

张博, 司庆红, 苗培森, 等. 基于近红外岩心光谱扫描技术研究鄂尔多斯盆地彭阳铀矿床矿物分布特征[J]. 岩矿测试, 2022, 41(5): 733-743.

ZHANG Bo, SI Qinghong, Miao Peisen, et al. Mineral Distribution Characteristics of the Pengyang Uranium Deposit Based on Near Infrared Core Spectral Scanning Technology[J]. Rock and Mineral Analysis, 2022, 41(5): 733-743.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202112130202】

基于近红外岩心光谱扫描技术研究鄂尔多斯盆地彭阳铀矿床矿物分布特征

张博^{1,2}, 司庆红^{1,2*}, 苗培森^{1,2}, 赵华雷^{1,2}, 朱强^{1,2}, 陈印^{1,2}, 陈路路^{1,2}

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170;

2. 中国地质调查局铀矿地质重点实验室, 天津 300170)

摘要: 砂岩型铀矿作为一种以表生流体作用为主的后生矿床, 发育较多低温矿物。甘肃省彭阳铀矿是近年来新发现的一处深部砂岩型铀矿床, 具有砂体规模大、铀矿化面积广、厚度大、等特点。在含矿层及周边发育方解石、石膏、黄铁矿、黏土矿物等低温成因矿物, 研究矿物的空间分布特征及其与铀矿物的关系, 对判别成矿流体的主要来源、性质以及对铀成矿的控制作用具有重要意义。近红外岩心光谱扫描技术可无损、快速、批量地识别出岩心中的层状硅酸盐矿物(如高岭石、蒙脱石、绢云母等), 硫酸盐矿物(如石膏、明矾石等), 碳酸盐矿物(如方解石、白云石等)等矿物信息, 本文基于该技术对彭阳铀矿床的矿物类型及其组合进行研究。结果表明: 洛河组发育高岭石、蒙脱石、伊利石(伊/蒙混层)、绿泥石、碳酸盐、石膏、铁氧化物等矿物, 铀矿段的矿物组合为“伊利石(伊/蒙混层)+石膏+碳酸盐”, 局部可见高岭石。根据矿物组合特征反演流体作用, 洛河组含铀矿段矿在沉积期主要是一套碱性环境, 成矿期存在还原性酸性流体的注入。

关键词: 砂岩型铀矿; 彭阳铀矿床; 近红外光谱扫描; 反射光谱; 扫描电镜

要点:

(1) 总结了彭阳铀矿床 ZK1 钻孔常见矿物的近红外光谱特征。

(2) 查明矿物分布组合特征及其与铀矿化的关系。

(3) 基于矿物组合特征, 分析了与铀矿化有关的流体运移及流体作用。

中图分类号: O657.31

文献标识码: A

砂岩型铀矿床是一种具有重要工业价值的铀矿类型, 因其储量规模大、开采成本低和相对环保等特点, 已成为目前世界上铀矿资源勘查的主攻方向^[1-3]。与其他类型铀矿床相比, 砂岩型铀矿具有明显的后生成矿特点, 主要与后期流体作用密切相关, 在流体改造的过程中, 会形成可能记录成矿流体信息的矿物^[4-5]。对矿物类型、组合、空间分布特征及反演流体作用等进行研究, 将有助于深入认识矿

床成因及提高地质找矿勘查效率^[6-7]。

近红外岩心光谱扫描技术作为一种面向岩心的光谱测量技术, 具有使用简单方便、分析快速、不破坏样品等特点, 为矿物精确识别、矿化分带特征等研究提供了一种更为成熟、有效的方法^[8-13]。该技术在岩心扫描中的应用逐渐成熟, 已经成为各类矿床勘查与研究一种重要的工作手段, 并取得了很好的应用效果^[14-16]。它主要利用矿物在可见光、

收稿日期: 2021-12-13; **修回日期:** 2022-04-20; **接受日期:** 2022-04-30

基金项目: 国家自然科学基金重点支持项目(92162212); 国家重点研发计划项目(2018YFC0604200); 中国地质调查局地质调查项目(DD20190472, DD20221678); 国际地球科学计划项目(IGCP675)

第一作者: 张博, 硕士, 工程师, 主要从事砂岩型铀矿调查与研究。E-mail: zhangbo0354@163.com。

通信作者: 司庆红, 硕士, 高级工程师, 从事油气、砂岩型铀矿等研究工作。E-mail: sqinghongcgs@163.com。

近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)波段的特征反射光谱识别矿物,通过对岩心开展连续扫描,能够在自动扫描和无损样品的前提下,快速地获得地质样品的光谱数据,从而定性或半定量的矿物信息^[16-17]。陈华勇等^[18]利用该技术在鄂东南矿集区确定了主要蚀变矿物的类型、形成期次、分带,揭示了主要蚀变矿物的SWIR特征值的指示规律;史维鑫等^[16]利用该技术研究了福建马坑铁矿的主要蚀变矿物及组合特征,划分了蚀变分带及矿床类型,等等。

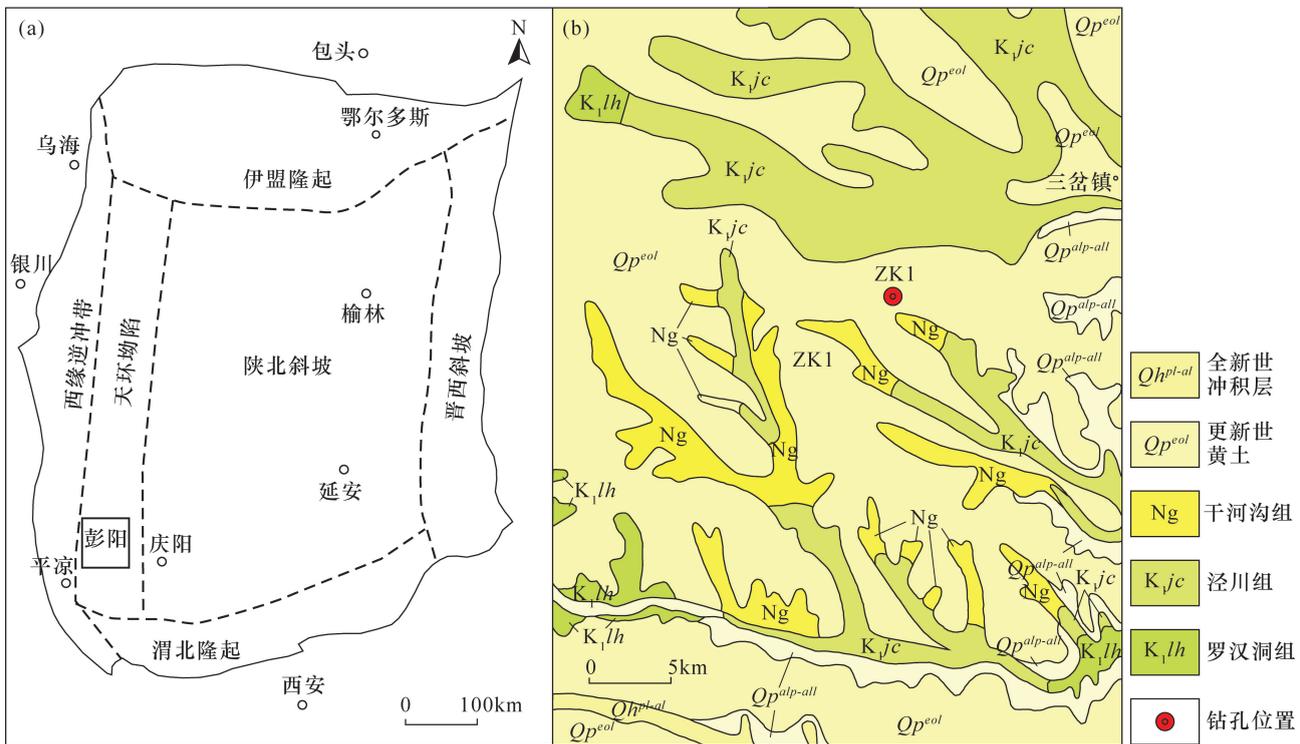
近年来,在鄂尔多斯盆地西南缘彭阳地区新发现一处深部铀异常区及矿体,并开展钻探验证(ZK1钻孔)^[19-20]。本文以ZK1钻孔为例,基于近红外岩心光谱扫描技术对彭阳铀矿的伊利石(伊/蒙混层)、高岭石、绿泥石、碳酸盐矿物、铁氧化物、石膏、蒙脱石等矿物类型及其分布特征进行研究,并探讨了矿物分布特征与铀成矿的空间及成因关系。研究结果有助于认识该矿床的成矿流体作用,对铀成矿规律研究和下一步找矿工作提供依据。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地位于华北陆块西部,是中国中生代典型的大型内陆沉积盆地之一,地貌上为一南北

