

张然, 叶丽娟, 党飞鹏, 等. 自动矿物分析技术在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿物鉴定和赋存状态研究中的应用[J]. 岩矿测试, 2021, 40(1): 61 - 73.

ZHANG Ran, YE Li - juan, DANG Fei - peng, et al. Application of Automatic Mineral Analysis Technology to Identify Minerals and Occurrences of Elements in Sandstone - type Uranium Deposits in the Ordos Basin [J]. Rock and Mineral Analysis, 2021, 40(1): 61 - 73.

【DOI: 10.15898/j.cnki.11-2131/td.202005130071】

自动矿物分析技术在鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿物鉴定和赋存状态研究中的应用

张然^{1,2}, 叶丽娟^{1,2}, 党飞鹏³, 肖志斌^{1,2*}, 毕君辉^{1,2}, 周晶⁴, 郭虎^{1,2}, 许雅雯^{1,2}, 耿建珍^{1,2}, 周红英^{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;
3. 核工业二七〇研究所, 江西 南昌 330200;
4. 河南省岩石矿物测试中心, 河南 郑州 450012)

摘要: 鄂尔多斯盆地是我国重要的砂岩型铀矿成矿区之一。铀矿物赋存状态研究对砂岩型铀矿的成因认识、找矿勘查及选冶开采具有重要意义,但其矿物组成复杂,铀矿物粒度细小、种类繁多且赋存状态多样,致使研究初始的鉴定阶段就存在难点。目前普遍使用放射性照相法和电子探针(EMPA)两种方法开展铀矿物鉴定分析工作。放射性照相可一次性得到光片中所有铀矿物赋存位置、赋存状态和放射性形态,但无法鉴定矿物种类,耗时较长且需在暗室中进行;电子探针可得到铀矿物背散射图像和各元素含量,但在高倍数下薄片中寻找含量少、粒度小的铀矿物费时费力,并且在黑白背散射图像中无法快速判断伴生矿物种类。本文以鄂尔多斯盆地北缘-南缘-西缘砂岩型铀矿为研究对象,将自动矿物分析系统(AMICS)运用于砂岩型铀基础研究,结合扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)鉴定出研究区铀矿物有铀石、晶质铀矿、沥青铀矿和硅钙铀矿,黄铁矿和钛氧化物与铀矿物关系密切,识别出其他伴生矿物还有石英、金红石、长石、云母、高岭石等。本文建立的AMICS-SEM-EDS分析方法,实现了铀矿物及其共生矿物组合的快速识别鉴定和赋存状态研究。

关键词: 自动矿物分析系统; 能谱分析; 砂岩型铀矿; 矿物鉴定; 铀矿物赋存状态; 鄂尔多斯盆地

要点:

- (1) AMICS-SEM-EDS技术联用快速查找鉴定铀矿物并探究其赋存状态、矿石矿物组成及嵌布关系。
- (2) 鄂尔多斯盆地铀矿物包括铀石、沥青铀矿、晶质铀矿和硅钙铀矿,盆地北缘以铀石为主,西缘、南缘以沥青铀矿为主。
- (3) 铀矿物常与黄铁矿紧密伴生,赋存于金红石、石英、长石等矿物边缘或晶隙中。

中图分类号: P619.14; P575.4 **文献标识码:** A

砂岩型铀矿是一种具有重要工业价值的铀矿类型^[1],具有规模大、埋藏浅、开采成本低等特点^[2-3],是我国目前铀矿资源勘查开发的主要矿床类型。

详细研究砂岩型铀矿矿物学岩石学特征、矿物共生组合关系和铀矿物赋存状态特征,对成因探究及找矿勘探具有重要意义,也可为该类型矿床的选冶开

收稿日期: 2020-05-13; 修回日期: 2020-07-03; 接受日期: 2020-10-08

基金项目: 国家重点研发计划深部矿产资源勘查增储应用示范重点专项项目(2018YFC0604200); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2015CB453000); 中国地质调查局地质调查项目(12120115013501, DD20190121)

作者简介: 张然, 硕士, 助理工程师, 主要从事成因矿物学与找矿矿物学研究。E-mail: rayna_zhang@126.com。

通讯作者: 肖志斌, 硕士, 工程师, 地球化学专业, 主要从事同位素地质年代学研究。E-mail: zhibin_xiao@163.com。

采及资源评价提供依据。

砂岩型铀矿中铀矿物粒度细小,赋存形式多样,因此很难准确地对矿床中铀矿物赋存状态进行全面系统的研究。目前主要采用放射性照相和电子探针两种分析手段,前者可一次性得到光片中所有铀矿物位置、形态及分布特征等信息,并可由此推断其矿物种类以及在光片中的大致含量,是早期铀矿物研究的主要手段,但该方法需要在暗室中进行曝光,再根据径迹形态特征对放射性元素进行定性定量解释^[4];后者可以通过背散射图像详细观察铀矿物形态特征及其与其他矿物的接触关系,并可获得详细的元素含量数据,但该方法需要分析人员在高倍数背散射图像下对整个样品逐区扫描、寻找疑似铀矿物,再结合能谱、波谱数据判断矿物种类和共生矿组合^[5],且在黑白的背散射电子图像下只能通过亮度区分矿物,极容易忽略亮度相近但成分不同的矿物。矿物自动定量分析系统是一套基于扫描电镜的软件^[6],可对样品自动进行扫描、测量和统计^[7],目前常见的矿物自动定量分析系统有 AMICS、MLA、QSMSCAN 等^[8]。AMICS 是被广泛应用的矿物自动识别和表征系统,数据库超过 2000 种矿物,测试过程时间短、能量消耗少、测试精度较高,主要应用于矿床和工艺矿物学研究^[6,9]。

