

doi: 10.12029/gc20180413

侯隼鹏, 徐清俊, 叶发旺, 张川, 孟树. 2018. 新疆白杨河铀矿床钻孔岩芯蚀变分带特征及地质意义[J]. 中国地质, 45(4): 839–850.

Hou Jianpeng, Xu Qingjun, Ye Fawang, Zhang Chuan, Meng Shu. 2018. Alteration zonation of drilling cores in the Baiyanghe uranium deposit of Xinjiang and its geological implications[J]. *Geology in China*, 45(4): 839–850(in Chinese with English abstract).

新疆白杨河铀矿床钻孔岩芯蚀变分带特征 及地质意义

侯隼鹏¹ 徐清俊² 叶发旺³ 张川^{2,3} 孟树³

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国地质大学(北京)地球科学与资源学院, 北京 100083;
3. 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)

摘要: 钻孔岩芯高光谱技术是获取岩芯地学信息与研究的新方向。新疆白杨河铀矿床钻孔岩芯蚀变发育, 对其开展蚀变研究有助于对白杨河矿床深部铀矿勘探提出更好的找矿认识。本次研究利用 FieldSpec4 可见光–短波红外地面非成像光谱仪对新疆白杨河铀矿床 8 个钻孔进行光谱测试与分析, 研究发现钻孔岩芯热液蚀变矿物组合垂向上具有明显的“上低下高中过渡”的三分带特征: 即上部为低铝绢云母+少量赤铁矿与少量褐铁矿+少量蒙脱石, 中部为中铝绢云母+低铝绢云母+少量蒙脱石+少量碳酸盐、赤铁矿与褐铁矿, 下部为高铝绢云母+绿泥石+碳酸盐; 绢云母 Al–OH 吸收峰位置变化规律反映出矿床的热液活动具有深部相对高温、高压、偏酸性, 浅部相对低温、低压、偏碱性的特征。蚀变三分带特征以及热液活动特征表明白杨河铀矿床具有明显的热液成矿背景, 同时, 铀矿化总体处于三分带特征中的中部以中铝绢云母为主的蚀变带与下部以高铝绢云母为主的蚀变带之间的过渡带中, 该过渡带是铀成矿的有利部位, 同时也是可能的热液/矿化中心; 过渡带中发育赤铁矿, 中铝绢云母和高铝绢云母, 此 3 种蚀变矿物可能与铀成矿关系密切。这些可以为白杨河铀矿床深部铀矿勘探提供借鉴与参考。

关键词: 白杨河铀矿床; 钻孔岩芯; 热液蚀变矿物; 绢云母; Al–OH 吸收峰

中图分类号: P627 文献标志码: A 文章编号: 1000–3657(2018)04–0839–12

Alteration zonation of drilling cores in the Baiyanghe uranium deposit of Xinjiang and its geological implications

HOU Jianpeng¹, XU Qingjun², YE Fawang³, ZHANG Chuan^{2,3}, MENG Shu³

(1. School of Geoscience and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, Shandong, China;
2. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China, 3. National Key Laboratory of Science and Technology on Remote Sensing Information and Image Analysis, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China)

收稿日期: 2016–09–19; 改回日期: 2017–07–18

基金项目: 核工业地质局项目“铀及多金属矿产勘查高光谱遥感综合应用示范研究”(YLTY1604)资助。

作者简介: 侯隼鹏, 1984 年生, 男, 工程师, 地质资源与地质工程专业; E-mail: xiatonghai@163.com。

通讯作者: 徐清俊, 1987 年生, 男, 博士生, 构造地质学专业; E-mail: 15210964889@163.com。

Abstract: Hyperspectral technology of drilling cores, which can provide geological information of drilling core, is a new research direction. Alteration of drilling cores is developed in the Baiyanghe uranium deposit, and the study of alteration can provide better reference for deep uranium exploration. In this paper, the spectra of eight drilling cores in the Baiyanghe deposit were measured and analyzed by FieldSpec4 visible–shortwave ground–based infrared spectrometer, and the results show that the hydrothermal alteration mineral assemblage of the drilling cores has three types of obvious zonation features, which is named “the upper is high, the bottom is low and the middle is transitional”, In detail, Al–poor muscovite + a little hematite, limonite and montmorillonite assemblage is in the upper part of the drilling core, intermediate Al–content muscovite + Al–poor muscovite + a little hematite, limonite, montmorillonite and carbonate assemblage is in the middle, Al–rich muscovite + chlorite and carbonate assemblage is at the bottom. The varieties of muscovite’s Al–OH absorption peak reflect the hydrothermal activities of the deposit, whose feature is that the relatively higher temperature, higher pressure and more acidic hydrothermal fluid is in the depth, and things are just the opposite in the upper part. The characteristics of three types of zonation and hydrothermal activities show that the Baiyanghe uranium deposit probably has obvious hydrothermal ore–forming background and uranium mineralization is located in the transition zone, which may be a favorable site for uranium mineralization and possible hydrothermal/ mineralization centers. The transition zone develops hematite, intermediate Al–content muscovite, and Al–rich muscovite, which may be closely related to uranium mineralization. These data can provide reference and information for the deeper exploration.

Key words: Baiyanghe uranium deposit; drilling cores; hydrothermal alteration minerals; muscovite; Al–OH absorption peak

About the first author: HOU Jianpeng, male, born in 1985, engineer, majors in geological resources and geological engineering; E–mail: xiatonghai@163.com.

About the corresponding author: XU Qingjun, male, born in 1987, doctor candidate, majors in structural geology; E–mail: 15210964889@163.com.

Fund support: Supported by Comprehensive application study of hyperspectral remote sensing for uranium and multi–metal ore exploration (No. YLTY1604).

1 引 言

高光谱遥感技术相比于传统的地质找矿、物化探找矿方法,在热液蚀变识别,快速圈定找矿有利区方面具有明显的独到的优势,可为后期深入的地质勘查工作和找矿突破提供重要的找矿线索和找矿有利区(杜小弟等, 2015)。近年来,一些地面非成像、便携式光谱仪也越来越多地应用于矿床尺度的热液蚀变规律研究,为矿区深部和外围找矿服务。澳洲的PIMA开启了高光谱短波红外谱段应用的先河,随即出现的美国ASD可见光–短波红外光谱仪,也广泛应用于野外高光谱测试与分析。

国外非常重视利用地面高光谱测量技术开展蚀变矿物识别、蚀变矿物填图、以及热液蚀变空间分布特征分析等研究,以便为矿产勘查提供有意义和重要的热液蚀变信息(Kruse, 1994; Anthony et al., 2000; Frank et al., 2012)。随着高光谱仪器的不断发展,高光谱测量也从早期的野外露头测样发展到后期的钻孔测样。澳大利亚联邦科学与工业化组织(CSIRO)研制的Hylogging、HyChips等系列钻

孔岩芯、岩矿样品高光谱测量系统,在南澳、西澳、北领地等重要铀矿勘查区得到了广泛应用,其光谱探测范围由可见光–短波红外(0.4~2.5 μm)已延伸至热红外区间(8~12 μm),编制的三维高光谱热液蚀变矿物分布图件为铀成矿模式、铀成矿规律研究提供了重要信息,另外德国的MSCL多传感器岩芯综合编录系统也已经应用于深部找矿研究中(张杰林, 2013)。在国内,科研工作者也利用地面高光谱遥感测量技术进行过很多的地质应用研究,涉及到矿物填图、蚀变组合研究、成矿预测、成矿流体特征反演等方面(章革等, 2005; 赵利青等, 2008; 杨志明等, 2008; 代晶晶等, 2013; 张川等, 2017; Xu et al., 2017a)。然而,钻孔岩芯高光谱技术仍然处于起步阶段,只在少部分矿床钻孔岩芯中有所应用与体现(郭娜等, 2012; Xu et al., 2017b),并且对某些特定的蚀变矿物研究不够精细与深入,比如绢云母。