走向、东缓西陡的不对称向斜盆地。盆地蕴藏有丰富的石油、天然气、煤炭、铀矿、油气等多种能源矿产,为中国重要的能源矿产基地之一。鄂尔多斯盆地是发育在华北克拉通之上的多旋回叠合型盆地^[21-23],具有双重基底结构。盖层为中新世陆相沉积碎屑岩^[24],主要由上三叠统延长群、侏罗系、下白垩统、渐新统、上新统和第四系组成^[23,25-26]。

研究区位于鄂尔多斯盆地西南部,地处宁夏、甘肃两省交界。大地构造位置位于盆内天环坳陷南缘,西邻西缘逆冲带,东邻伊陕斜坡,构造条件较为有利(图1a)。区域构造较为发育,以北西向、近南北向断裂构造为主。彭阳铀矿成矿远景区呈南北走向的长条形,南北长约60.9km,东西宽约33.5km,面积达2049.4km²,深度在700~1500m之间。该区内新生代盖层保存相对齐全,发育有上三叠统延长群、侏罗系、下白垩统、渐新统、上新统和第四系。其中下白垩统自下而上为:宜君组、洛河组、环河—华池组、罗汉洞组、泾川组。赋铀矿层位为洛河组,也是本文重点研究地层,是区域重要的含矿、含水层,顶底均为湖相泥岩和粉砂岩,构成了巨型泥—砂—泥沉积组合,属风成沉积体系下发育的一套巨厚红色砂体^[20,27-28]。该地层呈单斜产出,倾角较平



a—彭阳铀矿床大地构造背景; b—研究区区域地质简图及研究钻孔位置。

图1 研究区大地构造位置及区域地质简图^[27]

Fig. 1 Geotectonic location and regional geological sketch of the study area^[27]

缓,砂体多发育交错层理或斜层理,岩性以红褐色、浅黄色、灰色的中、细砂岩为主,局部为含砾粗砂岩、砂砾岩或薄层粉砂质泥岩,铀矿体主要位于洛河组下部的浅灰色的中、细砂岩中。

2 实验部分

2.1 光谱数据采集

对彭阳铀矿 ZK1 钻孔岩心开展了近红外光谱扫描,钻孔位置见图 1b。近红外光谱扫描工作是在完钻后一个月内完成,岩心较新鲜,基本未遭受后期风化。光谱数据采集使用的仪器为中国地质调查局南京地质调查中心研发的数字化岩心光谱扫描仪(CMS350B 型)。该仪器使用的光谱仪为 ASD FieldSpec4 可见光-短波红外地面光谱仪,波谱范围为 400~2500nm。在 400~1050nm 范围内的光谱分辨率为 3nm,在 1050~2500nm 范围内的光谱分辨率为 10nm。本文数据采集是利用稳定的外置光源,外置光源为 20W 卤素灯,非接触式测量,测量点间距设置为 5cm。测试前仪器需开机预热 20~30min,每次开机后均使用标准白板进行定标,每采集一盒岩心数据时,测试一次标准样品的光谱数据。此外,光谱数据采集前还要对岩心进行清洁,保证待测岩心的表面干燥、无尘、无遮挡。

2.2 光谱数据处理

数据处理包括深度数据校正和光谱数据解译两部分。深度数据校正以回次为单元,对光谱仪连续采集的深度数据进行校正,使数据每个数据采集点深度更接近于真实深度,减小由于岩心采取率引起的误差。本研究采用的光谱数据解译方法,是采用 TSG 软件直接从光谱吸收和反射特征提取矿物信息。TSG 软件是用于分析岩心、矿物等样品光谱信息的软件,涵盖了多种岩心、矿物光谱数据的分析算法、提取方法^[29],针对光谱库内矿物的提取方法构建了多种模型^[30]。

在光谱数据解译过程中,要将野外现场采集的岩心光谱数据导入 TSG 软件中,该软件根据标准矿物光谱库中的标准曲线对光谱数据进行自动寻峰、最佳匹配,并计算出可识别矿物的相对含量和拟合误差等。同时,使用 TSG 构建的其他标量来进一步验证这些矿物的识别结果^[31]。通过光谱数据解译,彭阳铀矿床共识别出高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、碳酸盐矿物、石膏、铁氧化物(包括赤铁矿、针铁矿)等矿物。各种矿物的提取参数见表 1。

表 1 各种矿物的提取参数

Table 1 Extraction parameters of minerals

矿物名称	提取矿物所用的光谱参数	检测下限值
高岭石	2160nm 附近吸收深度	0.0026
蒙脱石	2210nm 附近半高宽度	14
伊利石	全谱解混比例	0.2
绿泥石	2250nm 附近吸收深度	0.001
石膏	1940nm 附近吸收深度	0.003
碳酸盐矿物	全谱解混比例	0.2
铁氧化物	860~930nm 段吸收深度	1.33

3 结果与讨论

3.1 样品光谱特征

本文对彭阳铀矿 ZK1 钻孔开展了连续的岩心样品近红外光谱扫描,提取高岭石、蒙脱石、伊利石、绿泥石、碳酸盐矿物、石膏、铁氧化物等矿物信息,分析了上述矿物的光谱特征,编制矿物分布图。