本文运用 AMICS 系统,与扫描电镜(SEM)、能谱仪(EDS)相结合,对鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床

的铀矿物种类和赋存状态进行研究,并由此建立了一套 AMICS - SEM - EDS 原位分析技术,实现了矿石矿物的快速识别与鉴定,查明了研究区铀矿物类型和其他伴生矿物,为砂岩型铀矿的基础研究提供技术方法支撑。

1 地质背景

鄂尔多斯盆地是一个古生代地台及台缘拗陷与中生代台内拗陷叠合的克拉通盆地^[10-11],蕴含丰富的铀、石油、天然气等多种能源矿产,北起伊盟隆起,南至渭北隆起,西自西缘逆冲带,东达晋西挠褶带(图 1),跨陕、甘、宁、蒙、晋 5 省(区)^[12]。鄂尔多斯地区的基底岩系具有明显的双层结构,结晶基底由太古界及下元古界的麻粒岩相、角闪岩相的变质岩和混合花岗岩组成;基底岩系之上的沉积盖层各时代地层发育全、沉积类型多、旋回性明显,其中三叠系、侏罗系和白垩系下统是盆地沉积盖层的主体^[13-16],铀矿化主要在中侏罗直罗组^[17-18],铀矿化受灰绿色-灰色砂岩控制,矿(化)体位于二者过渡部位近灰色砂体一侧,以层状、板状为主^[19-20]。盆地构造及演化控制了含铀岩系、容矿砂体和成矿深度^[21-22],铀是在同一成岩动力作用和相似物化条下逐步富集成矿的^[23-24],同位素年代学研究数据表明,鄂尔多斯盆地铀成矿时代具有多期多阶段性,

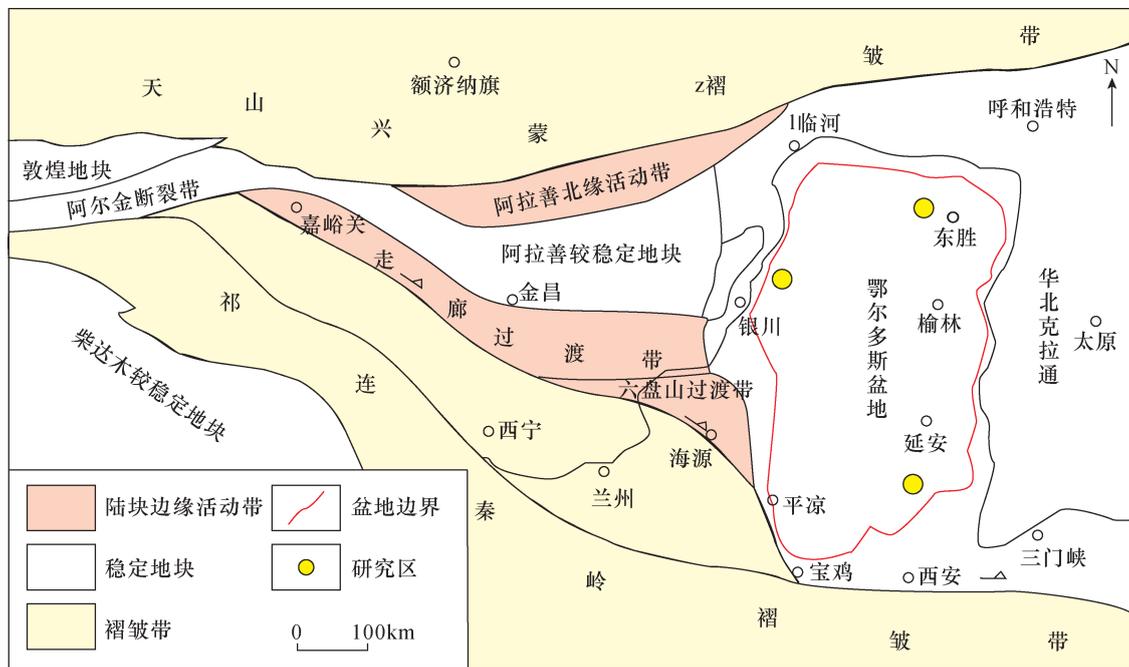


图 1 鄂尔多斯盆地构造纲要及研究区位置图(据刘池洋等,2005 修改)

Fig. 1 Regional structure and study area location map of Ordos Basin (According to Liu, et al., 2005)

且多期成矿作用通常相互叠加^[25-27]。

鄂尔多斯盆地从边缘到中心,含铀砂岩的颜色呈现红-绿-灰垂直分带现象^[28]。本次所采集的赋矿砂体主要为浅绿色-灰色中粗粒杂砂岩、灰色细粒砂岩,还有部分为紫红色粉砂岩、砂质泥岩和含碳砂岩。赋矿砂岩的矿物成分主要为石英、钾长石、斜长石以及岩屑,还含有黄铁矿、金红石、钛铁矿、云母、细粒黏土矿物和碳质碎屑等,填隙物主要为泥质、碳质物,还含有少量黄铁矿等金属矿物。