为了从三维立体上了解白杨河铀矿床蚀变分带特征,本文基于前人的研究基础,使用美国生产的FieldSpec4可见光–短波红外地面非成像光谱仪对白杨河铀矿床8个钻孔岩芯进行光谱测量与分

析,并结合地质背景资料综合分析,找寻与铀成矿关系密切的标志性蚀变矿物,对今后在白杨河铀矿床深部开展高光谱遥感探矿研究具有参考和借鉴意义。

2 白杨河铀矿床地质概况

新疆白杨河铀矿床位于雪米斯坦地区的东缘,大地构造上属于准噶尔盆地西北缘雪米斯坦复式岛弧带(董连慧等, 2010, 2013)。该区发育众多铀矿点和矿床,包括马门特铀矿点、十月工区铀矿点、七一工区铀矿点、雪米斯坦铀矿点、白杨河铀矿床等(图1)。该区域的构造类型复杂,断裂构造极其发育,构造岩浆演化经历多旋回、多阶段的过程(尹继元等, 2013; 王谋等, 2013; 马学平等, 2015)。

矿区出露的地层包括泥盆系陆相火山碎屑岩,石炭系海相沉积碎屑岩夹安山玢岩,浅海相、海陆交互相中基性火山岩、中酸性火山岩及火山碎屑岩,二叠系花岗斑岩,凝灰岩互层(王谋等, 2012)。花岗斑岩内穿插辉绿岩、闪长玢岩、辉石闪长岩等;侵入岩主要为早二叠世花岗斑岩,其内穿插辉绿岩、闪长玢岩、辉石闪长岩,花岗斑岩空间展布严格受查干陶勒盖—巴音布拉克深大断裂控制,由杨庄岩体、阿苏达岩体、小白杨河岩体组成(王谋等, 2012; 张鑫等, 2013)(图2)。

最早发现的铀矿化主要位于杨庄岩体东段的北缘接触带附近,品位相对较低。近些年新发现的铀矿化主要位于杨庄岩体中西段的岩体中部,品位相对较高。铀矿化平面展布方面大致有两个趋势,一

是靠近矿区北缘的铀矿化主要呈近东西向展布,另一是位于矿区中部的铀矿化主要呈北西走向展布;二者总体上呈现出“入”字形(据核工业216队)(图3a)。铀矿化垂向上则位于晚二叠世微晶花岗岩斑岩与晚泥盆世塔尔巴哈台组中酸性火山岩的断裂带接触部位(图3b)。

3 数据采集与蚀变矿物识别

3.1 工作方法

本次使用的高光谱测量仪器为美国的FieldSpec4可见光—短波红外地面光谱仪,探测波谱范围为350~2500 nm,光谱分辨率在350~1050 nm为3 nm, 1050~2500 nm为10 nm,可用于识别含羟基的硅酸盐矿物、硫酸盐矿物和碳酸盐矿物以及赤铁矿化、褐铁矿化等信息等(Duke and Lewis, 2010)。

数据获取后,首先利用ViewSpecpro软件对光谱反射率曲线数据进行格式转换,形成以.txt为后缀文件;然后利用ENVI软件平台,将所有光谱曲线数据建立成光谱库;最后参考光谱库(USGS),对各条曲线逐条进行光谱特征分析和矿物识别,并结合光谱地质师软件(TSG)与目视解译分析数据,数据处理流程如图4。

3.2 钻孔岩芯高光谱数据采集

本次工作对白杨河铀矿床8个钻孔岩芯进行了FieldSpec4地面光谱的接触式测量和光谱特征分析,同时对8个钻孔开展了整孔的伽马能谱测量。光谱测量采用内置光源的接触式测量方式,光谱测

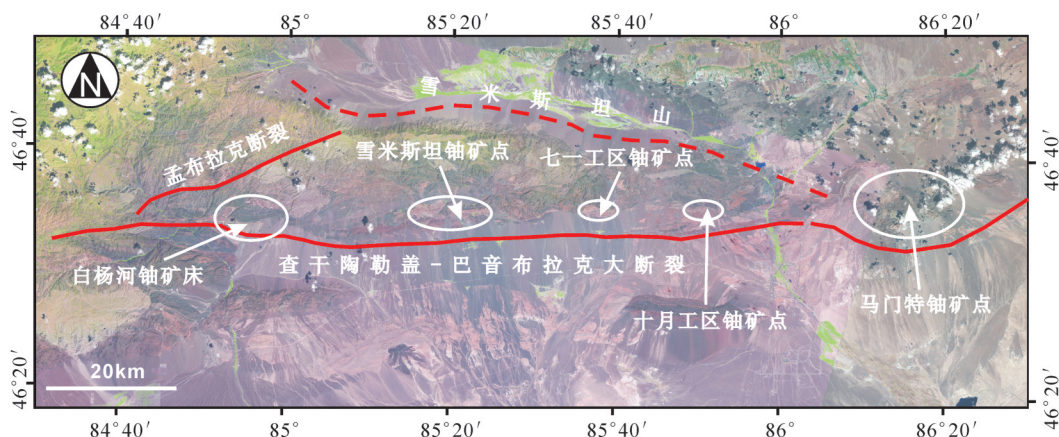


图1 雪米斯坦东缘白杨河矿床位置图

Fig.1 Geological map of the Baiyanghe uranium deposit

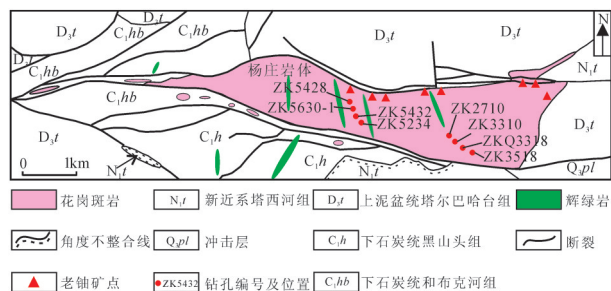


图2 白杨河铀矿床地质简图(据张鑫等修改,2013)
Fig.2 Geological map of the Baiyanghe uranium deposit
(modified after Zhang et al, 2013)

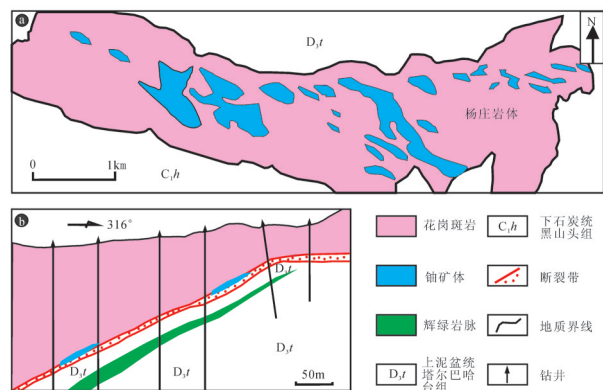


图3 白杨河铀矿床矿体平面分布图(a)及矿体垂向剖面上分布图(b)(据核工业216队)

Fig.3 Planar distribution of the uranium orebody in the Baiyanghe uranium deposit (a) and uranium orebody's position in a geological cross section (b) (modified after No. 216 Geological Party)

