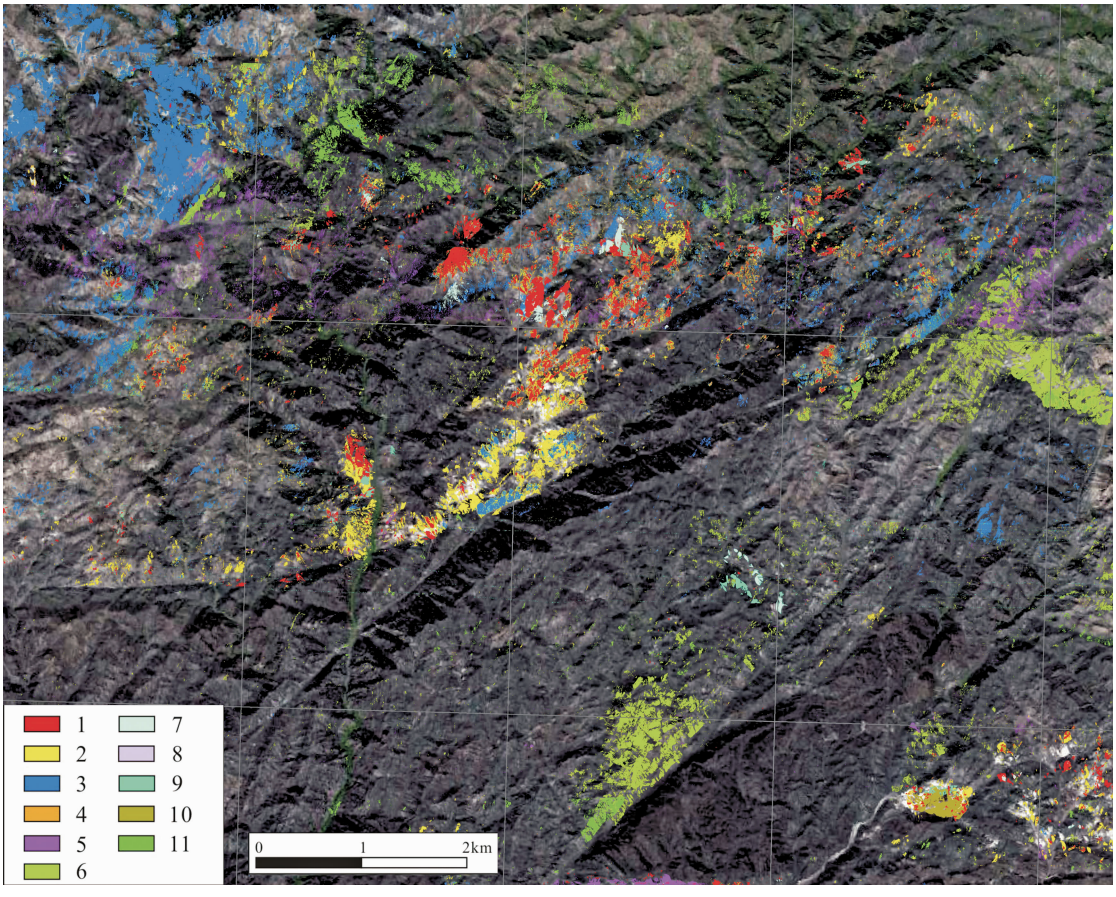


图 3　雪米斯坦西部某地段 SASI 航空高光谱矿物填图结果

Fig. 3　The result of SASI airborne hyperspectral mineral mapping for some place in west of Xuemisitan region

1—高铝绢云母;2—中铝绢云母;3—低铝绢云母;4—蒙脱石;5—碳酸盐;6—绿帘石;7—高岭石;8—迪开石;9—叶腊石;10—明矾石;11—绿泥石

1—Al-high sericite;2—Al-medium sericite;3—Al-low sericite;4—montmorillonite;5—carbonate;6—epidote;7—kaolinite;8—dickite;9—pyrophyllite;10—alunite;11—chlorite



图 4 低铝绢云母蚀变岩发育地段野外照片

Fig. 4 The field photo in place where the low-Al sericite alteration rocks existed

绢云母伴生(图 5b)。中铝、低铝绢云母蚀变岩多数样品均不同程度地发生绢云母化,伊利石化和粘土化,但与高铝绢云母蚀变岩相比,蚀变强度变弱,且火山岩的矿物组分和结构被部分保留(图 6a),绢云母主要交代长石,并保持长石假象(图 6b)。同时,低铝绢云母样品中,与绢云母伴生的蚀变矿物有碳酸盐(图 7a)和浊沸石(图 7b)。

4.4 三种绢云母化蚀变岩全岩 X 衍射分析结果

全岩 X 射线衍射分析,是对样品进行 X 射线全岩分析,获得样品中的矿物重量含量百分组成的一种分析方法,是岩矿识别中常用的一种技术。对 28 个样品的全岩 X 衍射分析结果(表 1)研究表明,10 个高铝绢云母蚀变岩样品中矿物平均含量石英为 61.74%,钾长石为 8.25%,斜长石含量为 5.73%,粘土矿物总量为 34.43%,样品 No.145-7 中硬石膏为 4%,10 个样品中均未见方解石(表 1);11 个中铝绢云母蚀变岩样品中矿物平均含量石英为 52.79%,钾长石为 7.03%,斜长石为 12.52%,方解石含量为 8.35%,粘土矿物总量为 32.89%;7 个低铝绢云母蚀变岩中矿物平均含量石英为 50.64%,钾长石为 9.88%,斜长石为 24.16%,方解石为 7.15%,

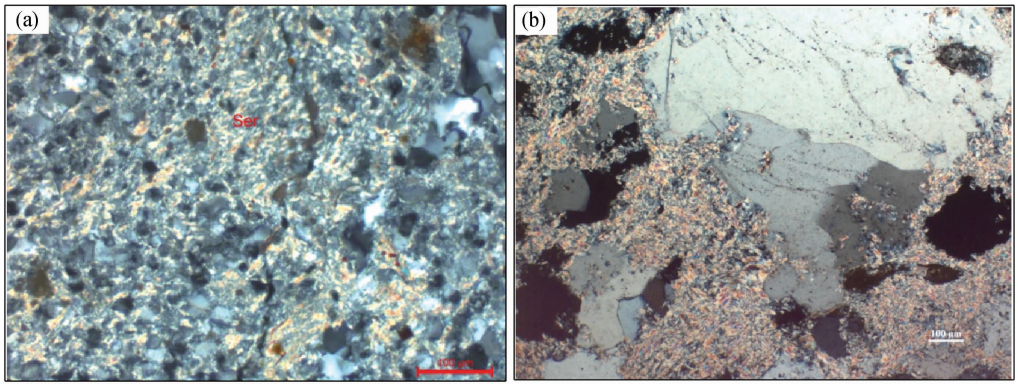


图 5 高铝绢云母蚀变岩显示的强烈热液蚀变形成的绢云母和微晶石英(a)和强烈热液蚀变溶蚀石英颗粒并形成大量的绢云母(a)显微特征照片

Fig. 5 The micrograph of sericite, fine-grain quartz (a) and dissolved quartz (b) which indicated the strong hydrothermal alteration in high-Al sericite rocks

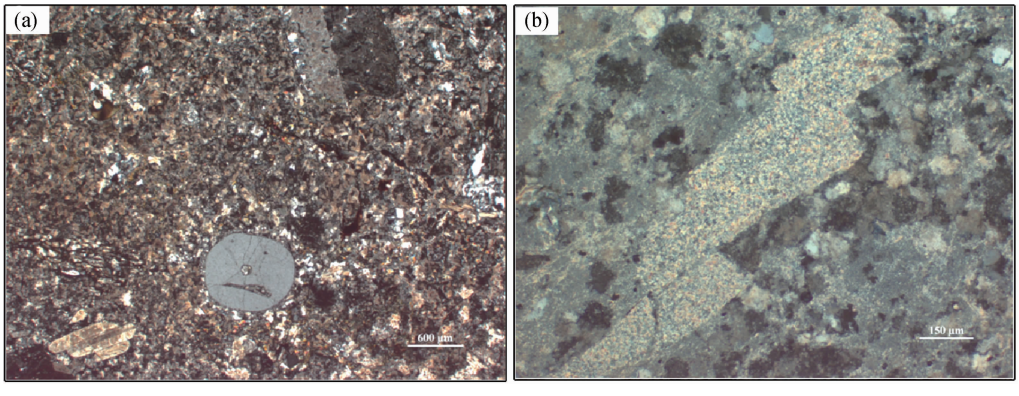


图 6 低铝绢云母样品中原岩组分和结构部分保留(a)和中铝绢云母样品中绢云母交代长石组分(b)显微特征照片

Fig. 6 The micrograph of low-Al sericite sample which shows little change of the rock's composition and structure (a) and mid-Al sericite samples which shows metasomatism between feldspar and sericite (b)