3.1.1 高岭石

沉积地层中的高岭石一般认为是由长石等硅酸盐矿物经蚀变作用所形成的,主要形成于酸性环境。高岭石的反射光谱以 1400nm(O—H 的一级倍频)的双吸收谱带和 2160nm、2200nm(Al—OH 和 O—H 的组合频)附近的两个吸收峰为特征(图 2a),极易与其他种类的黏土矿物分辨。此外,高岭石结晶度的差异也会导致上述双吸收峰的宽度和吸收深度发生变化。高岭石以独有的 2160nm 附近的吸收为高岭石的鉴定特征,本文提取该谱带的吸收深度(D_{2160})作为高岭石的含量指标。由于伊利石和蒙脱石均无 2160nm 附近的吸收,所以利用近红外光谱扫描技术提取的高岭石信息的可靠性很高。

3.1.2 蒙脱石

蒙脱石是一种在低温、碱性环境下形成的矿物。反射光谱显示主要是 2210nm(Al—OH 和 O—H 的组合频)附近强烈的单吸收(图 2b),辅 1410nm 和 1910nm 附近明显的不对称吸收带(OH 和 H₂O 吸收)。因为高岭石中的水和 Al—OH 吸收也是在 1900nm 和 2210nm 附近,所以,如果有两种黏土矿物同时存在,采用 1900nm 水或者 2210nm 的 Al—OH 谱带深度(吸收强度)难以分开不同的黏土矿物。但是本研究区蒙脱石 2210nm 附近的吸收明显宽于高岭石或者伊利石 2210nm 附近的吸收,蒙脱石与高岭石混合后 Al—OH 谱带显示宽度增加。本文采用宽度指标 W_{2210} 值作为蒙脱石的指示, W_{2210} 值的测定是提取 Al—OH 谱带的“半深宽”。

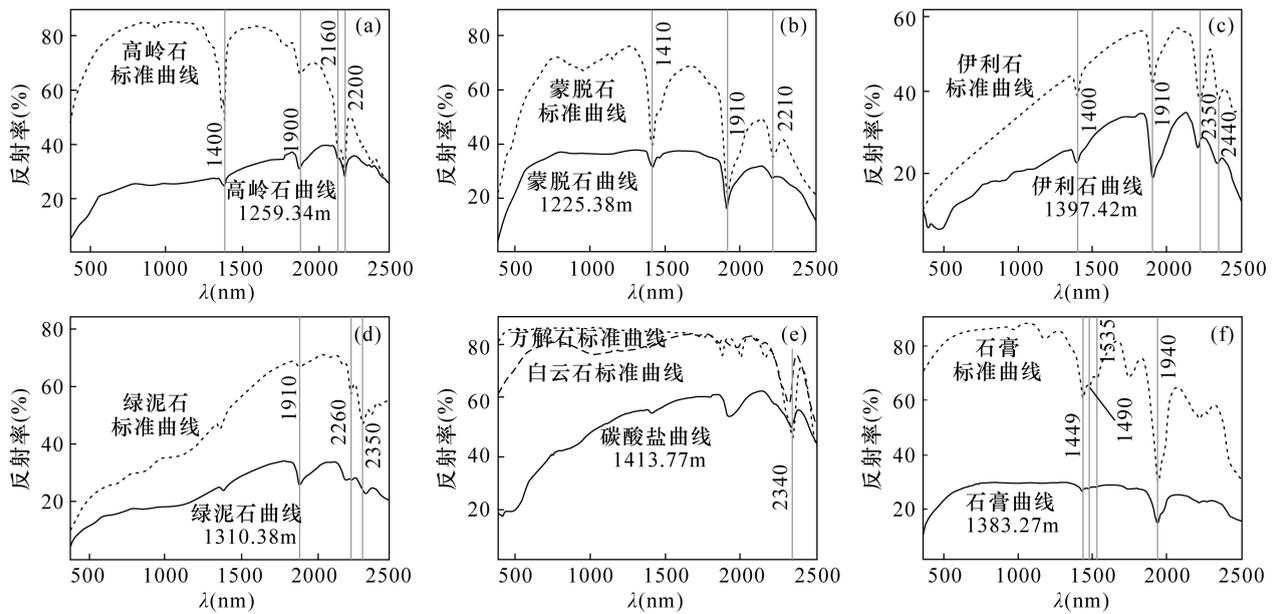


图2 彭阳铀矿床典型矿物的近红外光谱特征

Fig. 2 Near infrared spectral characteristics of typical minerals in Pengyang uranium deposit

3.1.3 伊利石

伊利石也称含水绢云母,属于水云母族,其组成与白云母略有不同,其层间K更低,而四面体中Si和Al置换的程度不及白云母高,含更多水,是常见的一种低温热液成因矿物,在各种成因的岩石地层中均可见到。伊利石的光谱特征的主要吸收位置在1400、1910、2350、2440nm附近(图2c),这些特征与白云母、绢云母等相似,较难区分,主要区分于伊利石在1460nm和1910nm附近有深的吸收带^[30]。此外,伊利石的吸收深度会随着结晶度的变化而变化,同时,由于 K^+ 、 Na^+ 、 Al^{3+} 等阳离子的替代会引起吸收位置的位移。在含量指标提取时,采用TSG软件中的自动解混功能获得伊利石的占比。鉴于伊利石与伊/蒙混层在近红外波段的特征吸收位置相似,本文未作区分。

3.1.4 绿泥石

绿泥石一般包括铁绿泥石和镁绿泥石两类,前者主要以2260nm、2350nm的吸收为特征,同时受 Fe^{2+} 的影响,在1400~1600nm波段存在明显的波谷;后者以2250nm和2330~2340nm附近吸收为特征^[18]。本文测试的数据反射光谱显示特征主要是在1900nm附近含水的吸收峰, $Fe-OH$ 在2260nm附近有明显的吸收峰, $Mg-OH$ 在2350nm附近有明显的吸收峰(图2d)。提取结果中以该谱带的吸收深度 D_{2250} 作为绿泥石的含量标志。

3.1.5 碳酸盐矿物

沉积地层中的碳酸盐矿物一般包括方解石和白云石,光谱特征为在2300~2400nm之间有单一的吸收特征,吸收峰左宽右窄(图2e)。方解石在2340nm附近有一个强烈的吸收峰,表现出明显的不对称性,在2300nm附近一般也会有一个肩状峰。白云石的吸收峰位置在2320~2325nm,比方解石的特征吸收峰波长位置值要小^[13]。研究区碳酸盐矿物特征峰吸收位置主要在2340nm附近,为较典型的方解石。本文主要是采用TSG软件中的自动解混功能提取碳酸盐矿物,以2240nm处的高吸收值为光谱特征进行识别。微观矿物学研究结果也表明研究区主要的碳酸盐矿物为方解石,且与铀矿化关系较为密切。

3.1.6 石膏

石膏是一种沉积地层和蒸发沉积物中典型的硫酸盐矿物。石膏在短波红外波段的光谱特征主要是1750nm、1940nm附近明显的吸收峰,更为特征的是1449nm、1490nm、1535nm附近的“三台阶”(图2f)。本文以1940nm附近的吸收谱带深度作为石膏的含量指标。整体上洛河组上部的石膏含量总体较低,但在含矿段,石膏与成矿有着明显的空间关系。