量点距约为30 cm,蚀变强烈地段加密测量,其间距约为10 cm,每个测点记录曲线2条。测量的8个钻孔分布见图2,它们分别是位于矿区中西部的ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428和位于矿区东部的ZK3310、ZK2710、ZKQ3318、ZK3518总共测取13582条光谱,就当前铀矿勘查程度来看,矿区中西部的铀矿化好于东部。

位于矿床中西部的4个钻孔中铀矿化发育,且处于南北向大辉绿岩脉与闪长岩脉之间并发育许多小辉绿岩脉的区域,ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428 4个钻孔均处于当前发现比较好的一处铀矿体之中或边缘。其中,ZK5432与ZK5630-1是矿化很好的工业孔,钻孔中能谱测量U含量最高达 9319×10^{-6} ,ZK5428为异常孔,ZK5234为无矿孔;位于矿床东部的4个钻孔的分布地段地

表可见的辉绿岩脉明显变少;同时,铀矿体也比前述中西部少且小。ZK3310、ZK2710、ZKQ3318、ZK3518等4个钻孔分布在不同的小矿化体或铀异常中或边缘。根据实测结果,ZK3310为异常孔,ZK3518、ZK2710、ZKQ3318为无矿孔。

3.3 蚀变矿物识别

本次工作在白杨河铀矿床钻孔岩芯中共识别出赤铁矿、褐铁矿、高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母、碳酸盐、绿泥石等8种比较单一的蚀变矿物,以及一些具有多种矿物组合的混合矿物,上述8种单一蚀变矿物曲线如图5所示。

绢云母(主要指矿物学意义上的白云母和伊利石)是高光谱填图结果中最为普遍的一类矿物。前人对于绢云母的研究表明:绢云母在2200 nm附近的吸收峰位置与绢云母中的 Al^IV 含量呈负相关关系,学者们依据绢云母在2200 nm附近的吸收峰位置将绢云母分为高铝绢云母和低铝绢云母,即分别为短波绢云母和长波绢云母,具体划分标准随着研究区地质条件的不同而具有细微的差别(Yang et al., 2001; Carsten, 2011;叶发旺等, 2018)。利用高光谱识别云母类矿物时,到底分为三类还是两类,与使用光谱仪的光谱分辨率和具体地区云母类矿物出现的 $Al-OH$ 光谱吸收波长的最大与最小的值密切相关,当然也与具体研究区的认识相关。因此,识别和使用高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母等矿物进行地质分析和找矿应用时,要从具体地区的具体情况出发进行分析。

在本次研究的白杨河地区,通过对白杨河铀矿床钻孔岩芯FieldSpec4光谱实测及分析发现,以2203 nm作为划分高铝绢云母和中铝绢云母的界限,2213 nm作为划分中铝绢云母和低铝绢云母的界限比较合适。根据研究区的实际情况,将高铝绢云母、中铝绢云母、低铝绢云母以及其他5种蚀变矿物的光谱特征总结如表1。

4 钻孔岩芯蚀变特征分析

通过对所测8个钻孔的光谱分析与矿物识别,可知绢云母是钻孔岩芯中最发育的蚀变矿物,几乎贯穿整个钻孔,其他蚀变矿物相对较发育,在钻孔中局部分布。通过统计分析可以对8个钻孔ZK5630-1、ZK5432、ZK5234、ZK5428、ZK3310、

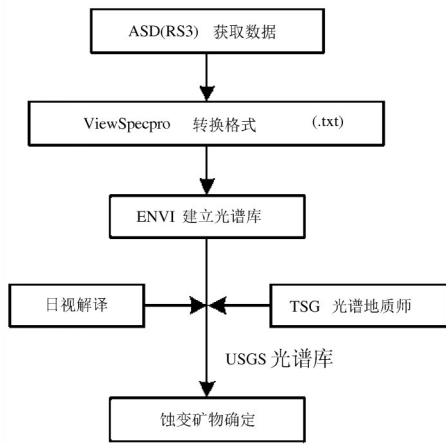


图4 钻孔岩芯光谱数据处理流程图
Fig.4 The flowchart of drilling core hyperspectral data processing

ZK2710、ZK3518、ZKQ3318 进行垂向上的蚀变矿物编录与分析。

钻孔 ZK5630-1 深度约为 390.13 m, 是很好的工业孔, 钻孔从地表至深部, 发育的地层为: (1) 第四系, 主要为花岗斑岩的残、坡积物及黏土; (2) 侵入岩: 主要为早二叠世超浅成侵入岩, 岩性为花岗斑岩, 岩石中石英、长石分布不均匀, 变化较大, 且局部受节理、裂隙影响发生碎裂, 岩石整体较完整,

局部破碎, 节理、裂隙较为发育, 蚀变普遍发育褐铁矿化、锰矿化、水云母化、绿泥石化, 在接触带部位发育萤石化、赤铁矿化; (3) 上泥盆统塔尔巴哈台组火山碎屑沉积岩, 岩性主要为灰黑色凝灰质泥岩、灰绿色凝灰质砂岩及闪长岩, 岩石整体完整, 局部破碎, 裂隙发育, 蚀变为碳酸盐化、绿泥石化、褐铁矿化等。钻孔中构造主要表现为裂隙, 张性次级构造, 在 335~342 m 处发育一条构造破碎带, 其中充填有凝灰质砂岩角砾及构造黏土(据核工业 216 队提供的 2015 年钻井柱状图及地质图)。

从钻孔 ZK5630-1 野外能谱测量中可知: 从 0~90 m, U 的含量均低于 10×10^{-6} ; 90~150 m, U 值含量在 $10 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6}$; 150~300 m, U 含量低于 10×10^{-6} ; 从 300~350 m, U 值含量从 10×10^{-6} 成增大趋势, 到最高值 2175×10^{-6} , 然后递减到 10×10^{-6} , 本钻孔矿化段位于 308~335 m 之间, U 值也处于高值; 350 m 深度以下部位, U 值均低于 10×10^{-6} 。

钻孔 ZK5630-1 蚀变分布情况为: 0~210 m, 发育的蚀变矿物主要为低铝绢云母, 蒙脱石、赤铁矿与褐铁矿相对较少, 低铝绢云母特征吸收波长位于 2213~2220 nm 之间; 210~300 m, 蚀变矿物主要为中铝绢云母、低铝绢云母、以及少量蒙脱石, 其中, 中铝绢云母波长范围在 2203~2212 nm 之间, 低铝绢云