2 实验部分

2.1 样品采集与制备

鄂尔多斯盆地是我国砂岩型铀矿勘查和研究的热点地区,具有铀矿化分布广泛、绕盆地边缘产出、矿化层位较多且分布不均、铀矿物种类较多等特点^[29]。盆地北缘含矿砂岩主要为灰色-灰绿色岩屑长石石英砂岩,云母含量较高(5%~8%),接触胶结为主,该地区铀矿物类型以铀石为主,还有少量沥青铀矿^[30];盆地南缘含矿砂岩以灰色、灰绿色长石石英砂岩,黄铁矿及有机质含量较高,多为泥质胶结,局部钙质胶结,铀矿物类型以晶质铀矿、沥青铀矿为主,含少量铀石和硅钙铀矿^[31];盆地西缘宁东地区蚀变分带明显,含矿砂岩主要为绿灰色中粗粒砂岩,铀矿物主要有沥青铀矿、铀石和少量胶磷矿^[32]。

本次样品主要采集于鄂尔多斯盆地北缘的塔然高勒(样品号 15EE-01、16NM01、16NM02),南缘的黄陵(样品号 16HL01),西缘宁东地区(样品号 16NX01-02),如图 1 所示。北缘地区样品主要为浅灰色-灰绿色中粗粒砂岩,南缘多为灰色含炭屑中砂岩,部分样品含黄铁矿及有机质条带,西缘主要为灰色、绿灰色中-粗粒长石石英砂岩,可见炭屑及黄铁矿等还原介质。

选取不同地区具有代表性的样品磨制探针片 103 件,并对全部探针片进行表面喷碳处理以增加样品导电性。

2.2 实验仪器和测试条件

本文主要的实验分析工作在河南省岩石矿物测试中心完成。测试系统包括一台德国蔡司的 MERLIN Compact 场发射扫描电镜、一台德国布鲁克 XFlash6160 电制冷能谱仪以及 AMICS 矿物自动定量分析软件系统。运用 AMICS 系统识别鉴定矿石矿物,实验条件为:加速电压 12kV,工作距离 10.2mm,物镜光栏 60 μ m,高真空模式。随后通过

AMICS 系统驱动扫描电镜到达选定区域进行局部放大观察并拍照,利用能谱仪获得制定矿物元素含量,实验条件为激发电压 20kV,工作距离 8.5~11.8mm,点分析采集时间达到 250kcps 自动停止,高真空模式。

后期电镜赋存状态研究与电子探针定量分析是在中国地质调查局天津地质调查中心完成的。使用库塞姆 EM-30Plus 台式电镜,在高倍数下观察铀矿物形态、粒度及嵌布特征,加速电压为 20kV,工作距离 10.8mm,高真空模式;利用岛津公司 EPMA-1600 电子探针,对通过 AMICS 系统识别的矿物进行定量分析,以验证 AMICS 系统识别的准确性,加速电压为 15kV,束流 20nA,束斑直径 5 μ m,采用 ZAF 法校正。

2.3 实验方法

样品经表面喷碳处理后置于扫描电镜样品室,在高真空模式下调节并进行观察。首先,整体观察。在较小倍数下运用 AMICS 软件扫描矿石薄片,识别并鉴定矿石矿物组成及分布特征,查找铀矿物并确定其位置。此步单次扫描范围较广,重点在于整体把握岩石薄片情况,在测试中通常会出现局部信息缺失,但若缺失部分不影响整体观察,可不必在此步耗费大量时间调节参数设置。

第二步,局部扫描。选取铀矿物所在位置或其他感兴趣区域,运用 AMICS 系统驱动电镜到达制定位置,在高倍数背散射图像下仔细观察铀矿物赋存特征,用能谱详细分析铀矿物元素种类和含量,用 AMICS 系统获得伴生矿物组成及相互关系。此步骤需根据样品特征精确调试 AMICS 相关测试参数,在测试过程中若出现“未识别”或“计数率低”等情况需不断尝试不同参数值,直到找到适合该区域的参数范围,从而获得更加精准的数据和图像。

最后,综合对比 AMICS 面分析图、背散射电子图和能谱数据,获得矿石矿物组成及其嵌布关系、铀矿物种类及其赋存特征等信息,对关键矿物再运用电子探针进行进一步确认。

3 结果与讨论

3.1 铀矿物赋存状态特征

砂岩型铀矿床中铀矿物主要赋存于矿化砂岩的填隙部位,部分以分散形式被黏土矿物、碎屑物或矿物颗粒表面或裂隙吸附^[33]。利用扫描电镜和 AMICS 技术对鄂尔多斯北缘、南缘地区样品铀矿物及其共生组合进行观察、识别,发现几个地区铀矿物

赋存状态特征整体较为一致,以独立铀矿物为主,多与黄铁矿、金红石、石英、长石等共生。

首先,空间上,铀矿物主要赋存于矿化砂岩的裂隙部位、碎屑物或矿物的孔洞和解理中,或矿物颗粒的晶隙或边缘部位(图 2a, b),部分以分散形式存在的铀矿物被砂岩缝隙中的黏土矿物、碎屑物等吸附^[34]。

其次,形态上,研究区铀矿物主要以隐晶质集合体的形式产出,集合体通常在几十到几百微米不等,多以皮壳状(图 2c)、星点状或球粒状(图 2d)、网脉状(图 2e)、不规则状等形式产出;铀矿物内部或边

缘常见不规则状干裂纹,球粒状、皮壳状集合体内部则经常可见同心或韵律条环带,这主要与矿物沉积间断有关^[35]。铀矿物晶体非常细小且很少能见到,主要呈显微粒状、棱角状,他形,独立分布在其他矿物晶隙中(图 2f),粒度在 1 ~ 30 μm 不等,仅在电子显微镜下可见,在背散射图像下亮度明显高于周围其他矿物,内部则较为均一。