3.1.7 铁氧化物矿物

铁氧化物矿物主要包括赤铁矿、针铁矿,是沉积地层中常见的矿物,可以作为氧化环境的指示矿物。赤铁矿的特征吸收峰位置在660nm、750nm、860~

930nm,其中750nm附近的吸收峰可指示赤铁矿的颜色。针铁矿的特征吸收峰位置在660nm、910~940nm附近。研究区主要发育赤铁矿,针铁矿相对较少,本文选择860~930nm段的吸收深度作为提取铁氧化物矿物的参数。

3.2 矿物组合特征

矿物类型、矿物组合及分带特征是地质找矿的重要标志,是成矿成岩过程中水-岩相互作用等因素的产物^[32]。矿物种类及分布规律通常与岩性之间存在着一定的相关关系^[16,33]。白垩系洛河组是ZK1钻孔主要的含铀层位,主体上为一套风成砂岩。岩性组合为灰色、浅灰绿色、浅黄色、浅红色细砂岩,灰色、浅灰绿色、浅黄色中细粒砂岩、中粒砂岩和灰色复合成分砾岩等。与地质编录结果相比较,近红外岩心光谱扫描结果更精细地展示了钻孔中垂向上各类矿物的分布,并且从半定量的角度反映了矿物在各个层位的发育强度。洛河组识别出的矿物主要包括:伊利石、高岭石、绿泥石、碳酸盐、石膏、铁氧化物、蒙脱石(极少量)等。其中,伊利石在洛河组由顶到底均有分布;绿泥石在1130~1320m深度范围内分布,且强度较弱;碳酸盐矿物在洛河组均有发育,主要是钙质胶结物的显示,在砂砾岩段含量最高;石膏分布范围较广,但在铀矿化段较发育,与铀矿化表现出很好的正相关关系;铁氧化物矿物与岩心颜色密切相关,在红色、浅红色、黄色砂岩、泥岩段均有发育,在灰色砂岩段消失;高岭石在1215~1320m深度较为发育;蒙脱石极少,仅在局部发育。

本文将含铀矿层洛河组由顶到底划分为8个岩性组合,不同岩性段对应不同的矿物组合(表2)。结果表明,矿物具有较规律的分带性,矿物类型及其组合受岩性控制比较明显。总体上,洛河组的矿物组合为“伊利石+石膏+碳酸盐+铁氧化物+高岭石+绿泥石”。

3.3 矿物组合与铀矿化的关系

与洛河组沉积背景相比,ZK1钻孔发育多个铀矿化段(图3),其中,洛河组底部I段(1384.75~1414.94m)和II段(1432.35~1435.05m)两段为主要的工业矿含矿部位,其余为矿化段。通过自然伽马(GR)数值与矿物分布对比分析发现,在工业含矿段存在大量的高含量石膏与之对应,其余矿化区段与石膏的对应关系也较为明显。

在I段(1384.75~1414.94m),岩性主要为浅灰色细砂岩、浅灰色中砂岩、绿灰色细砂岩,局部为浅灰色粗砂岩。野外现场岩心编录为泥质胶结,局部为铁质胶结,可见黄铁矿颗粒。近红外岩心光谱扫描结果显示该区段发育石膏、伊利石、碳酸盐矿物,可见少量高岭石,几乎不发育铁氧化物。在II段(1432.35~1435.05m),岩性均为浅灰色细砂岩,泥质胶结,矿物组合与I段基本一致。铀矿化段与非铀矿化段相比,主要差别是石膏的增加和铁氧化物矿物的消失。这与砂岩型铀矿主要形成于还原环境密切相关,还原环境的主要标志就是赤铁矿、褐铁矿等氧化物矿物的减少^[34]。总之,基于近红外岩心光谱扫描技术,彭阳铀矿床洛河组铀矿段的矿物组合为“伊利石(伊/蒙混层)+石膏+碳酸盐”,局部可见高岭石。

除此之外,利用扫描电镜等技术方法还在洛河组含铀矿段发现黄铁矿、钛铁矿、磷灰石、碳酸盐等矿物与铀矿物关系密切^[27]。扫描电镜下可见:星点状沥青铀矿周边发育锐钛矿、蒙脱石、伊/蒙混层(图4a);沥青铀矿与黄铁矿共生,周边发育绿泥石、蒙脱石等黏土矿物(图4b);星点状沥青铀矿分布于细晶柱状磷灰石的周围(图4c);星点状沥青铀矿与锐钛矿、绿泥石(图4d);星点状沥青铀矿围绕锐钛矿边缘产出(图4e);沥青铀矿集合体发育在锐钛矿、绿泥石孔隙中(图4f)等。洛河组砂岩中黏土矿物含量总体较低,铀矿物与伊/蒙混层、绿泥石、高岭

表2 基于近红外光谱技术的洛河组矿物组合特征

Table 2 Mineral assemblage characteristics of the Luohe Formation based on near infrared spectroscopy

序号	起始深度(m)	终止深度(m)	主要岩性	识别的矿物及其组合
1	1048.86	1113.83	浅红色、红色细砂岩	伊利石+碳酸盐+铁氧化物
2	1113.83	1153.89	红色细砾岩、中砾岩	伊利石+碳酸盐+铁氧化物+绿泥石
3	1153.89	1214.74	浅红色、红色细砂岩	伊利石+碳酸盐+铁氧化物+绿泥石+石膏
4	1216.12	1284.90	红色、黄色细砂岩	高岭石+伊利石+碳酸盐+铁氧化物+蒙脱石
5	1284.90	1331.84	黄色细砂岩、中砂岩	伊利石+铁氧化物(少量)+绿泥石
6	1331.84	1369.89	绿灰色细砂岩、中砂岩	伊利石+石膏(少量)+铁氧化物
7	1369.89	1413.77	灰色细砂岩、中砂岩	石膏+伊利石+碳酸盐+高岭石(局部发育)
8	1429.98	1454.36	灰色、黄色细砂岩	石膏+伊利石+碳酸盐