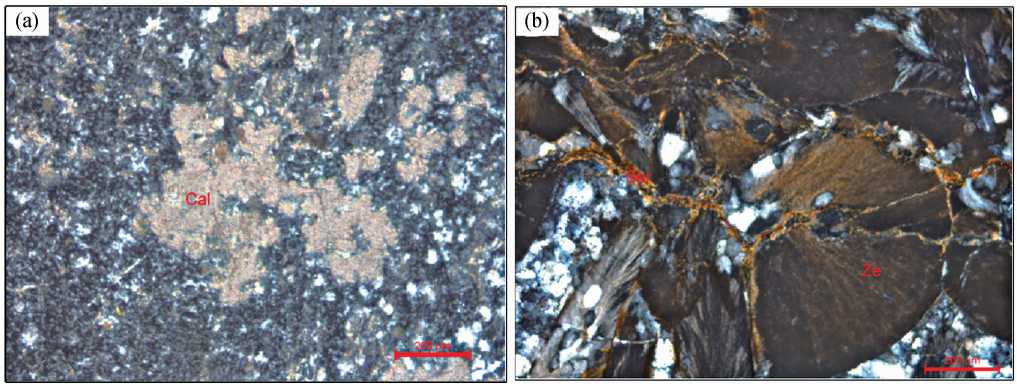


图 7　低铝绢云母蚀变样品中出现碳酸盐(a)和浊沸石(b)蚀变矿物显微特征照片

Fig. 7　The micrograph of carbonate minerals(a)and laumontite(bt) existed in the low-Al sericite alteration samples

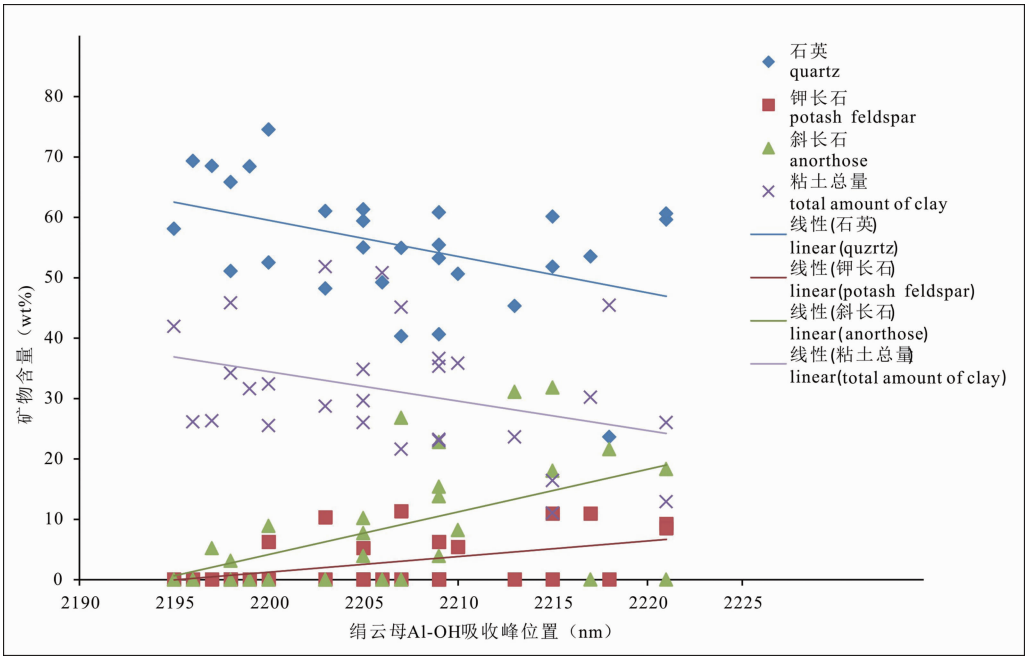


图 8　绢云母 Al-OH 吸收峰位置与全岩中不同矿物的含量关系图

8　The correlativity between the main mineral content of total rocks and the Al-OH absorption wavelength of sericite

浊沸石为 5.40%,粘土总量为 23.64%。通过上述各矿物含量均值的对比分析可知:高铝绢云母蚀变岩样品具有相对高的石英含量和粘土矿物总量,具有相对较低的钾长石和斜长石含量,方解石很少见;低铝绢云母蚀变岩则具有相对较低的石英和粘土含量,具有相对较高的斜长石、钾长石和方解石含量。中铝绢云母特征则处于高铝、低铝两者之间。

通过统计分析发现,28 个蚀变岩样品中位于 2200nm 附近的 Al-OH 特征吸收峰波长位置与这些矿物的含量呈现不同程度的相关关系,主要表现在:石英含量与吸收峰位置呈现较好的负相关(图 8),即石英含量随着吸收峰波长位置的增加而减少;斜长石和钾长石的含量与吸收峰波长位置呈现弱的正相关(图 8);粘土含量与吸收峰波长位置呈现负相关(图 8),即粘土含量随着吸收峰波长位置的增加而减少。

X 衍射分析的主矿物含量变化规律可以用以下两个热液蚀变反应来解释:

(1)斜长石绢英岩化蚀变:

$3NaAlSi_3O_8$(斜长石)+ $K^+ + 2H^+ = KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$(绢云母)+ $3Na^+ + 6SiO_2$(石英);

(2)钾长石绢英岩化蚀变:

$3KAlSi_3O_8$(钾长石)+ $H_2O = KAl_2(AlSi_3O_{10})(OH)_2$(绢云母)+ $2KOH + 6SiO_2$(石英)

由于所采集的样品都是雪米斯坦火山岩样品,

故假设 28 个蚀变岩样品的原岩矿物含量相差不大，因而斜长石和钾长石以及石英的含量变化主要由热液蚀变的强度的不同所造成。光谱特征呈现低铝绢云母的样品所遭受的热液蚀变较弱，因而蚀变岩中残留的钾长石和斜长石较多，热液蚀变的产物石英、绢云母及黏土矿物含量则较少；光谱特征呈现高铝绢云母特征的样品所遭受的热液蚀变较强，因而蚀变岩中残留的钾长石和斜长石含量较少，热液蚀变的产物石英、绢云母及粘土矿物含量则较多。光谱特征呈现中铝绢云母特征的岩石样品热液蚀变中等，矿物含量位于低铝绢云母和高铝绢云母特征的岩石样品之间。

4.5 三种绢云母蚀变岩粘土矿物 X 衍射分析结果

雪米斯坦地区 28 个蚀变岩样品的粘土矿物 X 衍射结果（表 1）显示，样品中粘土矿物主要包括伊利石、蒙皂石（蒙脱石）、伊蒙混层、高岭石、绿泥石等矿物。从各粘土矿物的平均含量来看：高铝绢云母蚀变岩样品具有更高的伊利石含量，而中铝与低铝绢云母蚀变岩样品则具有更高的蒙脱石和伊蒙混层含量，以及较高的绿泥石含量。高岭石在高、中、低铝绢云母样品中的含量均普遍较低。

对样品中各粘土矿物含量与样品光谱 Al-OH 吸收峰波长位置关系进行统计分析的结果表明：伊利石的含量和吸收峰波长位置呈现负相关的关系（图 9），而蒙脱石、伊蒙混层的含量与吸收峰波长位置均呈现正相关的关系（图 9），绿泥石的含量与吸收峰波长位置也呈现正相关（图 9），即随着吸收峰波长位置向长波方向偏移，伊利石含量降低，蒙脱石、伊蒙混层、绿泥石含量均增加。

综上，光谱呈现低铝绢云母特征的岩石样品伊利石含量低，蒙脱石含量高，伊蒙混层的含量较高。这个规律主要是与热液蚀变中蒙脱石与伊利石的相互转化过程有关，控制蒙脱石伊利石化的因素主要有温度、压力、时间等，其中，温度是控制蒙脱石伊利石化的最主要因素（Zhou Zhangjian，1994），随着温度的升高，蒙脱石开始转化为伊利石，而且随着伊利石层含量的逐渐增多，伊—蒙混层粘土矿物的结构也由无序趋于有序。由于光谱呈现高铝绢云母特征的岩石样品代表的热液蚀变温度较高，因而在蚀变的粘土矿物中伊利石含量较高，伊蒙混层及蒙脱石含量较低；低铝绢云母特征的岩石样品代表的热液蚀变温度较低，因而在蚀变的粘土矿物中伊利石含量较低，伊蒙混层和蒙脱石含量较高；中铝绢云母特征的岩石样品中粘土矿物含量则介于二者之间。

5 讨论

5.1 高光谱识别的高、中、低铝三种绢云母的矿物属性

在岩石矿物学研究中，白云母、伊利石、蒙脱石等矿物是具有比较明确矿物学特征的单矿物，其出

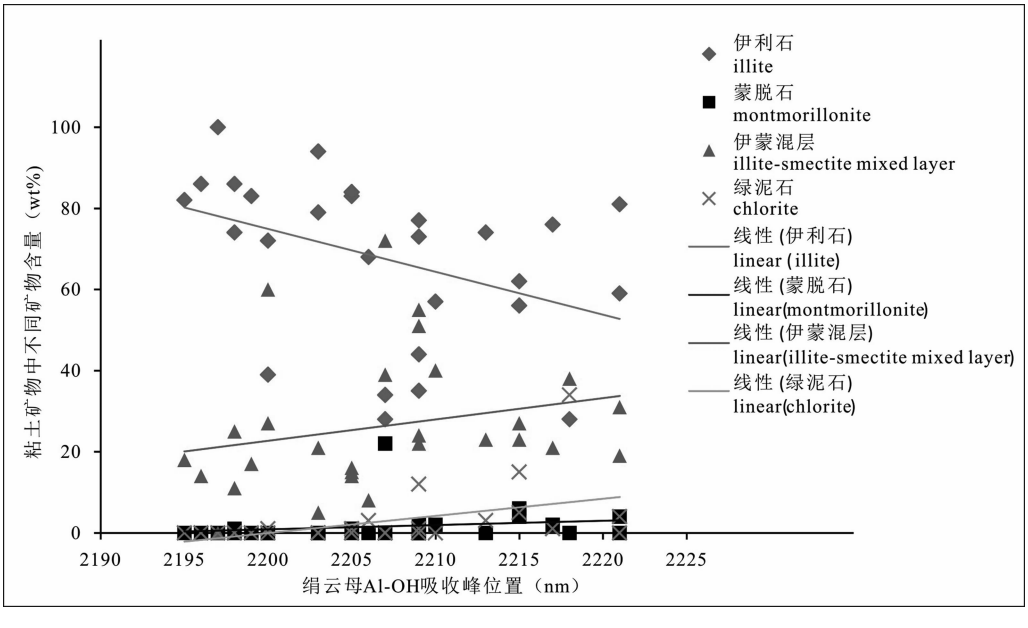


图 9 粘土矿物中不同矿物含量与 Al-OH 吸收位置关系图

Fig. 9 The correlativity between the different mineral content of the total clay minerals and the Al-OH absorption wavelength of sericite