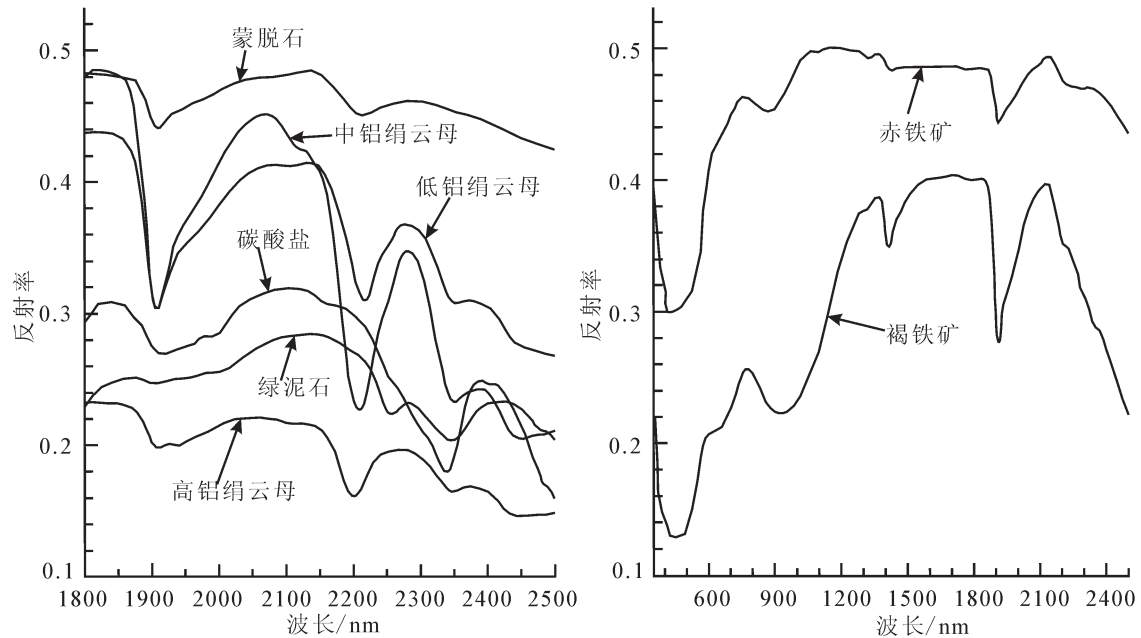


图5 8种蚀变矿物光谱曲线图
Fig.5 The spectral curves of eight kinds of altered minerals

表 1 8种蚀变矿物特征吸收峰位
Table 1 The absorption features of eight kinds of altered minerals

蚀变矿物	光谱特征吸收峰位置
高铝绢云母	219~2202 nm, 2345 nm 次级吸收
中铝绢云母	2203~2212 nm, 2345 nm 次级吸收
低铝绢云母	2213~2220 nm, 2345 nm 次级吸收
蒙脱石	2200 nm 附近
绿泥石	2250~2260 nm, 2340~2350 nm
碳酸盐	2320~2340 nm
赤铁矿	870 nm 附近
褐铁矿	950 nm 附近

母波长则大于 2213 nm; 300~340 m, 此段发育多种蚀变矿物, 其中高铝绢云母、中铝绢云母、绿泥石与赤铁矿较为发育, 而低铝绢云母与碳酸盐则相对较少, 高铝绢云母波长均小于 2203 nm, 碳酸盐多以方解石脉形式穿插于岩芯上(图 6a), 在 324.40~336.60 m 发现铀矿化段, 厚度为 12.20 m, 位于接触带附近的岩体与火山岩地层中, 肉眼可见萤石化、次生铀矿物、赤铁矿等。矿化段中发育规模较好的次生铀矿物, 呈黄色产出, 大部分发育于节理裂隙中, 局部次生铀矿物与赤铁矿化等共生(图 6b)。局部沿裂隙面发育萤石化、赤铁矿化及次生铀矿物, 形成混合蚀变。340~390.13 m, 蚀变矿物主要为绿泥石与高铝绢云母, 同时也发育少量的中铝绢云母与碳酸盐, 此段绿泥石与高铝绢云母的混合较为复杂, 高铝绢云母特征吸收峰波长范围在 2195~2202 nm。

将蚀变矿物类型、U 值含量变化、蚀变强度(蚀变矿物频数/N, 利用 Origin 9.1 统计得出)、以及绢云母蚀变矿物 Al-OH 特征峰吸收波长等信息进行统计, 就可以获得钻孔岩芯高光谱蚀变矿物综合信息图(图 7)。

根据图 7 以及上述描述与分析, 可以对钻孔 ZK5630-1 岩芯蚀变矿物划分组合: 即 0~210 m, 蚀变矿物组合主要有: 低铝绢云母+中铝绢云母(少量赤铁矿+少量褐铁矿+少量蒙脱石); 210~320 m, 蚀变矿物组合主要为中铝绢云母+绿泥石+赤铁矿+少量碳酸盐的组合, 320 m 之后, 蚀变矿物组合为高铝绢云母+中铝绢云母+绿泥石+少量碳酸盐的组合。铀矿化异常段位于 308~335 m, 发育高铝绢云母+中

铝绢云母+绿泥石+赤铁矿化的组合。钻孔 ZK5630-1 的绢云母 Al-OH 特征吸收峰波长位置随深度变化情况为: 自地表至深部, 整个钻孔绢云母蚀变 Al-OH 光谱吸收峰波长位置总体具有先逐渐降低后增高的趋势, 且这种趋势跨越了上部花岗斑岩与下伏凝灰质岩体的界线(340 m 附近), 即 0~370 m, Al-OH 吸收峰的位置总体由 2215 nm 附近减少到 2195 nm, 370~390 m, 又从 2195 nm 略有增加到 2205 nm 附近。

钻孔 ZK5432 位于 ZK5630-1 东南部大约 50 m 处, 其深度约为 390 m, 也是很好的工业孔, 钻孔从浅部至深部主要由花岗斑岩变为致密的凝灰质岩段, 在两类不同岩性的接触部位有一个 4~5 m 的破碎带, 矿化段有两处, 一处是主要的矿化段 330~345 m, U 含量开始由 20×10^{-6} 上升至最高为 9319×10^{-6} , 高于 500×10^{-6} 的矿化段位于 330~341 m。另一处为次要矿化段为 378~390 m, 此地段总体 U 含量较高, 为 20×10^{-6} ~ 600×10^{-6} , 在 381~383 m 出现了次级矿化段, 最高为 534×10^{-6} 。ZK5432 蚀变矿物组合与绢云母蚀变 Al-OH 光谱吸收峰波长位置变化规律与前述钻孔 ZK5630-1 相似。

钻孔 ZK5428 深度约为 319.12 m, 与钻孔 ZK5432 与 ZK5630-1 距离较近, 大约 50 m 处, 铀异常段为 246~255 m, 辉绿岩脉位于 116~176 m。钻孔 ZK5234 未见矿化, 但蚀变较为发育。钻孔 ZK5234 位于 ZK5432 东南部百米左右处, 钻孔深度为 400.35 m, U 值较低。钻孔 ZK5428 与钻孔 ZK5234 蚀变矿物组合与绢云母蚀变 Al-OH 光谱吸收峰波长位置变化规律与前述两个钻孔类似。钻孔 ZK3310、ZK2710、ZKQ3318 与 ZK3518 均分布于矿区的东部, 总体矿化很弱, 其蚀变矿物组合与绢云母蚀变 Al-OH 光谱吸收峰波长位置变化规律与前述 4 个钻孔类似, 只是在钻孔 ZK3310、ZK2710 中 Al-OH 光谱吸收峰波长在钻孔最底部出现了明显的增大的趋势, 即由短波向长波方向的变化趋势, 呈现出明显的“V”字形特征。

综合上述蚀变矿物组合垂向上的变化特征和绢云母 Al-OH 吸收峰位置的变化特征, 可以发现 8 个钻孔 ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428、ZK3310、ZK2710、ZKQ3318 以及 ZK3518 蚀变矿物组合垂上的变化具有“三分带”的规律, 即上部为以