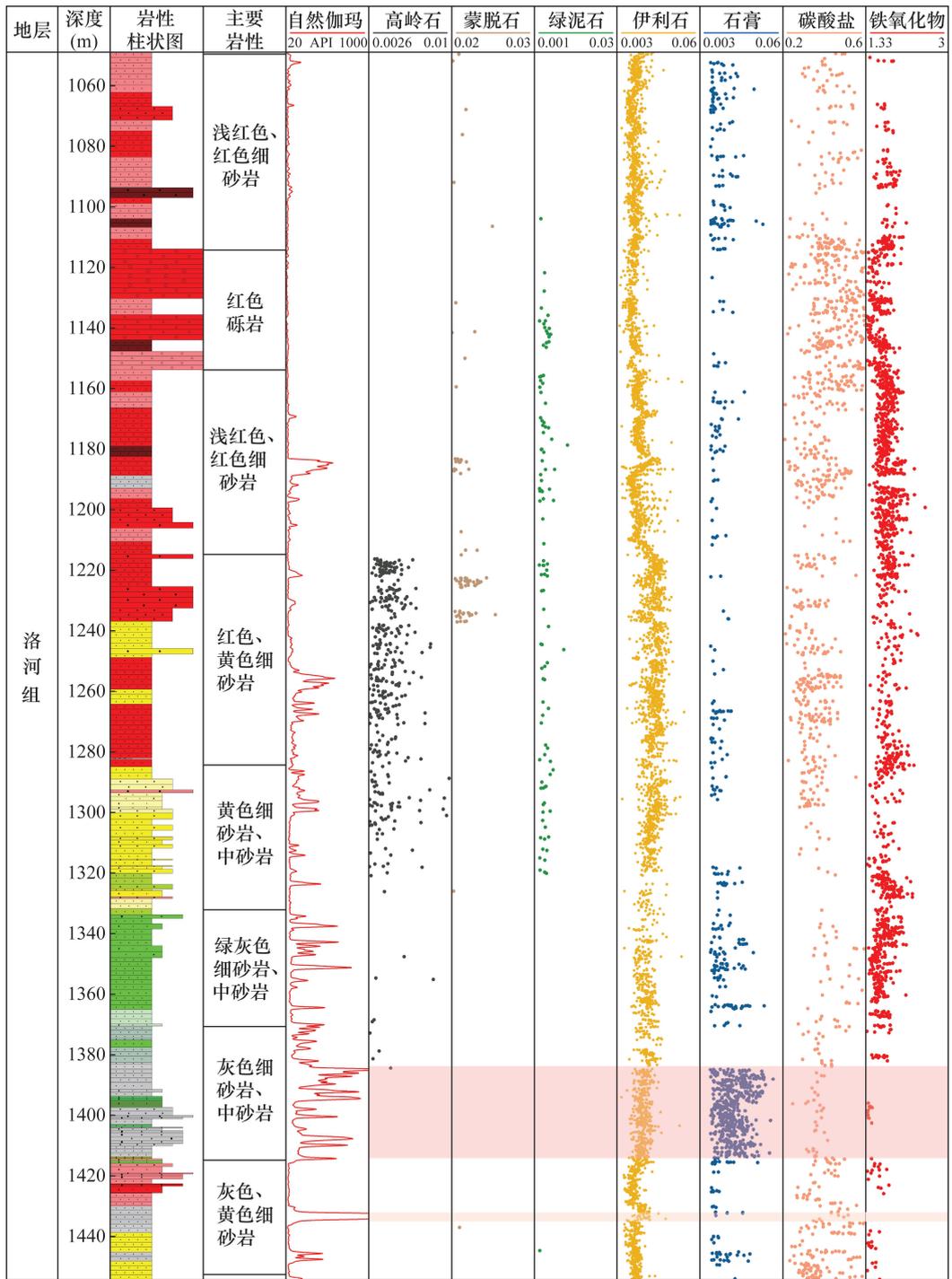


图3 ZK1钻孔洛河组的矿物分布图

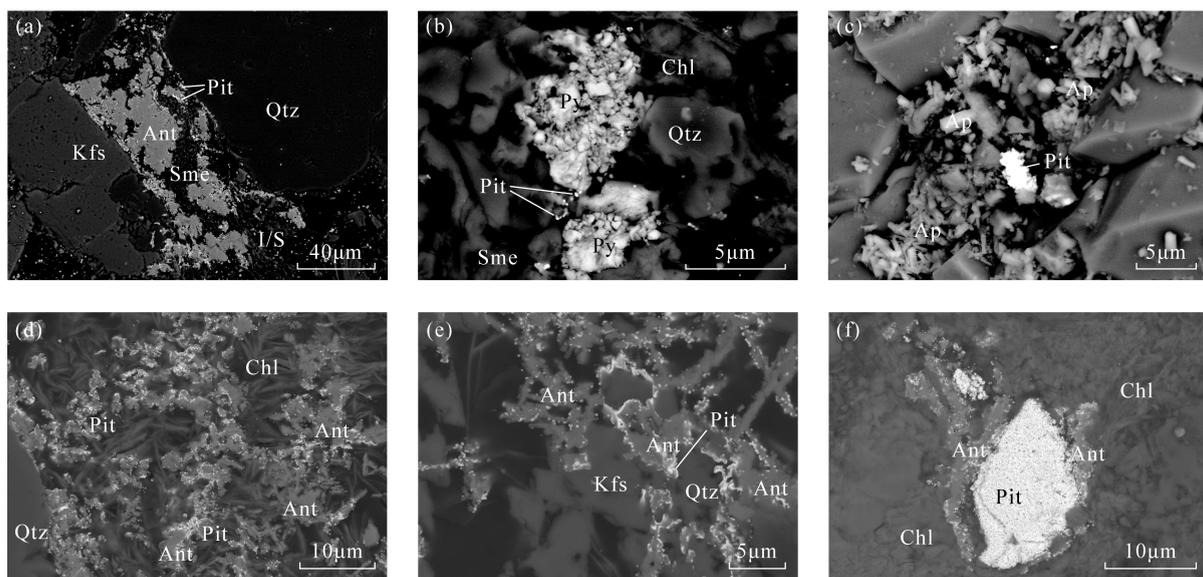
Fig. 3 Mineral distribution map of the Luohe Formation in Borehole ZK1 drilling core

石等黏土矿物共生,这主要是黏土矿物对铀的吸附作用形成的。

3.4 矿物组合的流体指示意义

伊利石大多是在 K^+/H^+ 比率高的弱碱性环境中,由钾长石、云母等铝硅酸盐矿物在弱淋滤作用下风化而成的,自生伊利石常与富钾离子的碱性介质有关^[35-36]。研究区洛河组地层中大量的伊利石是

由蒙脱石在富钾碱性水介质中 Al^{3+} 、 K^+ 置换 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} 并脱水转化形成的:蒙脱石+ Al^{3+} + K^+ →(脱水)伊利石+ Si^{4+} ,最终导致蒙脱石消失,伊利石、伊蒙混层增加。因此,可将伊利石作为陆相中性或弱碱性环境的指示矿物。X射线衍射(XRD)分析显示,研究区黏土矿物主要是伊/蒙混层^[20]。洛河组区域上发育大量伊利石,而代表酸性环境的高岭石仅在部



Ant—锐钛矿; Ap—磷灰石; Chl—绿泥石; Kfs—钾长石; I/S—伊/蒙混层; Pit—沥青铀矿; Py—黄铁矿; Qtz—石英; Sme—蒙脱石。

各小图 a~d 样品均取自 ZK1 钻孔洛河组含铀矿段,样品深度为 1384.75~1414.94m。

图4 与铀矿物共生的矿物

Fig. 4 Minerals associated with uranium minerals

分岩性段出现,表明洛河组在沉积期是以碱性环境为主,而在成矿期由于大量还原性酸性流体注入,这就导致含铀矿段原生红色风成砂岩被氧化为灰色,在光谱数据解译结果上表现为铁氧化物矿物的大量消失,仅在局部可见铁氧化物的残留。这种还原性流体一般被认为是深部油气相关的含烃流体^[37],洛河组也发现了大量油气参与铀成矿的证据^[38]。绿泥石多在低温、淋滤作用下生成,它的出现代表了干冷的气候条件^[39-40]。洛河组中段绿泥石的出现,反映了气候发生转变。洛河组中下部含水层中矿化度较高, SO_4^{2-} 离子的含量较高^[41],同时,成矿期地层中存在大量 Ca^{2+} ,导致了石膏的形成。这可能是含铀矿段石膏明显增加的原因。