在矿物共生组合方面,利用 AMICS 系统分析得到的图像上可以看出,研究区与铀矿物共生的矿物主要有石英、黄铁矿、金红石、钾长石、斜长石、黑云

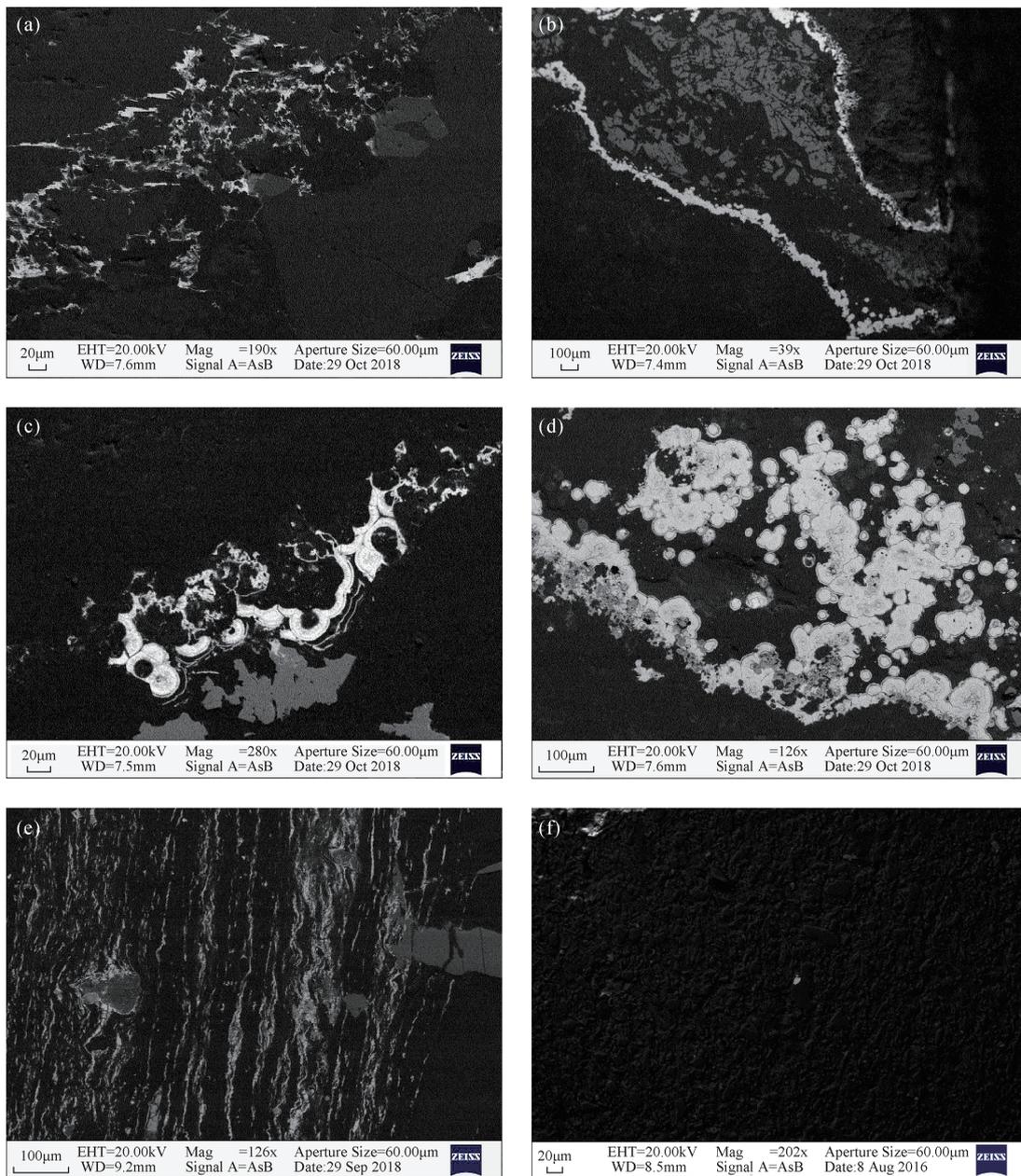


图2 铀矿物背散射电子图像

Fig. 2 Backscatter electron diagrams of uranium minerals

母、方解石、钛铁矿、高岭石等。其中铀矿物与黄铁矿关系密切^[36],总是分布在黄铁矿边缘以及内部的孔洞和裂隙中,有些甚至边界不清,相互穿插(图 3)。金红石也常与铀矿物紧密伴生,关系密切;另外,在石英、长石的晶隙之间也常见铀矿物集合体,铀矿物和这些矿物接触边界清晰,基本无相互穿插现象。

3.2 铀矿物的种类和成分特征

铀矿物是指以铀元素为基本组分的矿物^[1]。本文铀矿物种类和成分信息均通过扫描电镜和能谱仪分析得到,加速电压均为 20kV。对研究区铀矿物进行能谱点分析,得到谱图及元素百分比,整理发现研究区铀矿物种类较多,成分方面均以 O、Si、U 等元素为主但不同类型矿物含量差别明显,并且常常含有 Th、V、Ti、S、Ca 等元素(图 4 和图 5)。本次样品中发现的铀矿物包括有铀石、沥青铀矿、晶质铀矿、硅钙铀矿和其他含铀矿物。

3.2.1 铀石

铀石是铀矿床中较为常见的原生铀矿物,理想

化学式为 $U[SiO_2]_{1-x}(OH)_{4x}$,四方晶系^[37-39],晶体呈短柱状或粒状,集合体呈放射状、晶簇状、星点状等。铀石常与沥青铀矿在成矿过程中交替形成,且不十分稳定,易转化为沥青铀矿^[39-40]。铀石是鄂尔多斯盆地常见的铀矿物类型^[14,19]。