现的岩石类型和形成的温度、压力条件也不尽相同,地质内涵和找矿意义也不一样。从高光谱遥感角度来说,这些矿物的光谱特征较为相似。图 10 为 USGS 矿物标准光谱库中几种云母类矿物的光谱曲线图。从图中可以看出,同样是白云母、伊利石、蒙脱石,其光谱曲线表现出来的在 2200nm 附近的 Al-OH 吸收峰中心波长位置有差异,如 Muscovite GDS107、Muscovite GDS117 等白云母 Al-OH 吸收峰波长中心位置为 2.205μm,Muscovite HS24.3、Muscovite GDS116 等白云母的 Al-OH 吸收峰波长中心位置为 2.215μm;Illite IL101(2M)、Illite IL105(1M)、Illite GDS4 等三种伊利石的 Al-OH 吸收峰波长中心位置分别为 2.195μm 与 2.205μm 之间、2.205μm、2.215μm 与 2.225μm 之间,Montmorillonite swy-1、Montmorillonite Sca-2 等两种蒙脱石的 Al-OH 吸收峰波长中心位置分别为 2.195μm 、2.205μm。从曲线形态和光谱吸收峰特征来看,白云母和伊利石的曲线形态和吸收峰位置几乎完全相同,均在 2.200μm、2.345μm、2.440μm 附近有明显吸收峰特征,只是 Illite IL105(1Md)的曲线比较平缓,不及其他明显。与白云母和伊利石的曲线形态和吸收峰位置相比,蒙脱石在 2.200μm 亦存在相同位置的吸收,但在 2.270μm 之后几乎没有吸收峰存在,而是呈一条平直的曲线倾斜下降。

从已知矿物出发分析其光谱特征通常是比较容易的,但反过来,从一条未知矿物的光谱曲线特征来确定该矿物是否是白云母、绢云母、伊利石或伊蒙混层矿物等是比较困难的。如果上述这些矿物相互混合,则从其光谱曲线特征上显然无法做出准确的判断。如伊利石和蒙脱石混合后,其光谱特征也出现了混合,可能在 2.200μm、2.345μm、2.440μm 附近均出现吸收峰。这时,仅根据光谱曲线无法判识是伊利石,还是伊利石与蒙脱石混合,只有光谱曲线中仅在 2.200μm 附近出现强烈吸收,而在 2.345μm、2.440μm 没有吸收特征时,才可能判识为蒙脱石。Chabrillat et al.(2002)研究表明,当蒙脱石中混合 5%左右的伊利石时,混合物的室内光谱曲线在 2340nm 附近的光谱吸收特征不明显,当混合 20%伊利石时则变得很明显。同样,如果是白云母、绢云母、伊利石混合,则由于它们在 2.200μm、2.345μm、2.440μm 等三个波长位置的吸收特征几乎相同,故无法从光谱曲线特征中识别是单一的白云母、绢云母、伊利石,还是多种矿物混合。

航空、卫星等高光谱遥感相比于地面和室内的

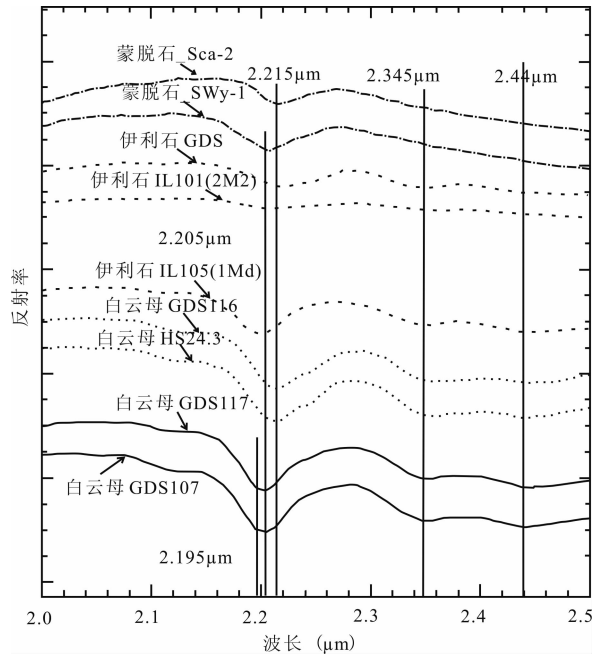


图 10　USGS 光谱库中典型矿物光谱曲线图(2.000～2.500μm)(注:为了更清楚显示各条曲线特征,将纵坐标的反射率进行了叠置)

Fig. 10　The hyperspectral curve of typical minerals from USGS spectral library (Note: Superposition has been carried on the reflectance to enhance the curve characteristic)

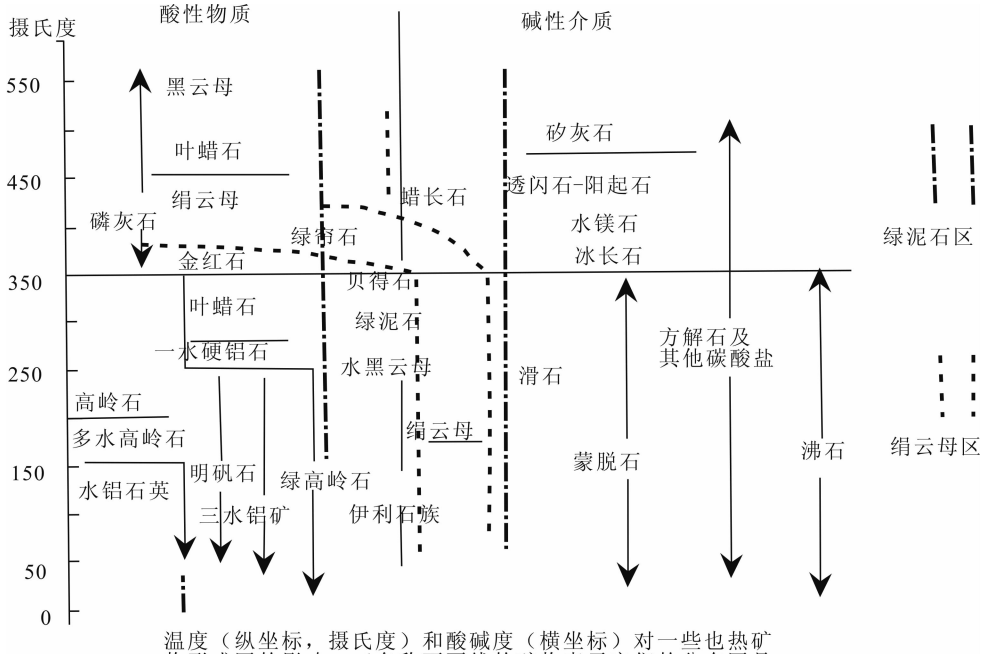
高光谱遥感,由于受大气影响因素更为严重,信噪比相对降低,尤其是 2.400μm 之后的信噪比低,噪声大。因此,利用航空、卫星等高光谱图像像元曲线进行矿物填图时,无法准确判识出矿物是白云母、绢云母、伊利石等矿物中的某一种,或是某一种矿物中混有蒙脱石、伊蒙混层矿物,或是哪几种矿物的混合物,而只能判识出是上述这些矿物的混合物,即是白云母、绢云母、伊利石、蒙脱石、伊蒙混层等矿物或多个矿物组合的一个统称。所以,当前国内外在航空高光谱矿物填图研究和应用中识别和命名的高铝、中铝和低铝绢云母等蚀变矿物,总体来说均不是指矿物学中具有明确晶体结构和矿物属性的白云母、伊利石、伊蒙混层等矿物中的某一种,而是它们的集合体或混合体,但这个矿物的集合体或混合体具有明显的 Al-OH 光谱吸收特征。命名中的高铝、中铝或低铝也主要是矿物八面体晶格中六次配位铝(Al^{VI})的一个相对含量或相对比例的高低,不是一个具有确定范围的绝对含量。因此,使用时在概念上不能误解为高光谱识别的高铝绢云母蚀变岩或低铝绢云母蚀变岩中肯定含有较高的 Al 含量,或比较低的 Al 含量。此外,考虑到绢云母矿物处于白

云母→绢云母→伊利石→伊蒙混层的矿物演化系列的中间环节，且在各种热液蚀变岩中分布较为普遍，建议高光谱矿物填图中将具有不同 Al-OH 吸收波长位置的云母类矿物规范命名为高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母等，英文命名为 Al-high sericite、Al-medium sericite、Al-poor sericite，以改变当前国内外在高光谱矿物填图中命名不统一和名称混乱的现象。