4 结论

本文利用近红外光谱扫描技术,研究了彭阳铀矿床洛河组碳酸盐岩矿物的光谱特征,识别了洛河组主要的矿物类型以及组合特征。在垂向上,矿物呈现出较明显的分带性,不同矿物的分布严格受岩性和后期流体作用的控制。铀矿段矿物组合为“伊利石(伊/蒙混层)+石膏+碳酸盐”,局部可见少量高岭石,表明沉积期含铀矿段主要是一套碱性环境,成矿期存在还原性酸性流体的注入。

近红外岩心光谱扫描技术能无损、快速、有效地提取岩心中矿物的空间分布信息,为砂岩型铀矿及

其他矿种的矿物学及流体作用方面的研究提供了一种新的思路和方法。但是,该方法也存在局限性,如解译结果半定量、易受岩心条件影响等,需要结合扫描电镜、X 射线衍射等其他实验手段开展综合研究。

致谢: 本文光谱数据野外采集过程中得到中国地质调查局南京地质调查中心修连存研究员及其团队的支持,光谱数据解译得到中科遥感集团有限公司杨凯博士、张红亮博士等大力指导,在此表示衷心的感谢!

5 参考文献

- [1] Jaireth S, Roach I C, Bastrakov E, et al. Basin-related uranium mineral systems in Australia: A review of critical features [J]. *Ore Geology Reviews*, 2015, 76: 360-394.
- [2] 张金带. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展[J]. *铀矿地质*, 2016, 32(6): 321-332.
Zhang J D. Innovation and development of metallogenic theory for sandstone type uranium deposit in China [J]. *Uranium Geology*, 2016, 32(6): 321-332.
- [3] Jin R S, Miao P S, Sima X Z, et al. New prospecting progress using information and big data of coal and oil exploration holes on sandstone-type uranium deposit in North China [J]. *China Geology*, 2018, 1(1): 167-168.
- [4] 李建国, 金若时, 张博, 等. 松辽盆地西南部上白垩统

- 姚家组原生黏土矿物组合特征及其找铀意义[J]. 地球学报, 2018, 39(3): 48-58.
- Li J G, Jin R S, Zhang B, et al. Characteristics of primary clay minerals in the upper Cretaceous Yaojia Formation of southwest Songliao Basin and their significance[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2018, 39(3): 48-58.
- [5] 张博, 李建国, 苗培森, 等. 开鲁盆地钱家店铀矿床铀的赋存状态及成因探讨[J]. 华北地质, 2021, 44(2): 40-48.
- Zhang B, Li J G, Miao P S, et al. The occurrence state and origin of uranium in Qianjiadian uranium deposit, Kailu Basin[J]. North China Geology, 2021, 44(2): 40-48.
- [6] 张世涛, 陈华勇, 韩金生, 等. 鄂东南铜绿山大型铜铁金矿床成矿岩体年代学、地球化学特征及成矿意义[J]. 地球化学, 2018, 47(3): 240-256.
- Zhang S T, Chen H Y, Han J S, et al. Geochronology, geochemistry, and mineralization of quartz monzodiorite and quartz monzodiorite porphyry in Tonglūshan Cu-Fe-Au deposit, Edongnan ore district, China [J]. Geochemical, 2018, 47(3): 240-256.
- [7] Thompson A J B, Hauff P L, Robitaille A J. Alteration mapping in exploration: Application of short wave infrared (SWIR) spectroscopy[J]. SEG Newsletter, 1999, 39: 16-27.
- [8] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 近红外光谱分析技术在蚀变矿物鉴定中的应用[J]. 地质学报, 2007, 81(11): 1584-1590.
- Xiu L C, Zheng Z Z, Yu Z K, et al. Mineral analysis technology application with near infrared spectroscopy in identifying alteration mineral[J]. Acta Geologica Sinica, 2007, 81(11): 1584-1590.
- [9] 修连存, 郑志忠, 俞正奎, 等. 近红外光谱仪测定岩石中蚀变矿物方法研究[J]. 岩矿测试, 2009, 28(6): 519-523.
- Xiu L C, Zheng Z Z, Yu Z K, et al. Study on method of measuring altered minerals in rocks with near-infrared spectrometer[J]. Rock and Mineral Analysis, 2009, 28(6): 519-523.
- [10] 燕守勋, 武晓波, 周朝宪, 等. 遥感和光谱地质进展及其对矿产勘查的实践应用[J]. 地球科学进展, 2011, 26(1): 13-29.
- Yan S X, Wu X B, Zhou C X, et al. Remote sensing and spectral geology and their applications to mineral exploration[J]. Advances in Earth Science, 2011, 26(1): 13-29.
- [11] 卢燕, 杨凯, 修连存. 基于近红外光谱技术的烃类与粘土矿物识别及其地质意义[J]. 地质通报, 2017, 36(10): 1884-1891.
- Lu Y, Yang K, Xiu L C. Identification of hydrocarbon and clay minerals based on near-infrared spectroscopy and its geological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(10): 1884-1891.
- [12] 郭娜, 史维鑫, 黄一入, 等. 基于短波红外技术的西藏多龙矿集区铁格隆南矿床荣那矿段及其外围蚀变填图——勘查模型构建[J]. 地质通报, 2018, 37(2-3): 446-457.
- Guo N, Shi W X, Huang Y R, et al. Alteration mapping and prospecting model construction in the Tiegelongnan ore deposit of the Duolong ore concentration area, northern Tibet, based on shortwave infrared technique [J]. Geological Bulletin of China, 2018, 37(2/3): 446-457.
- [13] 刘新星, 张弘, 张娟, 等. 基于红外光谱技术的内蒙古乌奴格吐山斑岩铜钼矿蚀变和矿化特征研究[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 121-133.
- Liu X X, Zhang H, Zhang J, et al. A study on alteration mineral assemblages and mineralization characteristics of a Wunugutushan porphyry copper-molybdenum deposit in Inner Mongolia, China, based on infrared spectroscopy [J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(1): 121-133.
- [14] 苗培森, 张博, 张红亮, 等. 砂岩型铀矿蚀变矿物研究中的岩心光谱扫描技术[J]. 地质调查与研究, 2017, 40(3): 210-218.
- Miao P S, Zhang B, Zhang H L, et al. Automated drill core spectral scanning technique in the study of altered minerals in sandstone-type uranium deposits [J]. Geological Survey and Research, 2017, 40(3): 210-218.
- [15] 侯隼鹏, 徐清俊, 叶发旺, 等. 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, 2018, 45(4): 839-850.
- Hou J P, Xu Q J, Ye F W, et al. Alteration zonation of drilling cores in the Baiyanghe uranium deposit of Xinjiang and its geological implications[J]. Geology in China, 2018, 45(4): 839-850.
- [16] 史维鑫, 易锦俊, 王浩, 等. 马坑铁矿钻孔岩心红外光谱特征及蚀变分带特征研究[J]. 岩矿测试, 2020, 39(6): 934-943.
- Shi W X, Yi J J, Wang H, et al. Study on the characteristics of the infrared spectrum and the alteration zoning of drill core in the Makeng iron deposit[J]. Rock and Mineral Analysis, 2020, 39(6): 934-943.
- [17] 李晶, 祁进平, 修连存, 等. 岩芯光谱扫描仪在紫金山矿产勘查中的应用[J]. 矿物学报, 2013, 33(S2):