本工作中,铀石多出现在鄂尔多斯盆地北缘的样品中,主要以集合体的形式存在,分布范围较为广泛,可达几百微米,呈晶簇状、放射状等,与金属硫化物主要是黄铁矿紧密伴生,赋存在黄铁矿内部空洞、边缘或粒间晶隙中,其他伴生矿物主要有长石、石英、绢云母和独居石等(图 4a)。能谱分析得到铀石的平均化学组成为: O 32.29%, U 53.17%, Si 13.86%, Na 0.68%。

3.2.2 沥青铀矿

沥青铀矿又称非晶质铀矿,是晶质铀矿的变种。理想化学式为 $(U^{4+}, U^{6+})O_2$,沥青黑色,等轴晶系^[37],常呈肾状、钟乳状、鲕粒状和细脉状等^[38-39]。

盆地南缘和西缘的样品中沥青铀矿更为常见^[29],以胶状集合体的形式分布于矿物边缘,有时

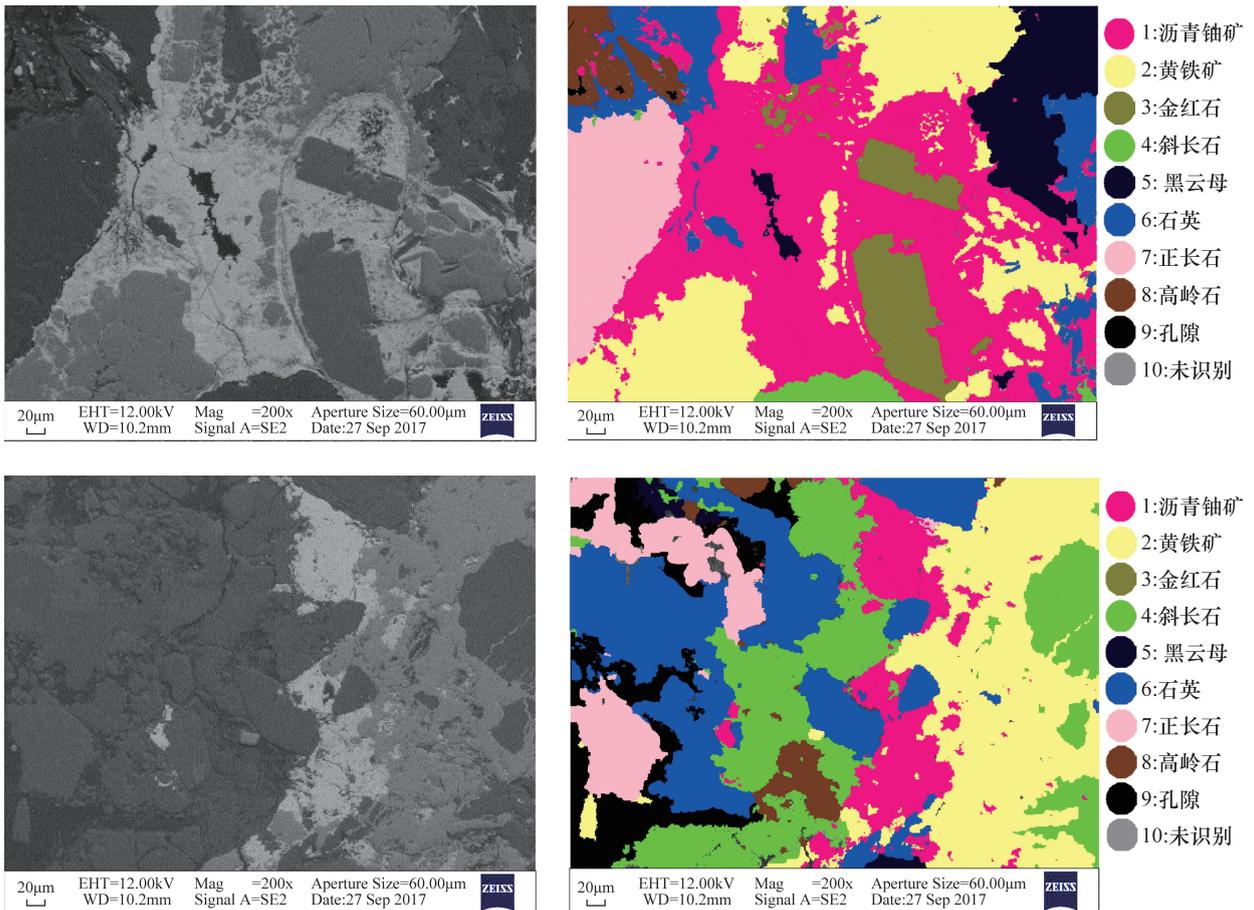
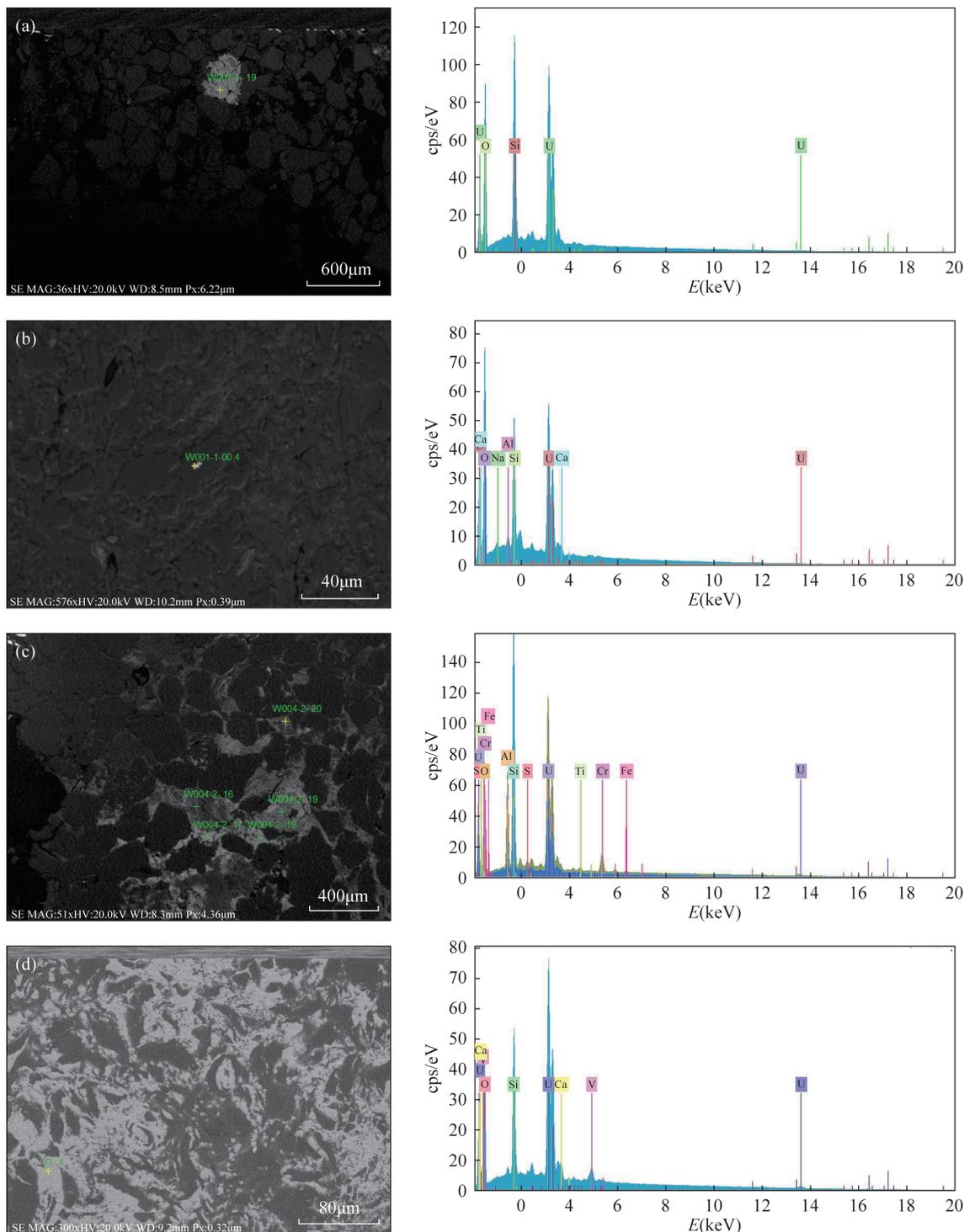