5.2 高铝、中铝、低铝绢云母形成温度、酸碱度条件差异

由于引起白云母、绢云母、伊利石、伊蒙混层等矿物 Al-OH 特征波长变化的中 $Al^{Ⅵ}$ 含量变化常常是地质过程中组分相互替代造成的，而这些组分替代过程又常常与温度压力及流体酸碱性相关。因此，这些矿物 Al-OH 吸收峰位置的变化可以用来讨论成矿流体的物理化学条件。图 11 是部分矿物形成时热液温度、酸碱度的演化图。从图中可以看出，叶腊石明显形成于强酸性的高、中温环境，明矾石、高岭石等形成于中低温的强酸性环境；蒙脱石、沸石等明显形成于中温的碱性环境。同时，绢云母（即细小的白云母）具有一个明显的跨越不同温度和酸碱度的演化区，即从 450℃高温和与叶腊石相当的酸性条件开始，先下降到 350℃，并跨过酸碱分界进入弱碱性区，然后，在弱碱性相对稳定的条件下，温度一直下降直至 100℃附近的低温；伊利石族，主要处于 100～150℃附近的低温区，而且酸碱度条件包括弱酸性至弱碱性，碱性部分与绢云母的低温演化区部分重叠。从上述矿物形成的温度、酸碱度等条件可以看出，叶腊石、明矾石等形成于明显的酸性热液环境，碳酸盐、蒙脱石、沸石等形成于碱性的热液环境。同时，绢云母、伊利石等矿物形成于温度和酸碱度条件变化较大的一个区间。这一较大的变化区间的物理化学条件就决定了它们成分上具有多样性。

从上述矿物成因学出发，再来分析雪米斯坦地区高光谱识别的高铝绢云母和低铝绢云母形成的温度与酸碱度差异。如前所述，雪米斯坦地区高光谱识别的高铝绢云母蚀变岩与低铝绢云母蚀变岩具有如下几点明显差异，而中铝绢云母蚀变岩则具有它们之间的过渡性质和特征。具体表现为：①高铝绢云母蚀变岩空间上常与叶腊石、迪开石等形成于酸性环境下的矿物密切联系或共生；显微特征中表现为强烈热液蚀变，交代长石的云母类矿物主要为细小鳞片状的白云母、绢云母集合体，以及部分伊利石集合体；X 衍射中表现为含有更高的石英含量和粘土含量，且粘土总量中伊利石含量高，伊蒙混层、蒙脱石含量低。②低铝绢云母在空间上常与绿泥石、碳酸盐等形成于偏碱性条件下矿物密切联系或共生；显微特征中表现为相对较弱的热液蚀变特征，原



温度（纵坐标，摄氏度）和酸碱度（横坐标）对一些也热矿物形成区的影响。（名称下画线的矿物表示它们的分布区是准确确定的）

图 11 不同矿物的形成环境(Chen Guangyuan et al.,1987)

Fig. 11 The formed environment for different kind of minerals(Chen Guangyuan et al.,1987)

岩的结构和构造被部分保留,斜长石等矿物呈假象存在,碳酸盐、浊沸石等碱性流体条件下形成的矿物可见;X 衍射反映出其比高铝绢云母具有更低的石英含量和粘土含量,更高的钾长石、斜长石、以及碳酸盐、浊沸石含量,而且粘土矿物总量中,伊利石含量相较于高铝绢云母更低,蒙脱石、伊蒙混层含量更高,绿泥石、蒙混层等含 Fe、Mg 矿物明显增加。

综合上述特征对比,可以判断雪米斯坦火山岩带航空高光谱识别的高铝绢云母形成于温度相对较高、偏酸性的热液流体环境,而低铝绢云母形成于温度相对较低、偏碱性的热液环境,而中铝绢云母则处于这两者之间的过渡性质,或与高铝绢云母共生,或与低铝云母共生,分别成为与这两种不同温度、酸碱度的热液蚀变演化密切相关的组成部分。

众所周知,在热液演化体系中,由于温度、酸碱度、以及离子组分的不同,白云母(分子式为 $KAl_2^{VI}AlSi_3O_{10}(OH)_2$)向钠云母、伊利石、多硅白云母、绿鳞石、蒙脱石等演化。当热液中富 Na^+ 强碱条件下,白云母中的 K 被 Na 取代,形成钠云母 $NaAl_2^{VI}AlSi_3O_{10}(OH)_2$;当热液温度下降时,白云母结晶度降低,形成细小的白云母(绢云母);当温度进一步降低,含水量增加时,绢云母去钾、加水形成介于云母族与粘土族之间的伊利石(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)$_2$(Si, Al)$_4O_{10}$[$(OH)_2$, (H_2O)]。另一方面,如果热液中富含 Si、Mg、Fe 等组分,则白云母(绢云母)中的四次配位 Al^{IV} 部分被 Si 替代,同时六次配位 Al^{VI} 被 Mg、Fe 的替代,形成多硅白云母[$KAl_{1.5}$(Fe, Mg)$_{0.5}Al_{0.5}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$];如果多硅白云母进一步被替代,则 Al^{IV} 全部被 Si 替代,Al^{IV} 被 Mg、Fe 更多替代,则形成了绿鳞石 K(Mg, Fe^{2+})(Fe^{3+}, Al)(Si_4O_{10})$(OH)_2$。当然,对于多硅白云母来说,其热液成因是次要的,变质成因是主要的。在上述热液演化过程中,存在如下几种云母类矿物 Al-OH 吸收峰波长位置与温度的相关变化情况。通过从理论上分析云母类矿物 Al-OH 吸收峰波长位置与温度的相关变化情况,可以进一步论证上述得出的具有 Al-OH 吸收峰波长较短位置的高铝绢云母形成于相对更高温度、而具有 Al-OH 吸收峰波长较长位置的低铝绢云母形成于相对更低温度。

(1)从白云母 $KAl_2^{VI}AlSi_3O_{10}(OH)_2$→钠云母 $NaAl_2^{VI}AlSi_3O_{10}(OH)_2$,Al-OH 光谱特征吸收波长向短波方向漂移,由白云母的 2190nm 变化到钠云母的 2185nm(图 12)。同时,从白云母(绢云母)$KAl_2^{VI}AlSi_3O_{10}(OH)_2$→多硅白云母 $KAl_{1.5}$(Fe, Mg)$_{0.5}Al_{0.5}Si_{3.5}O_{10}(OH)_2$→绿鳞石 K[Mg, Fe]Al($Si_4O_{10}$)$(OH)_2$,六次配位铝($Al^{VI}$)由 2 个→1.5 个→1 个,逐渐减少。因此,自白云母→多硅白云母→绿鳞石,其 Al-OH 光谱吸收特征波长位置由短波不断向长波方向偏移,即由白云母的 2190nm 变化到 2215nm(图 12)。Martinez-Alonso et al.(2002)实验证实,二八面体层状硅酸盐 Al-OH 诊断性光谱特征为 2190nm(白云母,钠云母)至 2220nm(多硅白云母)。

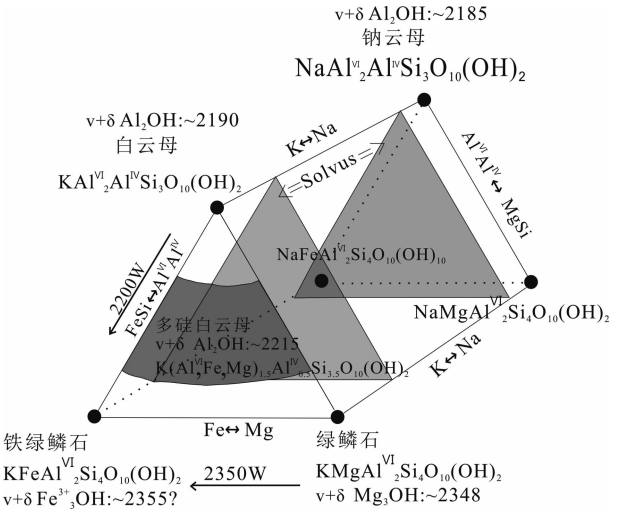


图 12　白云母成分替代及吸收光谱特征(Carsten et al., 2011)

Fig. 12　The component replacement of muscovite and its spectral absorption characteristics(Carsten et al., 2011)

前人研究表明,在岩石组分和矿物相相似的情况下,白云母 Si 含量等值线表现为随压力增加而增加,随温度的增加而降低(Wei Jinchun et al.,2007; Hans-Joachim et al., 1989; Wei et al., 2003),但白云母生成多硅白云母的反应中,温度是一个重要因素,而压力可能不是很重要(Heinrich et al., 1995)。白云母 Al-OH 光谱特征波长位置与 Si 含量呈正相关关系(Liang Shuneng et al.,2012)。因此,就热液蚀变系统中的白云母和多硅白云母系列而言,高光谱遥感识别的具有相对短的 Al-OH 特征波长的高铝绢云母反映相对更高温的流体环境,低铝绢云母反映相对更低温的流体环境;而在变质系统中,高铝绢云母反映相对更高温低压的流体环境,低铝绢云母反映相对更低温高压的流体环境。