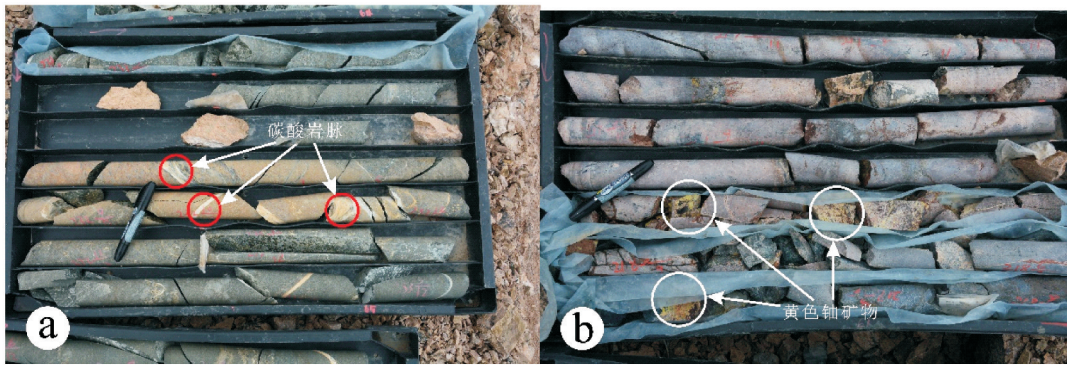


图6 钻孔ZK5630-1碳酸盐脉照片(a)和ZK5630-1矿化段岩芯(b)照片

Fig.6 The photo of carbonate in drilling core ZK5630-1 (a) and the photo of mineralization segment in drilling core ZK5630-1(b)

低铝绢云母为主,加少量赤铁矿与蒙脱石的蚀变带,中部为以中铝绢云母、低铝绢云母为主的蚀变带,下部为以高铝绢云母、绿泥石以及两者混合物

为主的蚀变带(图8);如果仅从绢云母蚀变来看,这个三分带进一步可简化为“上低下高中过渡”的规律,即上部为低铝绢云母、底部为高铝绢云母,中部

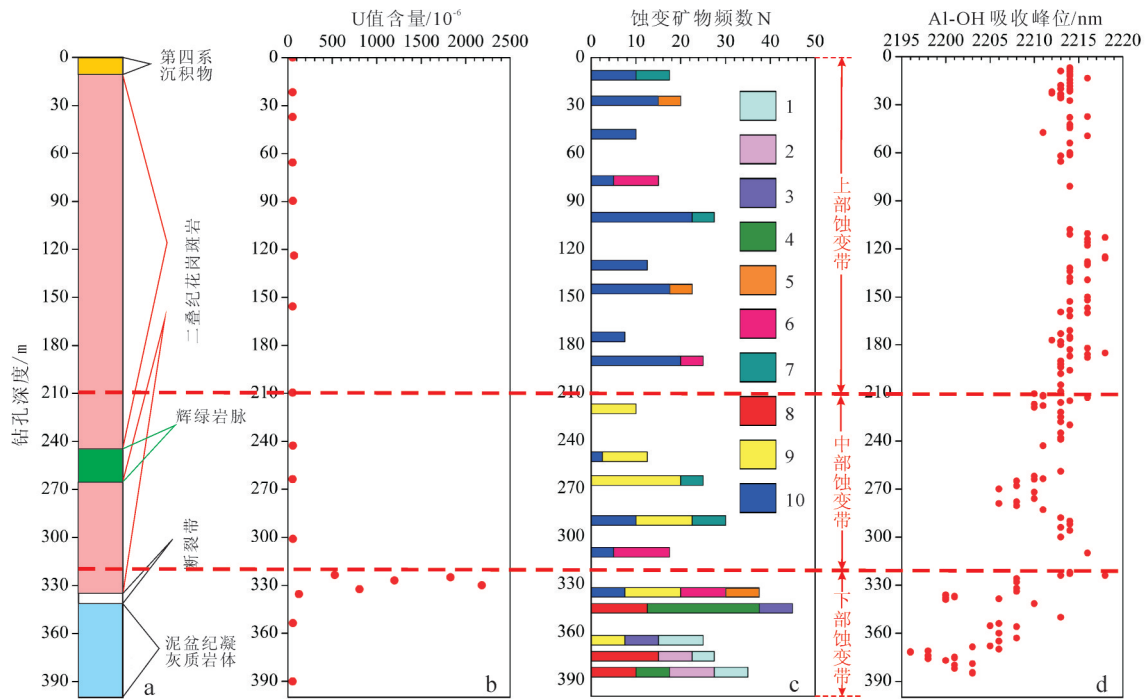


图7 钻孔ZK5630-1综合编录图

a—钻孔ZK5630-1柱状简图(左边数字代表深度); b—钻孔U值含量变化图(左侧数字代表钻孔深度,顶部数字代表U值); c—钻孔蚀变编录图(左侧数字代表钻孔深度,顶部数字代表蚀变矿物含量); d—钻孔Al-OH吸收峰位变化图。1—高铝绢云母;2—低铝绢云母;3—中铝绢云母;4—蒙脱石;5—赤铁矿;6—褐铁矿;7—绿泥石;8—碳酸盐;9—绿泥石为主+绢云母;10—绢云母为主+绿泥石

Fig.7 Comprehensive logging chart of drilling hole ZK5630-1

a— Geological sketch map of drilling hole ZK5630-1 (the numbers on the left are the depths of the drill hole);.b— Map of the measured U content (10⁻⁶) in the drilling core (the numbers at the top are the U values, and the numbers on the left are the depths of the drill hole); c—Vertical distribution log of the alteration minerals in the drilling core and the variations in their intensities (the numbers at the top are the numbers of identified alteration minerals) with depth; d—Diagram of the changes in the Al-OH absorption-peak of drill hole

1—Al-rich muscovite, 2—Al-poor muscovite, 3—Intermediate Al-content muscovite, 4—Montmorillonite, 5—Hematite, 6—Limonite, 7—Chlorite, 8—Carbonate, 9—Chlorite+ muscovite (a little), 10—Muscovite+ chlorite (a little)