图 3 沥青铀矿及其共生矿物组合背散射电子图像和 AMICS 分析图像

Fig. 3 Backscattered electron images and AMICS diagrams of uraninite and its association minerals

作为胶结物分布在石英、长石的颗粒间。沥青铀矿在北缘样品中经常与铀石、黄铁矿密切共生,三者成分差异很大,在背散射图像显示出来的亮度有明显区别:沥青铀矿最亮,呈亮灰白色,铀石亮度相对较

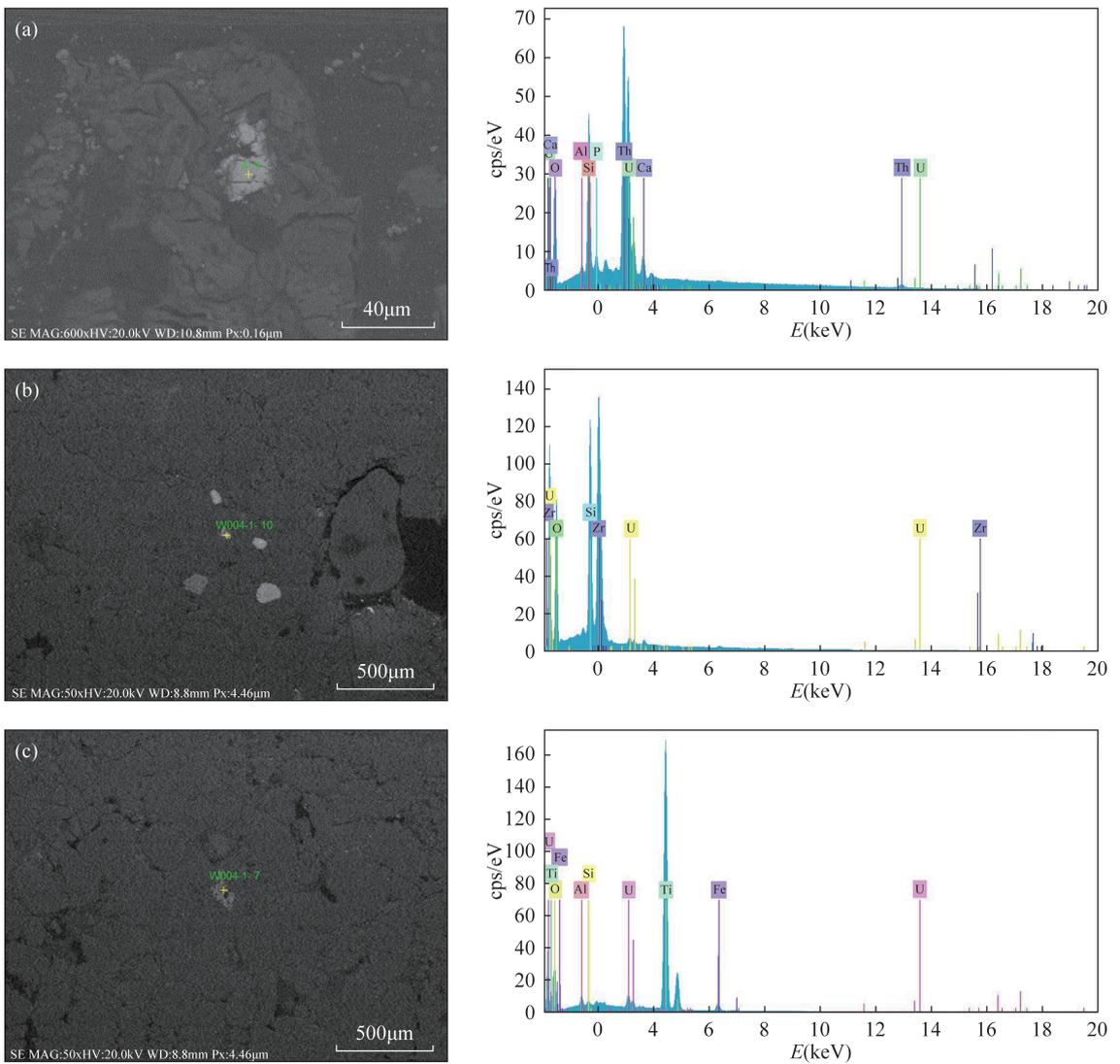
弱^[35],呈浅灰色,而黄铁矿亮度最小,呈深灰色。三者经常相互掺杂,边界模糊(图 4c)。沥青铀矿成分中主要元素的平均含量为:U 13.28%,O 69.11%,Si 12.60%,Al 3.91%,Ti 0.59%,Fe 0.51%。



a—铀石; b—晶质铀矿; c—沥青铀矿; d—硅钙铀矿。

图 4 四种铀矿物背散射电子图像和能谱图像

Fig.4 Backscattered electron images and energy dispersive spectrometer diagrams of four uranium minerals



a—钍石; b—钍石; c—金红石。

图 5 三种铀矿物背散射电子图像和能谱图像

Fig. 5 Backscattered electron images and energy dispersive spectrometer diagrams of three uranium minerals

3.2.3 晶质铀矿

晶质铀矿理想化学成分为 UO_2 ^[37], 晶体属等轴晶系的氧化物矿物, 晶形呈立方体或八面体^[38-39], 一般呈他形细粒状产出。样品中晶质铀矿含量较少, 通常以粒状或粒状集合体的形式出现, 与黄铁矿关系密切, 部分可见赋存于石英、长石的颗粒周围以及裂隙间, 粒度通常在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 左右, 他形粒状或不规则棱角状(图 4b); 能谱得到成分中主要元素的平均含量为: O 36.36%, U 53.21%, Si 7.65%, Na 0.99%, Ca 1.17%, Al 0.62%。

3.2.4 硅钙铀矿

硅钙铀矿化学式为 $\text{Ca}[\text{UO}_2(\text{SiO}_3\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}]$, 单斜晶系^[37-39], 晶体呈针状或长柱状, 集合

体呈放射状、纤维状、薄膜状或致密块状^[35,40]。

硅钙铀矿大量发现于鄂尔多斯盆地南缘的样品中^[28], 主要呈他形, 单矿物颗粒在几微米到几十微米不等, 但集合体分布范围较为广泛, 这些集合体在石英等矿物的表面及裂隙中呈网脉状、脉状、星点状、毛刺状等分布, 局部与黄铁矿紧密共生(图 4d)。能谱分析显示硅钙铀矿主要元素的平均含量为: O 22.60%, U 65.14%, Si 8.38%, V 1.23%, Ca 1.92%, Na 0.73%。

3.2.5 其他含铀矿物

除铀矿物外, 本次样品中还发现大量含铀副矿物, 铀元素以类质同象形式^[5]赋存于钍石、锆石、金红石等矿物中。

(1) 钍石。钍石的化学组成为 $\text{Th}[\text{SiO}_4]$, 晶体属四方晶系的岛状结构硅酸盐矿物^[38], 钍石的成分变化很大, 钍可以被铀、钙、稀土等类质同象代替^[39]。样品中发现的含钍钍石呈他形粒状, 赋存在石英的裂隙间, 被石英包裹, 粒度在 $20\mu\text{m}$ 左右, 颗粒破碎严重、裂隙较多, 在背散射图像下亮度明显高于其他不含钍矿物。能谱分析显示其主要元素有 Th、O、Si、U, 还有少量 P、Ca 等(图 5a)。

(2) 锆石。锆石的化学组成为 $\text{Zr}[\text{SiO}_4]$, 晶体属四方晶系的岛状结构硅酸盐矿物^[38], 有时含有 Th、U、Ti、Mn、Ca、Fe 等元素。样品中锆石主要呈他形粒状, 粒度几微米到几十微米不等, 能谱分析显示, 其主要元素为 Zr、O、Si, 有时还有少量 Al、Ca 等(图 5b), 钍元素含量在 0.3% ~ 1.5% 之间。