(2)从白云母(绢云母)$KAl_2^{VI}Al\ Si_3O_{10}(OH)_2$→伊利石 K_{1-x} {(Al, Mg, Fe)$_2$[$AlSi_3O_{10}$]$(OH)_{2-x}(H_2O)_x$}→蒙脱石 $Na_{0.2-0.6}(H_2O)_4$ {$(Al_{1.2-1.8}, Mg_{0.2-0.6})$[(Si, Al)$_4O_{10}$]$(OH)_2$}演化

过程中，六次配位铝(Al^{VI})逐渐减少，钾离子逐渐减少，但 H_2O 不断增加。因此，根据 Al-OH 吸收波长位置与 Al^{VI} 含量比例呈负相关的特点，从白云母(绢云母)→伊利石→蒙脱石，其 Al-OH 光谱吸收特征波长位置由短波不断向长波方向偏移。Agus(2011)研究智利 Los Bronces-Rio Blanco 斑岩铜矿化蚀变光谱特征时表明，白云母比伊利石具有更高的结晶度，其 Al-OH 吸收波长总体上比伊利石更偏短波。J. J. Hemley 在 K_2O-Al_2O_3-SiO_2-H_2O 体系平衡实验和大量实际材料表明，钾、钠等碱金属离子的活度随温度降低而降低，而 CO_2、H_2O 等却相反(Hu Souxi，1980)。因此，从高温交代蚀变转变为中一低温交代蚀变时，K_2O 不断被分解和带走，H_2O 不断地进入和增加(Hu Souxi，1980)。热液蚀变温度越低，甚至在风化条件下，伊蒙混层、蒙脱石等粘石含量越高。大多数情况下温度是控制蒙脱石向伊利石转化的一个最主要的因素(Zhou Zhangjian，1994)。随着温度的增加，蒙脱石开始转化为伊利石，而且随着伊利石含量的逐渐增多，伊蒙混层的粘土矿物的结构也由无序趋于有序。因此，对于白云母(绢云母)一伊利石一蒙脱石(伊蒙混层)系列为说，高光谱遥感识别的具有相对短的 Al-OH 吸收特征波长的高铝绢云母反映相对高温的热液环境，低铝绢云母反映相对低温的热液环境。

(3)伊利石因形成温度不同而具有不同的结晶度和 Al-OH 吸收波长。伊利石分子式为 $K_{1-x}(H_2O)_x\{Al_2[AlSi_3O_{10}](OH)_{2-x}(H2O)_x\}$，其结构中主要有 2 种含氢基团，分别为 Al-OH 和 H_2O。随着水含量 X 的增多，结晶度降低，形成温度降低，Al-OH 光谱吸收特征波长由短波向长波方向偏移。Scott et al.(1997)研究表明，Al-OH 吸收峰位与伊利石分子结构内六次配位 Al 的含量呈现明显负相关。在相对高温条件下，伊利石六次配位 Al 含量较高，对应于较低的 Al-OH 吸收峰位，即高铝伊利石；随着温度降低，六次配位 Al 降低，Al-OH 吸收峰位则逐渐增高，形成长波伊利石。Zhao Liqing et al.(2008)认为在相对高温条件下，伊利石最接近理想的配比成分；随着温度的降低，其四面体位置的 Al+K 逐渐地被 Si 和一些缺陷所替代，从而导致层间位置容纳了更多的 H_2O。高的 H_2O 含量会引起较强的 1900nm 吸收，致使伊利石 1900nm 吸收深度值增大，结晶度降低。因此，伊利石结晶度与热液蚀变的温度具有正相关的关系，即高结晶度的伊利石代表相对高温的热液蚀变，在温度较高的热液活动中心，伊利石结晶度较高。Yang Zhiming et al.(2012)对西藏念村斑岩型矿床研究时发现，靠近矿区东部的伊利石一叶蜡石蚀变区域，伊利石结晶度的值明显较高，其 Al-OH 特征吸收波长位置明显较低(<2203nm)；同时，位于矿区浅部样品伊利石 Al-OH 吸收峰位较大(>2210nm)，随着样品深度的增加，吸收峰位逐渐降低。Harraden et al.(2013)在对 Pebble 矿床研究发现，Al-OH 吸收峰位也可以作为伊利石结晶度的估计，短波的伊利石具有高的结晶度，代表相对较高的热液蚀变温度。从上述分析可知，对于不同结晶度的伊利石而言，Al-OH 特征吸收波长位置亦可发生变化，具有相对短的 Al-OH 吸收特征波长的高铝伊利石形成于相对更高的温度，而具有相对长波的 Al-OH 吸收特征波长的中铝、低铝伊利石形成于相对更低的温度。

前已述及高光谱识别的高、中、低铝三种绢云母不是单一的矿物，而是钠云母、白云母、绢云母、多硅白云母、伊利石、伊蒙混层等多种矿物、以及可能混有蒙脱石、绿鳞石等矿物集合体，但是在同一个热液蚀变演化系列中，不管上述不同矿物或多矿物组合体是属于白云母一多硅白云母系列、还是白云母一伊利石一伊蒙混层一蒙脱石系列，还是伊利石自身系列(结晶度不同)，其 Al-OH 吸收特征波长总体上均具有与形成温度呈密切的负相关关系，即高光谱识别的具有相对短波 Al-OH 吸收特征波长的高铝绢云母形成于温度相对较高的环境，而中铝、低铝绢云母形成于温度相对较低的环境。

上述认识在国外的一些研究中也可以得到证实。Duke(1994)认为更长的 Al-OH 吸收特征波长表明低的 Al 含量，并可能与形成更冷却的温度有关；Yang et al.(1999)和 Lau et al.(2003)认为高 Al 白云母(特征在 2194nm)分布与更高温度的金成矿系统和变质组合有关，白云母的高 Al 成分通常在更高温度的矿区内发现；Sinclair(2000)研究澳大利亚昆士兰州北部火山岩块状硫化物 Battle 矿床的蚀变岩时，发现具有 Al-OH 长波特征的多硅白云母与富铁绿泥石离矿床很远，而具有短波一中波的正常白云母(白云母、伊利石)和富镁绿泥石出现在矿床附近。Bierwirth et al.(2002)利用 Hymap 航空高光谱在西澳皮尔巴拉中部对与金矿化相关的蚀变矿物组合进行谱识别时，发现 Indee 地区观察的贫 Al 白云母(吸收特征在 2210μm)分布与更低温的似浅成低温热液脉有关；Jones et al.(2005)对 Myra Falls 火山喷流块状硫化物矿床研究时，发现

靠近矿体强蚀变样品的白云母为短波白云母(<2198nm),而远离矿体 Al-OH 吸收位置集中于长波方向(>2206nm);Yang et al.(1999)认为短波伊利石与漂白带中的迪开石和叶腊石共生,形成温度较高(200~250℃)(Reyes, 1990),表明高级泥化带蚀变可能形成于上升的岩浆流体,故短波伊利石形成于相对较高的温度,长波伊利石(2214nm)可能是青磐石或绢英岩矿物组合的部分,可能代表热液蚀变系统中温度较低的下降流区域外围蚀变,或矿化蚀变系统中上升流区域的更低部分的蚀变。伊利石从短波一长波的变化趋势,可能是从热液系统中部(流体上升)相对高温到外围部分(更低)热液流体酸度、温度降低的结果。

另外,少部分学者对此也有不同的发现,Yang et al.(2011)认为,在 Hellyer 地区 Al-OH 吸收波长大于 2215nm 的多硅白云母出现在蚀变系统的中央可能表明相对更高的温度;Van Ruitenbeek et al.(2006)研究西澳皮尔巴拉地区 Soansville 绿片岩带火山岩中的热液蚀变系统中,将分布在火山岩层层序顶部的具有短吸收波长(<2205nm)和下部具有长吸收波长(>2208nm)的富含白云母的区域解译由于海水补给而形成的热液蚀变相;刘圣伟等(2006)认为绢云母和白云母光谱吸收特征波长向长波漂移代表 Al^{VI} 含量减少,反映了相对低压高温的形成环境,而向短波方向漂移则说明 Al^{VI} 含量增多,代表了相对高压低温的成因条件,据此,将东天山黄山地区 HyMap 航空高光谱遥感数据识别出的短波云母(Al-OH 吸收中心波长在 2192nm)和长波云母(Al-OH 吸收中心波长在 2210nm)分别解译为形成于相对高压低温条件和相对低压高温条件,指出前者可能与其所处的断裂环境有密切关系,而后者与区内地层发生的温压条件和变质因素较为复杂的区域变质作用环境相对应。以上几个不同的发现可能与这几个研究区热液蚀变、变质等多种地质过程综合作用有关,如 Yang et al.(2011)文中提到 Hellyer 地区矿化后发生了区域变质作用。因此,利用绢云母类矿物光谱特征讨论热液蚀变温度等条件时,需要结合研究区的地质条件进行分析,综合考虑多种地质过程和因素。