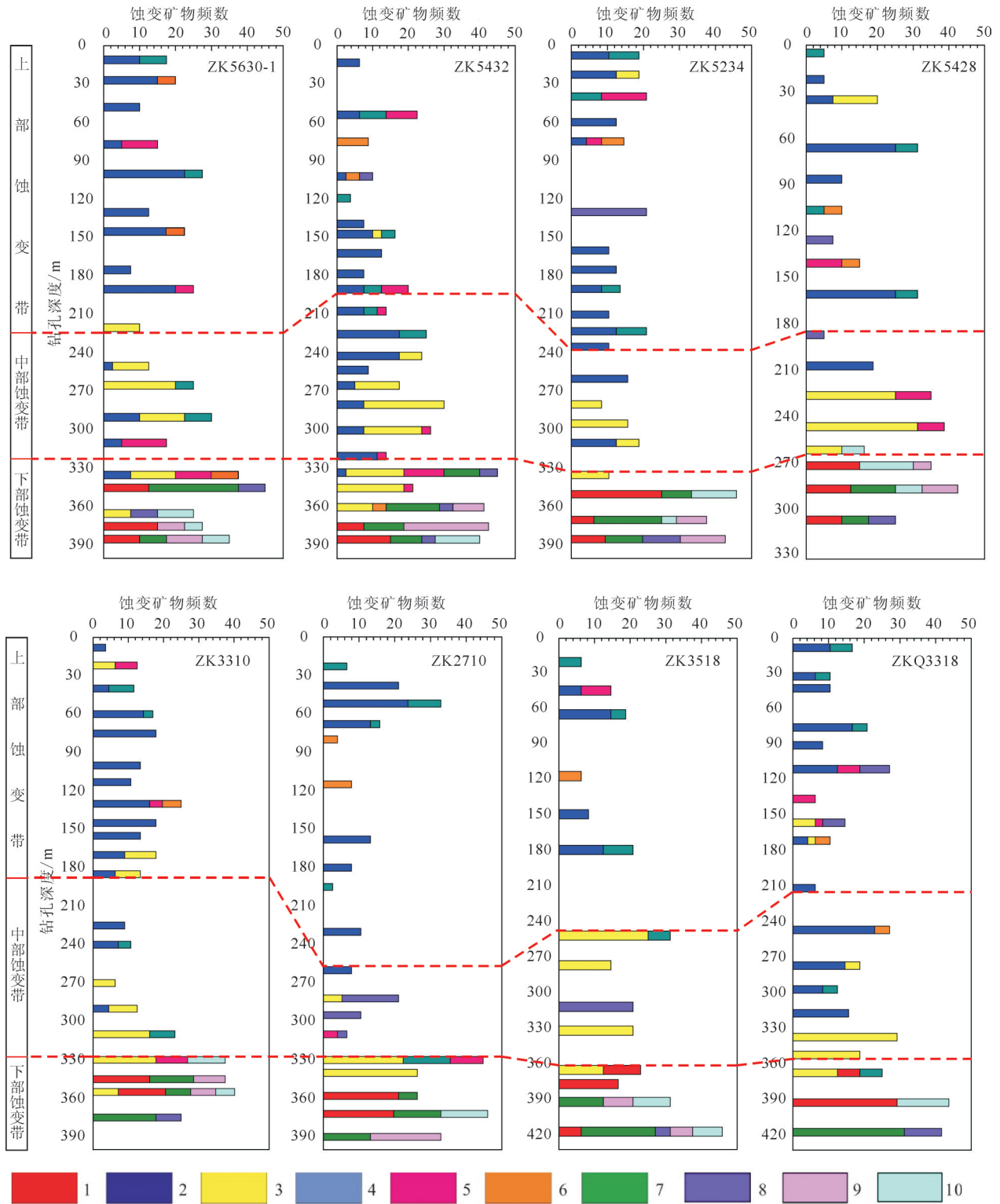


图8 8个钻孔蚀变矿物编录图

1—高铝绢云母;2—低铝绢云母;3—中铝绢云母;4—蒙脱石;5—赤铁矿;6—褐铁矿;7—绿泥石;8—碳酸盐;9—绿泥石为主+绢云母;10—绢云母为主+绿泥石

Fig.8 Altered minerals logging diagram of eight drill holes

1—Al-rich muscovite;2—Al-poor muscovite;3—Intermediate Al-content muscovite;4—Montmorillonite;5—Hematite;6—Limonite;7—Chlorite;8—Carbonate;9—Chlorite+ muscovite (a little);10—Muscovite+ chlorite (a little)

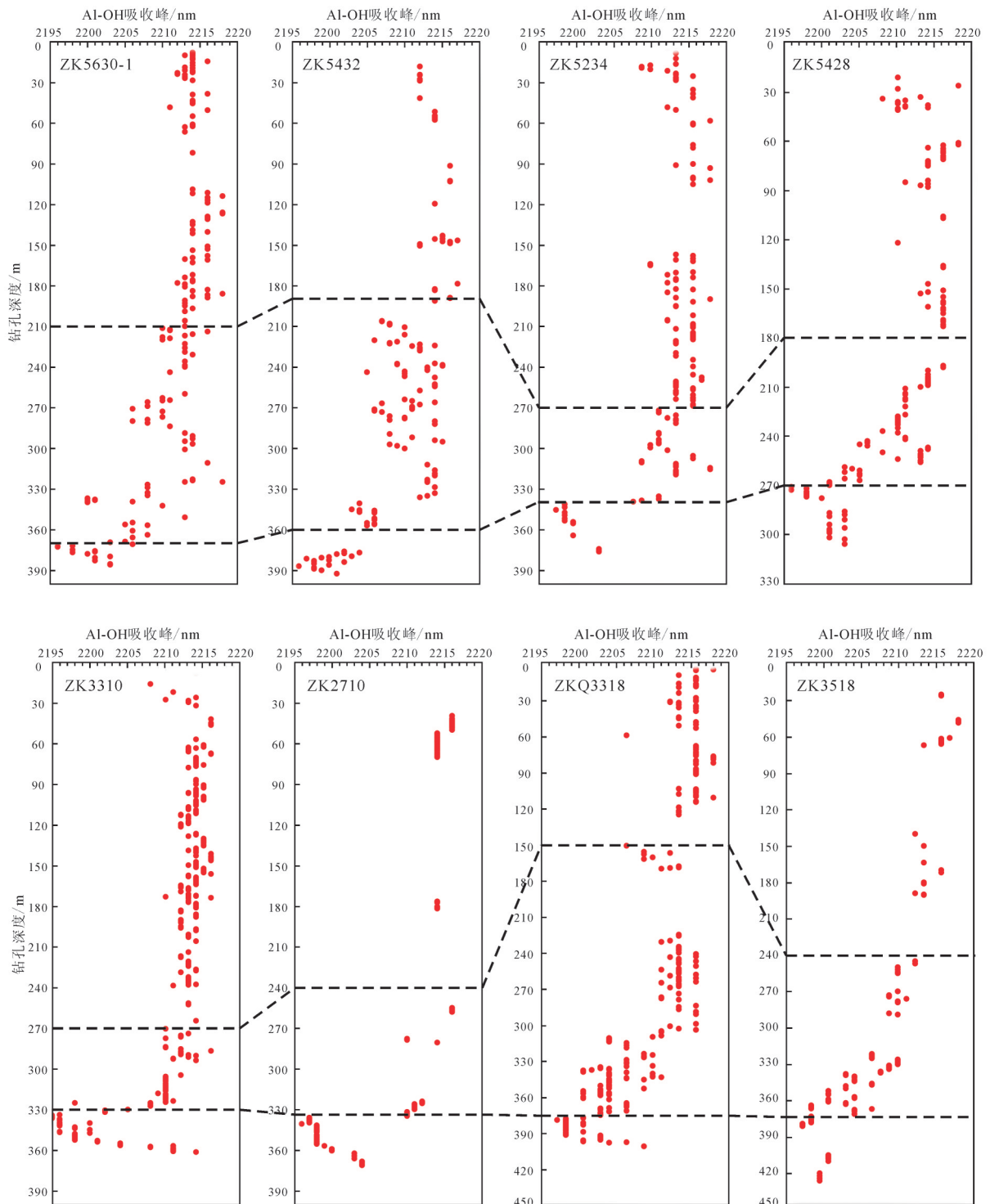


图9 绢云母Al-OH吸收峰位变化图

Fig.9 Variation of wavelength position of the muscovite's Al-OH absorption peak

以中铝绢云母和低铝绢云母为主,且含有少量高铝绢云母,可称为过渡带(图9),但在不同钻孔中分带的界线和厚度不尽相同。

5 讨 论

国内外有关研究表明,在弱蚀变或未蚀变情况下,绢云母矿物的Al-OH光谱吸收峰波长位置受原岩的岩性影响较大,短波(高铝)绢云母更易形于酸性岩中,而长波(低铝)绢云母则更易形成于基性、中基性岩中(Herrmann et al., 2001; Sun et al., 2001; 叶发旺等, 2018)。在ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428、ZK3310、ZK2710、ZKQ3318、ZK3518中,钻孔接触带上部为花岗斑岩,下部为凝灰质岩石,如果岩性为主要控制因素,则绢云母矿物的Al-OH吸收峰波长应该是底部为长波(低铝),上部为短波(高铝),即“上低下高中过渡”的特点。然而,受岩性影响形成的这一特点与ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428、ZK3310、ZK2710、ZKQ3318、ZK3518实测反映出来的“上低下高中过渡”的规律正好相反。所以,ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428、ZK3310、ZK2710、ZKQ3318、ZK3518钻孔岩芯高光谱反映出来的“上低下高中过渡”的蚀变规律主要是深部热液活动的结果,而受岩性变化的影响较小。同时,铀矿化总体处于前述的“上低下高中过渡”三分带特征中的中部,以中铝绢云母为主的蚀变带与下部以高铝绢云母为主的蚀变带之间的过渡带中。