- 1020-1021.
- Li J, Qi J P, Xiu L C, et al. Application of core spectral scanner in Zijin mountain mineral exploration [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33 (S2) : 1020-1021.
- [18] 陈华勇, 张世涛, 初高彬, 等. 鄂东南矿集区典型矽卡岩-斑岩矿床蚀变矿物短波红外 (SWIR) 光谱研究与勘查应用 [J]. *岩石学报*, 2019, 35 (12) : 3629-3643.
- Chen H Y, Zhang S T, Chu G B, et al. The short wave infrared (SWIR) spectral characteristics of alteration minerals and applications for ore exploration in the typical skarn - porphyry deposits, Edong ore district, eastern China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2019, 35 (12) : 3629-3643.
- [19] 苗培森, 陈印, 程银行, 等. 中国北方砂岩型铀矿深部探测新发现及其意义 [J]. *大地构造与成矿学*, 2020, 44 (4) : 563-575.
- Miao P S, Chen Y, Cheng Y H, et al. New deep exploration discoveries of sandstone - type uranium deposits in North China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2020, 44 (4) : 563-575.
- [20] 朱强, 李建国, 苗培森, 等. 鄂尔多斯盆地西南部洛河组储层特征和深部铀成矿地质条件 [J]. *地球科学与环境学报*, 2019, 41 (6) : 675-690.
- Zhu Q, Li J G, Miao P S, et al. Reservoir characteristics of Luohe Formation and metallogenic geological conditions of deep uranium in the south western margin of Ordos Basin, China [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 2019, 41 (6) : 675-690.
- [21] 邓军, 王庆飞, 高帮飞, 等. 鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布 [J]. *现代地质*, 2005, 19 (4) : 538-545.
- Deng J, Wang Q F, Gao B F, et al. Evolution of Ordos Basin and its distribution of various energy resources [J]. *Geoscience*, 2005, 19 (4) : 538-545.
- [22] 刘池洋, 赵红格, 谭成仟, 等. 多种能源矿产赋存与盆地成藏 (矿) 系统 [J]. *石油与天然气地质*, 2006, 27 (2) : 131-142.
- Liu C Y, Zhao H G, Tan C Q, et al. Occurrences of multiple energy mineral deposits and mineralization reservoiring system in the basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2006, 27 (2) : 131-142.
- [23] 刘池洋, 赵红格, 王锋, 等. 鄂尔多斯盆地西缘 (部) 中生代构造属性 [J]. *地质学报*, 2005, 79 (6) : 738-747.
- Liu C Y, Zhao H G, Wang F, et al. Attributes of the mesozoic structure on the west margin of the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79 (6) : 738-747.
- [24] 杨晓勇, 凌明星, 赖小东, 等. 鄂尔多斯盆地东胜—黄龙地区砂岩型铀矿铀矿物赋存状态研究 [J]. *地质学报*, 2009, 83 (8) : 1167-1177.
- Yang X Y, Ling M X, Lai X D, et al. Study on uranium mineral occurrence of sandstone - type uranium deposits in Dongsheng—Huang region, the Ordos Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2009, 83 (8) : 1167-1177.
- [25] 魏斌, 张忠义, 杨友运. 鄂尔多斯盆地白垩系洛河组至环河—华池组沉积相特征研究 [J]. *地层学杂志*, 2006, 30 (4) : 367-372.
- Wei B, Zhang Z Y, Yang Y Y, et al. Sedimentary facies of the cretaceous Luohe and Huanhe—Huachi Formations in the Ordos Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2006, 30 (4) : 367-372.
- [26] 张宇龙, 范洪海, 贺锋, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘下白垩统铀成矿条件分析 [J]. *铀矿地质*, 2018, 34 (4) : 193-200.
- Zhang Z L, Fan H H, He F, et al. Analysis of sandstone type uranium metallogenic conditions of lower Cretaceous in the southwest margin of Ordos Basin [J]. *Uranium Geology*, 2018, 34 (4) : 193-200.
- [27] Zhao H L, Ao C, Li J G, et al. Occurrence and mechanism of uranium enrichment with a unique eolian sedimental environment in the Pengyang uranium deposit, Ordos Basin [J]. *Ore Geology Reviews*, 2022, 141, <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104641>.
- [28] Xing L D, Lockley M G, Tang Y Z, et al. Tetrapod track assemblages from lower Cretaceous desert facies in the Ordos Basin, Shanxi Province, China, and their implications for Mesozoic paleoecology [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2018, 507: 1-14.
- [29] Laukamp C, Caccetta M, Chia J, et al. The uses, abuses and opportunities for hyperspectral technologies and derived geoscience information [C] // Proceedings of Geo-computing Conference Brisbane: AIG Bulletin, 2010: 73-76.
- [30] 郭娜, 黄一入, 郑龙, 等. 高硫-低硫化浅成低温热液矿床的短波红外矿物分布特征及找矿模型 [J]. *地球学报*, 2017, 38 (5) : 767-778.
- Guo N, Huang Y R, Zheng L, et al. Alteration zoning and prospecting model of epithermal deposit revealed by shortwave infrared technique: A case study of Tiegelongnan and Sinongduo deposits [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2017, 38 (5) : 767-778.
- [31] Yang K, Whitbourn L, Mason P. Mapping the chemical composition of nickel laterites with reflectance spectroscopy at Koniambo, New Caledonia [J]. *Economic Geology*, 2013, 108 (6) : 1285-1299.
- [32] 徐清俊, 叶发旺, 张川, 等. ASD 地面光谱仪在新疆白