5.3　围岩组分对高铝、中铝、低铝等三种绢云母成因的影响

已有研究表明,围岩成分对岩矿的 Al-OH 吸收波长位置是有影响的。Herrmann et al.(2001)研究发现 Al-OH 吸收峰特征随着热液蚀变强度、离矿体远近、全岩成分的变化而改变。在弱蚀变的流纹岩中的浅色云母的 Al-OH 吸收特征波长始终更短(<2200nm),而安山岩、英安岩中的白色云母则更长(>2205nm),反映岩石中更高铁、镁含量影响了白色云母的成分。这说明围岩组分对白色云母 Al-OH 吸收峰值有一定的影响,进而影响高、中、低铝三种绢云母蚀变岩的形成。Jones et al.(2005)对火山喷流型块状硫化物矿床研究时发现,在弱蚀变的情况下,绢云母 Al-OH 的吸收位置受围岩岩性影响,如流纹岩的蚀变岩以短波绢云母为主,英安岩和安山岩的蚀变岩则是长波绢云母。从火山岩 Al-Mg-Fe 含量来看,酸性火山岩中具有更高的 Al 含量,基性火山岩中具有较高的 Fe、Mg 含量。影响绢云母 Al-OH 吸收峰位置的主要成分替代是(Mg, Fe^{2+})$Si \leftrightarrow Al^{IV}Al^{VI}$ 替代,围岩中较高的 Fe、Mg 含量将促进替代向左进行,使得绢云母中六次配位铝降低,Al-OH 吸收峰位置向长波方向偏移,形成低铝绢云母。在墨西哥的 Los Azufres 地热田,安山岩中的伊利石比流纹岩中的伊利石系统地更富铁和镁(Cathelineau et al., 1988);在美国亚利桑那州的 Ray 矿区,更大区域尺度的研究表明白色云母中八面体 Al 含量也同样显示出随主岩成分改变而变化的特性(Clark et al., 1998)。Jones et al.(2005)分析也认为弱蚀变岩的 Al-OH 吸收位置变化可能受全岩成分关系大,而强烈蚀变岩中绢云母的 Al-OH 吸收位置受全岩成分影响小,且这一特征在铁镁质岩石和流纹岩中很相似,说明全岩成分是弱蚀变岩或背景岩石中白云母成分的第一控制因素,而在强烈蚀变中则不那么重要。

在本次研究中的样品大多是泥盆系安山质火山岩、而且基本上都已发生较强烈的热液蚀变,这可以从这些样品的粘土总量多数均大于 20%的含量中反映出来(表 1),而且粘土总量中伊利石含量也比较高,均大于 20%。因此,可以说,本文研究得出的上述一些结论与岩性本身的成分关系不大,而主要是与热液蚀变的温度和酸碱度有关。

6　结论

(1)航空高光谱识别和填图的高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母等三种矿物,实质上是白云母、多硅白云母、伊利石、伊蒙混层等矿物中的某一种或多种的混合体,不是指具有明确矿物属性的单一矿物;名称中的高铝、中铝、低铝也不是指矿物中铝的绝对含量的高低,而是指矿物晶格中八面体 Al^{VI} 占

阳离子总量比例的相对高低。考虑到绢云母矿物处于白云母→绢云母→伊利石→伊蒙混层的矿物演化系列的中间环节,且在各种热液蚀变岩中分布较为普遍,建议高光谱矿物填图中将具有不同 Al-OH 吸收波长位置的云母类矿物规范命名为高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母等,英文命名为 Al-high sericite、Al-medium sericite、Al-low sericite。

(2)雪米斯坦地区高光谱识别的高铝绢云母蚀变岩样品主要与叶腊石和微晶石英伴生,表明蚀变形成于酸性的流体环境中;低铝绢云母蚀变岩样品主要与方解石、浊沸石矿物伴生,表明蚀变形成于碱性的流体环境中。

(3)研究表明,新疆雪米斯坦火山岩地区航空高光谱识别出来的高铝绢云母蚀变岩样品具有低的斜长石、钾长石含量和高的石英、粘土矿物含量,且粘土矿物呈现富伊利石和贫蒙脱石及伊蒙混层矿物的特点。这表明高铝绢云母蚀变形成于相对高温的热液流体环境;低铝绢云母蚀变岩样品具有高的斜长石、钾长石含量和低的石英、粘土矿物含量,粘土矿物呈现贫伊利石和富蒙脱石及伊蒙混层矿物的特点,从而表明低铝绢云母蚀变形成于相对低温的热液流体环境。

(4)雪米斯坦地区高光谱识别的高、中、低铝绢云母蚀变岩的 Al-OH 吸收波长位置的变化与原岩关系不大,而主要与热液蚀变的温度、酸碱性有关。

References

Agus Abigail June L. 2011. Mapping white mica in milled porphyry copper pebbles using hyper-spectral imagery: an exploratory study. Diss. Master's Thesis, University of Twente, Enschede, The Netherlands.

Bedini Enton. 2011. Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data. Advances in Space Research, 47(1): 60～73.

Bierwirth Phil, Huston David and Blewett Richard. 2002. Hyperspectral mapping of mineral assemblages associated with gold mineralization in the central Pilbara, Western Australia. Economic Geology, 97(2): 819～826.

CarstenLaukamp. 2011. Short Wave Infrared Functional Groups of Rock forming Minerals. http://c3dmm.csiro.au

Cathelineau M. 1988. Cation site occupancy in chlorites and illites as a function of temperature. Clay Minerals, 23(4): 471～485.

Cathelineau M and Izquierdo G. 1988. Temperature-composition relationships of authigenic micaceous minerals in the Los Azufres geothermal system. Contributions to Mineral and Petrology, 100(4): 418～428.

Chabrillat S, Goetz A F, Krosley L and Olsen H W. 2002. Use of hyperspectral images in the identification and mapping of expansive clay soils and the role of spatial resolution. Remote Sensing of Environment, 82(2): 431～445.

Clark R N, King T V V, Klejwa M, Swayze G, Vergo N. 1990. High Spectral Resolution Reflectance Spectroscopy of Minerals. Geophys Res. 95: 12653～12680.

Clark R N, Vance J S, Livo K E and Green R O. 1998. Mineral mapping with imaging spectroscopy, the Ray mine, AZ: Pasadena, California. In Proceedings of the 7th Annual JPL Airborne Earth Science Workshop: 67 ～ 75.

Che Yongfei, Zhao Yingjun, Ye Fawang: 2017. Extraction and Analysis of Hyperspectral Remote Sensing Alteration Mineral Based on Spectral Characteristic Parameters. 63(sup): 196～197.

Chen Guangyuan, Sun Daisheng, Yin Huian. 1988. Genetic mineralogy and exploration mineralogy. Chongqing: Chongqing Publishing House(Second Edition), 1～880.

Cudahy T J, Hewson R, Huntington J F, Quigley M A, Barry P S. 2001. The performance of the satellite-borne Hyperion Hyperspectral VNIR-SWIR Imaging System for mineral mapping at Mount Fitton, South Australia. Geoscience and remote sensing symposium, 2001. IGARSS'01. IEEE 2001 International. IEEE, 2001, 1: 314～316.

Dong Lianhui, Feng Jing, Liu Dequan, Tang Yan-ling, Qu Xun, Wang Kezhuo, Yang Zaifeng. 2010. Research for classification of metallogenic unit of Xinjiang. Xinjiang Geology, 28(1): 1～15.

Duke E F. 1994. Near infrared spectra of muscovite, Tschermak substitution, and metamorphic reaction progress: implications for remote sensing. Geology, 22(7): 621～624.

Gan Fuping, Wang Runsheng, Ma Ainai. 2003. Spectral identification tree for mineral extraction based on spectral feature belt. Earth Science Frontiers, 10(2): 445～454.

Gan Fuping. 2004. Research on the basis and technology for information extraction of lithology and mineral from remote sensing. Beijing: Geological Publishing House, 1～123.

Guo Na, Guo Ke, Zhang Tingting, Liu Tinghan, Hu Bin, Wang Chongwu. 2012. Hydrothermal alteration distribution model of the Jiama(Gyama) copper-polymetallic deposit based on shortwave technique. Acta Geoscientica Sinica, 33(4): 641～653.

Harraden C L, Mcnulty B A, Gregory M J, Lang J R. 2013. Shortwave Infrared Spectral Analysis of Hydrothermal Alteration Associated with the Pebble Porphyry Copper-Gold-Molybdenum Deposit, Iliamna, Alaska. Economic Geology, 108(3): 483～494.

Heinrich C A, Bain J H C, Mernagh T P, Wyborn L A I, Andrew A S, Warning C L. 1995. Fluid and mass transfer during metabasalt alteration and copper mineralization at Mount Isa, Australia. Economic Geology, 90(4): 705～730.

Herrmann W, Blake M, Doyle M, Huston D, Kamprad J, Merry N, Pontual S. 2001. Short wavelength infrared (SWIR)

spectral analysis of hydrothermal alteration zones associated with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania, and Highway-Reward, Queensland. Economic Geology, 96(5): 939～955.

Hu Souxi. 1980. Petrography of metasomaticalteration rock. Beijing: Geological Publishing House, 1～123.

Hunt G R, Salisbury J W. 1970. Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks. Silicate minerals Mod Geol., 2: 283～300.

Hunt G R. 1977. Spectral signature of particulate minerals inthe visible and near infrared. Geophysics. 42:501～513.

Jones S, Herrmann W, Gemmell J B. 2005. Short wavelength infrared spectral characteristics of the HW horizon: implications for exploration in the Myra Falls volcanic-hosted massive sulfide camp, Vancouver Island, British Columbia, Canada. Economic Geology, 100(2): 273～ 294.

Kruse F A. 1988. Use of Airborne Imaging Spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern Grapevine Mountains, Nevada and California: Remote Sensing of Environment, 24(1): 31～ 51.

Kruse F A, Lefkoff A B, Dietz J B. 1993. Expert system-based mineral mapping in northern Death Valley, California/Nevada using the Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS). Remote Sensing of Environment, 44(2): 309～ 336.