绢云母Al-OH吸收峰波长变化是受其六次配位铝含量决定的。由于绢云母六次配位铝含量的变化常常是地质学上组分相互替代造成的,随着六次配位铝含量增高,2200 nm附近的吸收谱带逐渐向短波方向移动,随着Na替代K,2200 nm附近的吸收谱带逐渐向短波方向轻微移动,反之则向长波方向(梁树能等, 2012; 叶发旺等, 2018)。同时,组分替代过程又常常与温度、压力及流体酸碱性相关,且处于同一热液蚀变系统中高铝绢云母蚀变形成于相对更高温度、更大压力和偏酸性的流体条件,低铝绢云母蚀变形成于相对更低温度、更小压力和偏碱性的流体条件。据此,可以初步判定形成钻孔ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428、ZK3310、ZK2710、ZKQ3318、ZK3518蚀变分带特征的热液活

动具有“深部相对高温、偏酸性,浅部相对低温偏碱性”的特征,且热液活动方式有两种:一是热液从深部直接向上切穿接触带,持续向浅部活动和变化,具有这种特征的钻孔有ZK5432、ZK5630-1、ZK5234、ZK5428、ZKQ3318与ZK3518;二是热液不是直接来源于深部,而是沿着接触带通道横向运移而来的,然后分别向上下流动和变化,具有这种特征的钻孔为ZK3310与ZK2710;这些特征表明白杨河铀矿床经历了多期的热液活动。

热液蚀变矿物分带特征说明白杨河铀矿床具有明显的热液成矿背景,成矿热液来自地下深处。三分带特征中的中部以中铝绢云母为主的蚀变带与下部以高铝绢云母为主的蚀变带之间的过渡带中,该过渡带是铀成矿的有利部位,同时也是可能的热液/矿化中心,同时过渡带中发育蚀变矿物中铝绢云母、高铝绢云母、以及赤铁矿,这三种蚀变矿物可能与铀成矿关系密切,这些可以为白杨河矿床深部铀矿勘探提供参考与借鉴。

6 结 论

本文利用FieldSpec4地面光谱仪对新疆白杨河铀矿床钻孔岩芯高光谱遥感蚀变信息进行了探索与研究,得出以下结论:

(1)白杨河矿床深部钻孔岩芯高光谱蚀变特征明显,蚀变矿物发育多样,组合丰富,且蚀变组合具有明显“三分带”特征,即上部为低铝绢云母+少量赤铁矿与少量褐铁矿+少量蒙脱石,中部为中铝绢云母+低铝绢云母+少量蒙脱石+少量碳酸盐、赤铁矿、褐铁矿,底部为高铝绢云母+绿泥石+碳酸盐,反映出明显的热液活动特征。

(2)白杨河铀矿床钻孔岩芯蚀变分带特征的热液活动具有“深部相对高温、高压、偏酸性,浅部相对低温、低压、偏碱性”的特征,且热液活动方式有两种:一是热液从深部直接向上切穿接触带,持续向浅部活动和变化;二是热液不是直接来源于深部,而是沿着接触带通道横向运移而来的,然后分别向上下流动和变化;而且白杨河铀矿床经历了多期的热液活动。

(3)铀矿化总体处于“上低下高中过渡”三分带特征中的中部以中铝绢云母为主的蚀变带与下部以高铝绢云母为主的蚀变带之间的过渡带中,该过

渡带是铀成矿的有利部位,同时也是可能的热液/矿化中心,同时过渡带中发育蚀变矿物中铝绢云母、高铝绢云母、以及赤铁矿,这三种蚀变矿物可能与铀成矿关系密切,这些可以为白杨河矿床深部铀矿勘探提供参考与借鉴。

致谢:感谢核工业216队张雷提供钻孔岩芯以及野外的帮助与支持,感谢张谦硕士在钻孔岩芯高光谱数据采集过程的帮助,感谢审稿专家和编辑老师提出的修改与意见。

References

- Anthony E, Williams J, Iain M, Samson, Gema R, Olivo. 2000. The Genesis of hydrothermal fluorite-REE deposits in the Gallinas Mountains, New Mexico [J]. *Economic Geology*, 95(2000): 327-342.
- Carsten L. 2011. Short Wave Infrared Functional Groups of Rock forming Minerals [J]. *CSIRO Earth Science and Resource Engineering, Kensington*, 1-14.
- Dai Jingjing, Wang Ruijiang, Qu Xiaobo, Xin Hongbo. 2013. Application of TerraSpec spectrometer to the study of alteration information in the Duobuza porphyry copper deposit of Tibet [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 25(1): 105-109 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lianhui, Feng Jing, Liu Dequan, Tang Yanling, Qu Xun, Wang Kezhao, Yang Zaifeng. 2010. Research for Classification of Metallogenic Unit of Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 28(1):1-15 (in Chinese with English abstract).
- Dong Lianhui, Wang Kezhao, Zhu Zhixin, Zhao Tongyang, Xu Shiqi, Zheng Jiaying. 2013. The relationship between the characteristics of the large-scale deformation structure and the metallogenic processes in Xinjiang [J]. *Geology in China*, 40(5): 1552-1568 (in Chinese with English abstract).
- Du Xiaodi, Tang Yue, Liu Dechang, Li Zhao, Wang Haida. 2015. The application of aerial hyperspectral technology to the geological survey for oil and gas in the East Junggar Basin [J]. *Geology in China*, 42(1): 275-287 (in Chinese with English abstract).
- Duke E F, Lewis R D S. 2010. Near infrared spectra of white mica in the Belt Supergroup and implications for metamorphism [J]. *American Mineralogist*, 95(7): 908-920.
- Frank J A, van Ruitenbeek, Thomas J, Cudahy, Freek D van der Meer, Martin H. 2012. Characterization of the hydrothermal systems associated with Archean VMS—mineralization at Panorama, Western Australia, using hyperspectral, geochemical and geothermometric data [J]. *Ore Geology Reviews*, 33-46.
- Guo Na, Guo Ke, Zhang Tingting, Liu Tinghan, Hu Bin, Wang Zhongwu. 2012. Hydrothermal alteration distribution model of the Jiama (Gyama) copper-polymetallic deposit based on shortwave technique [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 33(4): 641-653 (in Chinese with English abstract).
- Herrmann W, Blake M, Doyle M, Huston D, Kamprad J, Merry N, Pontual S. 2001. Short wave length infrared (SWIR) spectral analysis of hydrothermal alteration zones associate with base metal sulfide deposits at Rosebery and Western Tharsis, Tasmania and Highway-Reward, Queensland [J]. *Economic Geology*, 74: 1613-1629.
- Kruse F A. 1994. Use of Airborne Imaging Spectrometer Data to Map Minerals Associated with Hydrothermally Altered Rocks in the Northern Grapevine Mountains, Nevada, and California [J]. *Remote Sensing of Environment*, 24:31-51.
- Liang Shuneng, Gan Fuping, Yan Bokun, Wang Runsheng, Yang Suming, Zhang Zhijun. 2012. Relationship between composition and spectral feature of muscovite [J]. *Remote Sensing for Land and Resources*, 94: 111-115 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xueping, Zong Jin, Zhang Meiqiong, Zhang Yubo, Lv Dan. 2015. Two new stratigraphic units of the Upper Devonian in the northwest border of the Junggar Basin, Xinjiang [J]. *Geology in China*, 42(2): 695-709 (in Chinese with English abstract).
- Sun Y Y, Seccombe P K, Yang K. 2001. Application of short-wave infrared spectroscopy to define alteration zones associated with the Elurazinc-lead-silver deposit, NSW, Australia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 73: 11-26.
- Wang Mou, Li Xiaofeng, Wang Guo, Li Yanlong, Shi Zhilong, Lu Kegai. 2012. Geological characteristics of Baiyanghe Beryllium-Uranium deposits in Xuemisitan volcanic belt Xinjiang [J]. *Mineral Exploration*, 3(1): 34-40 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mou, Li Xiaofeng, Wang Guo, Li Yanlong, Shi Zhilong, Lu Kegai. 2013. Analysis on the Controlling Factors of Uranium Polymetallic Metallogenic in the South of Xuemisitan Volcanic belt, Xinjiang [J]. *Xinjiang Geology*, 31(1): 71-75 (in Chinese with English abstract).
- Xu Q J, Liu S F, Ye F W, Zhang Z X, Zhang C. 2017. Application of CASI/SASI and fieldspec4 hyperspectral data in exploration of the Baiyanghe uranium deposit, Hebukesai, Xinjiang, NW China [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 39(2): 453-469.
- Xu Q J, Ye F W, Liu S F, Zhang Z X, Zhang C. 2017. Hyperspectral Alteration Information from Drill Cores and Deep Uranium Exploration in the Baiyanghe Uranium Deposit in the Xuemisitan Area, Xinjiang, China [J]. *Remote Sensing*, 9(5): 1-21.
- Yang K, Browne P R L, Huntington J F, Walshe J L. 2001. Characterising the hydrothermal alteration of the Broadlands-Ohaaki geothermal system, New Zealand, using short-wave infrared spectroscopy [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 106: 53-65.
- Yang Zhiming, Hou Zengqian, Yang Zhusen, Qu Chunhuan, Li Zhenqing, Liu Yunfei. 2012. Application of short wavelength infrared (SWIR) technique in exploration of poorly eroded