- 杨河铀矿床蚀变信息研究中的应用[J]. 铀矿地质, 2016, 32(3): 186-191.
- Xu Q J, Ye F W, Zhang C, et al. Application of ASD spectrometer to the study of alteration information in Baiyanghe uranium deposit, Xinjiang [J]. Uranium Deposit, 2016, 32(3): 186-191.
- [33] 王润生, 甘甫平, 闫柏琨, 等. 高光谱矿物填图技术与应用研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(1): 1-13.
- Wang R S, Gan F P, Yan B K, et al. Hyperspectral mineral mapping and its application[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2010, 22(1): 1-13.
- [34] 张天福, 张云, 金若时, 等. 鄂尔多斯盆地东北缘侏罗系层序界面特征对砂岩型铀矿成矿环境的制约[J]. 中国地质, 2020, 47(2): 278-299.
- Zhang T F, Zhang Y, Jin R S, et al. Characteristics of Jurassic sequence boundary surfaces on the northeastern margin of Ordos Basin and their constraints on the spatial-temporal properties of sandstone uranium mineralization [J]. Geology in China, 2020, 47(2): 278-299.
- [35] 张川, 叶发旺, 徐清俊, 等. 相山铀矿田西部深钻岩心成像光谱编录及蚀变分带特征[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(2): 231-239.
- Zhang C, Ye F W, Xu Q J, et al. Deep drill logging and its alteration zoning features based on hyperspectral core imaging in west of Xiangshan uranium orefield [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(2): 231-239.
- [36] 彭自栋, 申俊峰, 曹卫东, 等. 蚀变矿物近红外光谱特征对地质找矿的指示意义——以甘肃肃南金矿为例[J]. 地质通报, 2016, 35(5): 822-831.
- Peng Z D, Shen J F, Cao W D, et al. The application of near-infrared spectroscopy to identify altered minerals and its implications for geologic prospecting: A case study of the Gangcha gold deposit in Gansu Province [J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(5): 822-831.
- [37] 李建国, 张博, 金若时, 等. 钱家店铀矿床表生含氧含铀流体与深层酸性含烃流体的耦合成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(4): 576-589.
- Li J G, Zhang B, Jin R S, et al. Uranium mineralization of coupled supergene oxygen-uranium bearing fluids and deep acidic hydrocarbon bearing fluids in the Qianjiadian uranium deposit, Kailu Basin [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2020, 44(4): 576-589.
- [38] Si Q H, Li J G, Miao P S, et al. Characteristics and mechanism of hydrocarbon alteration of faded sandstone in the uranium-bearing Luohe Formation, Pengyang area, southwest Ordos Basin [J]. Ore Geology Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104500>.
- [39] Gingele F X, de Deckker P D, Norman M. Late Pleistocene and Holocene climate of SE Australia reconstructed from dust and river loads deposited off shore the River Murray Mouth [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2007, 255: 257-272.
- [40] 孙庆峰, Christophe C, 陈发虎, 等. 气候环境变化研究中影响黏土矿物形成及其丰度因素的讨论[J]. 岩石矿物学杂志, 2011, 30(2): 291-300.
- Sun Q F, Christophe C, Chen F H, et al. A discussion on the factors affecting formation and quantity of clay minerals in climatic and environmental researches [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2011, 30(2): 291-300.
- [41] 谢渊, 李令喜, 谢正温, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系石膏类矿物分布特征及其对地下水水化学类型和水质的影响[J]. 水文地质工程地质, 2008(S): 55-62.
- Xie Y, Li L X, Xie Z W, et al. Distribution of gypsum and its effect on the groundwater hydrochemical type and quality of the Cretaceous in Ordos Basin [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2008(S): 55-62.

Mineral Distribution Characteristics of the Pengyang Uranium Deposit Based on Near Infrared Core Spectral Scanning Technology

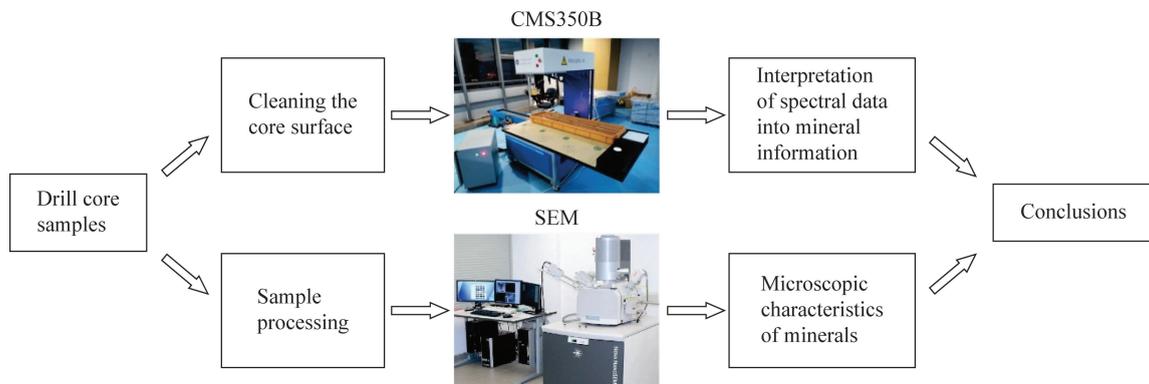
ZHANG Bo^{1,2}, SI Qinghong^{1,2*}, Miao Peisen^{1,2}, ZHAO Hualei^{1,2}, ZHU Qiang^{1,2}, CHEN Yin^{1,2}, CHEN Lulu^{1,2}

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China)

HIGHLIGHTS

- (1) The near infrared spectral characteristics of common minerals in borehole ZK1 of the Pengyang uranium deposit were summarized.
- (2) The distribution and assemblage characteristics of minerals and their relationship with uranium mineralization were investigated.
- (3) Based on the characteristics of mineral assemblage, the fluid migration and fluid role related to uranium mineralization were discussed.



ABSTRACT

BACKGROUND: As an epigenetic deposit dominated by supergene fluid, a sandstone type uranium deposit has many low-temperature minerals. In recent years, the Pengyang uranium deposit, a deep sandstone type uranium deposit, has been discovered in the southwest edge of the Ordos Basin, China. The deposit has the characteristics of large sand body scale, wide uranium mineralization area, large thickness and high grade. Many low-temperature altered minerals have developed, including calcite, gypsum, pyrite, and clay minerals. It is of great significance to study the spatial distribution characteristics of minerals and their relationship with uranium minerals to identify the main sources and properties of ore-forming fluids and their controlling on uranium mineralization. Near-infrared core spectral scanning technology can identify layered silicate minerals such as kaolinite, montmorillonite, sericite, and sulfate minerals such as gypsum and alunite, and carbonate minerals such as calcite and dolomite.

OBJECTIVES: To study the distribution characteristics of minerals and their relationship with uranium mineralization.

METHODS: Core samples were scanned by VNIR-SWIR spectroscopy core scanning system and analyzed by TSG 8.0. In addition, the microscopic occurrence characteristics of minerals related to uranium minerals were observed by scanning electron microscopy.

RESULTS: Minerals such as kaolinite, montmorillonite, illite, chlorite, carbonate, gypsum, and iron oxide were identified in the Luohe Formation. The mineral assemblage of uranium ore section was “illite+gypsum+carbonate”, and minor kaolinite was present locally.

CONCLUSIONS: The uranium-bearing section of the Luohe Formation is mainly a set of alkaline environments in the sedimentary period. However, there is also an injection of reducing acid fluid in the metallogenic period.

KEY WORDS: sandstone type uranium ore; Pengyang uranium deposit; near infrared spectrum scanning; reflection spectrum; scanning electron microscope