Kruse F A, Huntington J H, Green R O. 1996. "Results from the 1995 AVIRIS Geology Group Shoot." In Proceedings, 2nd International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, I: 1～211～1～220.

Kruse F A, Boardman J W, Huntington J F. 2003. Comparison of Airborne Hyper-spectral Data and EO-1 Hyperion for Mineral Mapping. Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on, 41(6): 1388 ～1400.

Lau I C, Cudahy T, Heinson G, Mauger A J, James P R. 2003. Practical application of hyper-spectral remote sensing in regolith research. Advances in Regolith: 249～ 253.

Liang Shuneng, Gan Fuping, Yan Bokun, Wang Runsheng, Yang Suming, Zhang Zhijun. 2012. Relationship between composition and spectral Feature of muscovite. Remote Sensing for Land & Resources, 94(3): 111～115.

Liu Dechang, Ye Fawang, Zhao Yingjun, Tian Feng, Qiu Junting. 2015. Airborne hyperspectral remote sensing for gold prospecting around Liuyuan-Fangshankou area, Gansu Province, China. Journal of Geo-information Science, 17(12): 1～9

Liu Dechang, Tian Feng, Qiu Junting, Ye Fawang, Yan Bokun,, Sun Yu, Wang Zitao. 2017. Application of hyperspectral remote sensing in solid ore exploration in the LUYUAN-FANGSHANKOU area. Acta Geologica Somaca, 91(12): 2795～2812.

Liu Shengwei, Yan Bokun, Gan Fuping, Yang Suming, Wang Runsheng, Wang Qinghua. 2006. An analysis of spectral features variation of sericite and the extraction of geologic genesis information by using imaging spectroscopic technique. 68(2): 46～50.

Liu Yanjun, Jing Lifang. 1993. The remote sensing round mode of mineral information. Beijing: Geological Publishing House, 1～157.

Martinez-Alonso S, Rustad J R, Goetz A F. 2002. Ab initio quantum mechanical modeling of infrared vibrational frequencies of the OH group in dioctahedral phyllosilicates. Part I: Methods, results and comparison to experimental data: American Mineralogist, 87(8－9): 1215～1223.

Post J L, Noble P L. 1993. The near-infrared combination band frequencies of dioctohedral smectites, micas and illites. Clays and Clay Minerals, 41: 639～644.

Ren Guangli, Yang Junlu, Yang Min, Li Jianqiang, Gao Ting, Yi Huan, Han Haihui, Zhao Yingjun. 2013. Application of hyperspectral remote sensing anomaly information on metallogenic prediction in the Jintanzi-Mingjingou area of Beishan, Gansu. Geotectonica et Metallogenia, 37(4): 765～776.

Reyes A G. 1990. Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 43(1): 279～309.

Sandra Jakob, Richard Gloaguen, Carsten Laukamp. 2016. Remote Sensing-Based Exploration of Structurally-Related Mineralization around MountIsa, Queensland, Australia. remote sensing, (8): 358:1～18.

Scott K M, Yang Kai. 1997. Exploration and mining report 439R Spectral reflectance studies of white micas. Australian Mineral Industries Research Association (Melbourne), 1～35.

Sheng Ping, Sheng Yuanchao, Liu Tiebin, Pan Hongdi, Menglei, Song Guoxue, Dai Huawu. 2010. Discovery and of the copper deposit in Xiemisitai, west Junger and its significance. Xinjiang Geology,28(4): 413～418.

Sheng Ping, Pan Hongdi, SEITMURATOVA Eleonora. 2015. Characteristics of the porphyry Cu deposits in the central asia metallogenic domain. Acta Petrologica Sinica, 31(2): 315～332.

Sinclair B J. 2000. Geology and genesis of the Battle zone VHMS deposits, Myra Falls district, British. Columbia, Canada: Unpublished Ph. D. (Doctoral dissertation, thesis, Hobart, University of Tasmania).

Sun Yu, Zhao Yingjun, Li Hanbo, Lu Donghua, Tian Feng, Qin kai, Yang Guofang, Zhou Jiajing, Liu Pengfei. 2015. HySpex hypersepctral mineral mapping of Asiha gold ore district in Dulan county, Qinghai Province and its prospecting implication. Acta Geologica Somaca, 89(1):195～203.

Sun Yu, Zhao Yingjun, Qin Kai, Tian Feng. 2017. Ore-Forming Factors and Prospecting of Jade Ore Using Airborne Hyperspectral Data: Taken the Nachitai Area in Qinghai Province as an Example. 51(sup): 203～204.

Tong Xuhui, Zhang Wangsheng, Shi Zhilong, Li Yanlong. 2012. Study on the characteristics of ore-controlled structure in Baiyanghe U-Be polymetallic ore district, Xinjiang. Mineral Deposits, 31(sup): 219～220.

Thomas M, Walter M. 2002. Application of hyperspectral infrared analysis of hydrothermal alteration on Earth and Mars. Astrobiology, 2(3): 335～351.

Van Ruitenbeek F J, Cudahy T, Hale M, van der Meer F D. 2005. Tracing fluid pathways in fossil hydrothermal systems with near-infrared spectroscopy. Geology, 33(7): 597～ 600.

Van Ruitenbeek F J, Debba P, van der Meer F D, Cudahy T, van der Meijde M, Hale M. 2006. Mapping white micas and their absorption wavelengths using hyperspectral band ratios. Remote Sensing of Environmnent, 102(3): 211～222.

Van Ruitenbeek F J A, Cudahy T J, van der Meer F D, Hale M. 2012. Characterization of the hydrothermal systems associated with Archean VMS-mineralization at Panorama, Western Australia, using hyperspectral, geochemical and geothermometric data. Ore Geology Reviews, 45 (2012): 33～46.

Wang Juli, Wang Jianqi, An Fang, Yang Meng, Song Zisheng, Ling Weiwei. 2013. The First discovery of native copper in Xiemisitai area, Xinjiang. Acta Geoscientica Sinica, 34(3): 371 ～374.

Wang Juli, Wang Jianqi, Hu Yang, Tu Yian, Wang Min, Ling Weiwei. The Discovery of porphyry copper mineralization in Xiemisitai area and its significance. Acta Geoscientica Sinica, 35(3): 395～398.

Wang Mou, Wang Guo, Li Xiaofeng, Shi Zhilong, Li Yanlong, Lu Kegai. 2013. Analysis on the controlling factors of uranium polymetallic metallogenic in the South of Xuemisitan volcanic belt, Xinjiang. Xinjiang Geology, 31(1): 71～76.

Wang Runsheng, Gan Fuping, YanBbokun, Yang Suming, Wang Qinghua. 2010. Hyperspectral mineral mapping and its application. Remote Sensing For Land&Resources, 88(1): 1～12.

Wang Zhe. 2013. Study on the volcanic rock series in Xuemisitan, Xinjiang. Master's Thesis, Xinjiang University.

Wei Chunjing and Roger P. 2003. Phase relations in high-pressure metapelites in the system KFMASH (K_2O-FeO-MgO-Al_2O_3-SiO_2-H_2O) with application to natural rocks. Contrib Mineral Petrol, 145(3): 301～315.

Wei Chunjing, Zhu Wenping. 2007. Progress in the study of phengite geobarometry. Geological Bulletin of China, 26 (9): 1123～1130.

Xiu Xiaoqian, Fan Honghai, Ma Hanfeng, Yi Longsheng. 2011. The wall rock alteration and its geochemical characteristics of Baiyanghe uranium and beryllium deposit, Xinjiang. Uranium Geology, 27(4): 215～256.

Yan Bokun, Dong Xinfeng, Wang Zhe. 2016. Advances on technique of extracting mineral information from airborne hyperspectral remote sensing data and its application: A case study of survey on the west matallogenic belt. Chinese Geological Survey, 4: 55～62.

Yang Kai, Huntington JF, Boardman JW and Mason P. 1999. Mapping hydrothermal alteration in the Comstock mining district, Nevada, using simulated satellite-borne hyperspectral data. Australian Journal of Earth Sciences, 46(6): 915～922.

Yang Kai, Browne PRL, Huntington JF and Walshe JL. 2001. Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 106(1): 53～65.

Yang Kai, Lian C, Huntington JF, Peng Q and Wang Q. 2005. Infrared spectral reflectance characterization of the hydrothermal alteration at the Tuwu Cu-Au deposit, Xinjiang, China. Mineralium Deposita, 40(3): 324～336.

Yang Kai, Huntington JF, Gemmell JB and Scott KM. 2011. Variations in composition and abundance of white mica in the hydrothermal alteration system at Hellyer, Tasmania, as revealed by infrared reflectance spectroscopy. Journal of Geochemical Exploration, 108(2): 143～156.

Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, Qu Huanchun, Li Zhenqing and Liu Yunfei. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet. Mineral Deposits, 31(4): 699～717.

Ye Fawang, Liu Dechang, Zhao Yinjun. 2011. Airborne hyperspectral survey system CASI/SASI and its preliminary application in uranium exploration. World Nuclear Geoscience, 28(4): 231～236.

Ye Fawang, Zhang Jieling, Zhang Chuan, Fang Maolong. 2012. Application of airborne hyperspectral remote sensing technique to uranium prospecting: A case study of Baiyanghe area, Xingjiang. In Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing (WHISPERS), 2012 4th Workshop on (pp. 1～5). IEEE.