- porphyry Cu district: A case study of Niancun ore district, Tibet [J]. Mineral Deposits, 31(4): 699–717 (in Chinese with English abstract).
- Ye Fawang, Meng Shu, Zhang Chuan, Xu Qingjun, Liu Hongcheng, Wu Ding. 2018. Minerageny study of high-Al, medium-Al and low-Al sericites identified by airborne hyperspectral remote sensing technology [J]. Acta Geologica Sinica, 92(2): 395–412 (in Chinese with English abstract).
- Yin Jiyuan, Chen Wen, Yu Shun, Long Xiaoping, Yuan Chao, Zhang Yan, Li Jie, Sun Jingbo, Liu Xinyu. 2013. Age, geochemical features and Cu–Au mineralization significance of the magnesian dioritic dykes in Baogutu area of west Junggar [J]. Geology in China, 40(4): 1030–1043 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chuan, Ye Fawang, Xu Qingjun, Liu Hongcheng, Meng Shu. 2016. Mineral mapping and analysis of alteration characteristics using airborne hyperspectral remote sensing data in Baiyanghe uranium and Beryllium mine area, Xinjiang [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 29(2): 160–166 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Ge, Lian Yunchang, Wang Runsheng. 2005. Application of the portable infrared mineral analyser (PIMA) in mineral mapping in the Qulong copper prospect, Mozhuogongka County, Tibet [J]. Geological Bulletin of China, 24(5):480–484 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jieli, Huang Yanju, Wang Junhu, Zhou Mi, Wu Ding, Xuan Yanxiu. 2013. Hyperspectral Drilling Core Logging and 3D Mineral Mapping Technology for Uranium Exploration [J]. Uranium Geology, 29(4): 249–255 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Zhang Hui. 2013. Geochemical characteristics of the ore-forming fluid and ore genesis of the Baiyanghe Be–U deposit, Xinjiang, China [J]. Geochimica, 42(2): 143–152 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Liqing, Deng Jun, Yan Haitao, Li Xiaoying. 2008. Short Wavelength Infrared Spectral analysis of alteration zone in the Taishan gold deposit [J]. Geology and Prospecting, 44(5): 58–62 (in Chinese with English abstract).
- 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[J]. 新疆地质, 28(1):1–15.
- 董连慧, 王克卓, 朱志新, 赵同阳, 郑加行, 徐仕琪. 2013. 新疆大型变形构造特征与成矿关系研究[J]. 中国地质, 40(5): 1552–1568.
- 代晶晶, 王瑞江, 曲晓明, 辛晓波. 2013. TerraSpec 波谱仪在西藏多不杂斑岩铜矿区蚀变信息研究中的应用[J]. 国土资源遥感, 25(1): 105–109.
- 杜小弟, 唐跃, 刘德长, 李昭, 王海达. 2015. 航空高光谱探测技术在准噶尔盆地东部地区油气调查中的应用[J]. 中国地质, 42(1): 275–287.
- 郭娜, 郭科, 张婷婷, 刘廷晗, 胡斌, 王重午. 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[J]. 地球学报, 33(4): 641–653.
- 梁树能, 甘甫平, 闫柏锷, 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[J]. 国土资源遥感, 94: 111–115.
- 马学平, 宗晋, 张美琼, 张宇波, 吕丹. 2015. 新疆准噶尔盆地西北缘上泥盆统两个新地层单元[J]. 中国地质, 42(2): 695–709.
- 王谋, 李晓峰, 王果, 李彦龙, 师志龙, 鲁克改. 2012. 新疆雪米斯坦火山岩带白杨河铀矿床地质特征[J]. 矿产勘查, 3(1): 34–40.
- 王谋, 李晓峰, 王果, 李彦龙, 师志龙, 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[J]. 新疆地质, 31(1): 71–75.
- 杨志明, 候增谦, 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[J]. 矿床地质, 31(4): 699–717.
- 叶发旺, 孟树, 张川, 徐清俊, 刘洪成, 武鼎. 2018. 航空高光谱识别的高、中、低铝绢云母矿物成因学研究 [J]. 地质学报, 92(2): 395–412.
- 尹继元, 陈文, 喻顺, 龙晓平, 袁超, 张彦, 李洁, 孙敬博, 刘新宇. 2013. 西准噶尔包古图富镁闪长质岩墙的时代、地球化学特征以及铜金成矿意义[J]. 中国地质, 40(4): 1030–1043.
- 张川, 叶发旺, 徐清俊, 刘洪成, 孟树. 2017. 新疆白杨河铀矿床航空高光谱矿物填图及蚀变特征分析[J]. 国土资源遥感, 29(2): 160–166.
- 章革, 连云长, 王润生. 2005. 便携式短波红外矿物分析仪(PIMA)在西藏墨竹工卡县驱龙铜矿区矿物填图中的应用[J]. 地质通报, 24(5):480–484.
- 张杰林, 黄艳菊, 王俊虎, 周觅, 武鼎, 宣言秀. 2013. 铀矿勘查钻孔岩芯高光谱编录及三维矿物填图技术研究[J]. 铀矿地质, 29(4): 249–255.
- 张鑫, 张辉. 2013. 新疆白杨河大型铀矿床成矿流体特征及矿床成因初探[J]. 地球化学, 42(2): 143–152.
- 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[J]. 地质与勘探, 44(5): 58–62.

附中文参考文献

- 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[J]. 新疆地质, 28(1):1–15.
- 董连慧, 王克卓, 朱志新, 赵同阳, 郑加行, 徐仕琪. 2013. 新疆大型变