Ye Fawang, Wang Cun, Zhang Chuan, Liu Hongcheng, Wu Ding. 2013. Application of airborne hyperspectral remote sensing technology to uranium and polymetallic mineral exploration in Xuemisitan area, Xinjiang. Geological Review, 59(sup) 930 ～931.

Ye Fawang, Zhang Chuan, Xu Qingjun, Liu Hongcheng, Meng Shu, Wu Ding. 2015. New discovery of advanced argillic belt associated with gold mineralization in Xuemisitan area, Xinjiang using airborne hyperspectral remote sensing and its significance. Geological Review, 59(sup) 930 ～931.

Zadeh M H, Tangestani M H, Roldan F V, Yusta I. 2014. Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran. Ore Geology Reviews, 62: 191～198.

Zhao Liqing, Deng Jun, Yuan Haitao, Li Xiaoying. 2008. Shortwave lengths infrared spectral analysis of alteration zone in the Taishang gold deposit. Geology and Prospecting, 44

(5): 58～ 63.

Zhou Zhangjian. 1994. Summarizing the controlling factors andtranslation mechanism and translation mode between montmorillonite and illite. Geological Science and Technology Information, 13(4): 41～ 45.

参 考 文 献

车永飞，赵英俊，叶发旺. 2017. 基于光谱特征参量的高光谱遥感蚀变矿物提取与分析. 地质论评,63(增刊):196～197.

陈光远，孙岱生，殷辉安. 1988. 成因矿物学与找矿矿物学. 重庆：重庆出版社(第二版)，1～880.

董连慧，冯京，刘德权，唐延龄，屈迅，王克卓，杨在峰. 2010. 新疆成矿单元划分方案研究. 新疆地质，28(1)：1～15.

甘甫平，王润生，马蔼乃. 2003. 基于特征谱带的高光谱遥感矿物谱系识别. 地学前缘(中国地质大学,北京)，10(2)：445～454.

甘甫平. 2004. 遥感岩矿信息提取基础与技术方法研究. 北京：地质出版社，1～123.

郭娜,郭科,张婷婷,刘廷晗，胡斌，汪重午. 2012. 基于短波红外勘查技术的西藏甲玛铜多金属矿热液蚀变矿物分布模型研究. 地球学报，33(4)：641～ 653.

胡受奚. 1980. 交代蚀变岩岩相学. 北京：地质出版社，1～ 214.

梁树能，甘甫平，闫柏锟，王润生，杨苏明,张志军. 2012. 白云母矿物成分与光谱特征的关系研究. 国土资源遥感，94(3)：111～ 115.

刘德长，叶发旺，赵英俊，田丰，邱俊挺. 2015. 航空高光谱遥感金矿床定位模型及找矿应用——以甘肃北山方山口地区为例. 地球信息科学 17(12)：1～9.

刘德长,田丰,邱骏挺,叶发旺,闫珀琨,孙雨,王子涛. 2017. 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. 地质学报,91(12):2795～2812.

刘圣伟，闫柏琨，甘甫平，杨苏明，王润生，王青华. 2006. 绢云母的光谱特征变异分析及成像光谱地质成因信息提取. 国土资源遥感，68(2)：46～50.

刘燕君,金丽芳. 1993. 矿产信息的遥感地面模式. 北京:地质出版社,1～157.

任广利，杨军录，杨敏，李健强，高婷，易欢，韩海辉，赵英俊. 2013. 高光谱遥感异常提取在甘肃北山金滩子－明金沟地区成矿预测中的应用. 大地构造与成矿学，37(4)：765～776.

申萍，沈远超，刘铁兵，潘鸿迪，孟磊，宋国学，代华五. 2010. 西准噶尔谢米斯台铜矿的发现及其意义. 新疆地质，28(4)：413～418.

申萍，潘鸿迪，SEITMURATOVA Eleonora. 2015. 中亚成矿域斑岩铜矿床基本特征. 岩石学报，31(2)：315～332.

孙雨,赵英俊,李瀚波,陆冬华,田丰,秦凯,杨国防,周家晶,刘鹏飞. 2015. 青海省都兰县阿斯哈金矿区 HySpex 高光谱矿物填图及其找矿意义. 地质学报,89(1):195～203.

孙雨，赵英俊，秦凯，田丰. 2011. 基于航空成像高光谱数据的玉石矿找矿要素识别和找矿预测. 地质论评,63(增刊):203～204.

童旭辉，张旺生，师志龙，李彦龙. 2012. 新疆白杨河铀铍多金属矿区控矿构造特征研究. 矿床地质，31(增刊)：219～220.

王居里，王建其，安芳，杨猛，宋子升，令伟伟. 2013. 新疆谢米斯台地区首次发现自然铜矿化. 地球学报，34(3)：371 ～374.

王居里，王建其，胡洋，涂一安，王敏，令伟伟. 2014. 新疆谢米斯台地区斑岩型铜矿化的发现及其意义. 地球学报，35(3)：395～398.

王谋，王果，李晓峰，师志龙，李彦龙，鲁克改. 2013. 新疆雪米斯坦火山岩带南翼铀多金属成矿控制因素分析. 新疆地质，31(1)：71～76.

王润生，甘甫平，闫柏琨，杨苏明，王青华. 2010. 高光谱矿物填图技术与应用研究. 国土资源遥感，88(1)：1～12.

王润生,熊盛青,聂洪峰,梁树能,齐泽荣,杨金中,闫柏琨,等. 2011. 遥感地质勘查技术与应用研究.地质学报,85(11):1699～1743.

王哲. 2013. 新疆雪米斯坦火山岩系列研究. 硕士研究生学位论文，新疆大学.

魏春景，朱文萍. 2007. 多硅白云母地质压力计的研究进展. 地质通报，26(9)：1123～1130.

修晓茜，范洪海，马汉峰，衣龙升. 2011. 新疆白杨河铀铍矿床围岩蚀变及其地球化学特征. 铀矿地质，27(4)：215～256.

杨志明，侯增谦，杨竹森,曲焕春，李振清，刘云飞. 2012. 短波红外光谱技术在浅剥蚀斑岩铜矿区勘查中的应用—以西藏念村矿区为例. 矿床地质，31(4)：699 ～717.

叶发旺，刘德长，赵英俊. 2011. 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. 世界核地质科学，28(4)：231～236.

叶发旺，王存，张川，刘洪成，武鼎. 2013. 航空高光谱遥感技术在新疆雪米斯坦地区铀多金属矿产勘查中的应用研究. 地质论评，59(增刊)：930 ～931.

叶发旺，张川，徐清俊，刘洪成，孟树，武鼎. 2015. 新疆雪米斯坦地区与金矿化有关的高级泥化带航空高光谱发现及意义. 地质论评，61(增刊)：575～576.

闫柏琨,董新丰,王喆等. 2016. 航空高光谱遥感矿物信息提取技术及其应用进展——以中国西部成矿带调查为例. 中国地质调查,4：55～62.

赵利青，邓军，原海涛，李晓英. 2008. 台上金矿床蚀变带短波红外光谱研究. 地质与勘探，44(5)：58～ 63.

周张健. 1994. 蒙脱石伊利石化的控制因素、转化机制及其转化模型的研究综述. 地质科技情报，13(4)：41～ 45.

Minerageny Study of High-Al, Medium-Al- and Low-Al Sericites Identified by Airborne Hyperspectral Remote Sensing Technology

YE Fawang[1)], MENG Shu[1)], ZHANG Chuan[1)], XU Qingjun[2)], LIU Hongcheng[1)], WU Ding[1)]

1) *National Key Lab of Remote Sensing information and imagery Analysis, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing*, 100029

2) *China University of Geoscience(Beijing), Beijing*, 100083

Abstract

Researchers at both home and abroad divide mica minerals into two or three categories, which are named high-Al, medium-Al and low-Al sericites based on wavelength of spectral Al-OH absorption. Although some concern was paid on their minerageny, no systematic specific study has been carried out. With CASI/SASI airborne hyperspectral data obtained for the Xuemisitan area, and based on implementation of mineral mapping, a systematical comparison study was conducted on origins of high-Al, medium-Al and low-Al sericites. Based on field geological observation and sampling in the Xuemisitan area, this study analyzed samples of three kinds (high-Al, medium-Al and low-Al sericites) of altered rocks using hyperspectal measurement, Al-OH absorption wavelength calculation and statistics, microscope observation of thin section, X ray diffraction of bulk rock, and X ray diffraction of clay minerals. In combination with fluid metallogenic theory and minerageny, this study also analyzed their forming mechanism. The results show that high-Al sericite underwent intensive alteration and altered minerals of mica include sericite and illite, accompanied by pyrophyllite and fine-grain quartz. By contrast, low-Al sericite underwent medium alteration, and altered minerals are dominantly illite and andreattite, and more chlorite, with minor laumonite. High-Al sericite altered rocks contain relatively higher contents of quartz and clay, but relatively lower contents of K-feldspar, plagioclase and calcite than that of the low-Al series. Low-Al sericite altered rocks contain low contents of quartz and clay, but relatively high contents of plagioclase, K-feldspar and calcite. Combined with detailed mineralogy studies, this study concludes that the high-Al sericite identified by hyperspectral may form in the hydrothermal fluid environment with comparatively high temperature and slight acid and the low-Al sericite formed in fluid environment of comparatively low temperature and slight alkaline. This understanding is of great significance for application of hyperspectral mineral mapping information and interpretation of deep exploration information.

Key words: Airborne hyperspectral; high-Al sericite; medium-Al sericite; low-Al sericite; Minerageny; Xeumisitan area