(3) 金红石。金红石的成分均为 TiO_2 , 类质同象替代有 Fe、Th、U 等元素。样品中金红石呈他形粒状, 背散射下亮度略高于其他不含钍矿物, 但比钍矿物亮度低。主要元素有 Ti、O、Fe, 还有少量 Al, 钍元素含量在 0.3% ~ 1.2% 不等, 普遍高于普通金红石中钍元素的含量(图 5f)。

3.3 鄂尔多斯盆地北-南-西缘钍矿物赋存状态异同

研究发现, 鄂尔多斯盆地北缘、南缘和西缘常见的钍矿物均为沥青铀矿和钍石, 钍矿物普遍与黄铁矿和钛氧化物紧密共生, 但不同地区钍矿物赋存状态也存在差异。盆地北缘矿物类型与其他两地略有不同, 钍矿物以钍石为主, 而沥青铀矿含量较少。扫描电镜观察到钍石主要呈晶簇状或粒状集合体形式出现, 主要赋存于碎屑颗粒填隙部位, 与黄铁矿、金红石、长石、石英、黏土矿物等伴生。盆地南缘以沥青铀矿为主, 钍石次之, 还有部分硅钙钍矿。沥青铀矿主要呈胶状, 赋存于碎屑颗粒边缘形成镶边结构, 尤其是黄铁矿边缘, 常见的伴生元素有 V、Se、S 等。盆地西缘以沥青铀矿为主, 其次为钍石, 伴生矿物主要有黄铁矿、石英、方解石、锐钛矿等。

综上, 鄂尔多斯盆地钍矿物以沥青铀矿和钍石为主, 还可见少量硅钙钍矿、晶质钍矿等, 伴生矿物主要为黄铁矿、钛氧化物等。中国北方其他大型砂岩型钍矿还有二连盆地、松辽盆地等, 二连盆地钍矿物有沥青铀矿、钍石、钍的磷酸盐等, 与鄂尔多斯盆地钍矿物种类较为相似^[41], 而松辽盆地多为钍石和富钍-铁钛氧化物, 与鄂尔多斯盆地地区区别较大^[42]。

3.4 钍矿物常用分析方法在实际应用中的优势与不足

砂岩型钍矿中的钍矿物通常粒度细小, 赋存于裂隙、孔洞中, 形态复杂多样, 分布较为分散, 因此在进行钍矿物赋存状态研究中, 寻找钍矿物并鉴定其类型、查明矿物共生组合需结合多种测试手段^[30]。本文对同一批样品分别采用目前钍矿物赋存状态研究中经常使用的几种测试方法进行测试, 通过实际操作对比了这些方法的优势与不足。

首先是放射性照相法。该方法是将光片粘贴在胶片上, 在暗室中接受钍矿物辐照, 一段时间后取出底片冲洗, 根据成像特征获取钍矿物所在位置赋存状态。实验中发现, 放射性照相通常在光片上进行, 薄片成像的效果较差; 放射性照相必须在暗室中进行, 整个实验周期在 30 ~ 40 天左右; 实验可以得到钍矿物赋存位置、赋存形态和放射性形态, 但无法得到具体矿物种类以及伴生矿物组合, 还需要配合较长时间的光学显微镜和电子探针进行鉴定, 分析时间及经济成本较高。

然后是电子探针法。首先利用背散射图像, 在高倍数下人为逐区蛇形扫描薄片, 寻找亮度较高的矿物再结合能谱快速获得元素种类及含量, 从而鉴定其矿物类型, 随后选点进行波谱分析。能谱可准确地对含量达千分之一的元素进行分析, 每个点分析时长仅需不到 1min; 波谱分析精度较高, 能准确对含量达万分之一的元素进行分析。通常, 在 200 ~ 300 倍下扫描一个薄片需 3h 左右(无论该薄片是否有钍矿物), 若还需进行波谱点分析, 则每个点分析时间在 20min 左右。该方法可以得到精美的钍矿物背散射照片以及较为精确的元素含量, 但在黑白的背散射图像下, 只能通过亮度来判断矿物种类的差异, 容易忽略画面中亮度相同但种类不同的矿物, 无法准确获得矿物伴生组合, 后期还需光学显微镜辅助。

AMICS 系统软件可以驱动扫描电镜, 结合能谱仪可以实现测试样品所选区域自动位移扫描并同时采集不同物相的 X 射线能谱数据, 根据 AMICS 矿物标准库的 X 射线能谱信息进行物相鉴定, 通过计算机自动拟处理, 可以帮助研究者快速、直观、准确地获得被测样品所选区域矿物种类、嵌布特征、形态、粒度、元素含量等信息^[7-8]。首先, 整体快速扫描, 在较小倍数下运用 AMICS 软件扫描矿石薄片, 识别矿石矿物组成及分布特征, 查找钍矿物并确定其位置。此过程每个薄片需 30min 左右, 若未找到钍矿

物,则直接进行下一个薄片。若发现研究对象,则进行下一步局部精细扫描:选取感兴趣区域,运用 AMICS 系统驱动电镜到达指定位置,在高倍数背散射图像下仔细观察铀矿物赋存特征,能谱详细分析铀矿物元素种类和含量,AMICS 系统获得伴生矿物组成及相互关系。此过程仪器自动扫描,测试时长与目标区域矿物复杂程度有关,一般在 30min ~ 3h 不等。

AMICS - SEM - EDS 分析技术联用可以同时获得物相信息和元素含量,且仅需在配有能谱仪和 AMICS 软件系统的扫描电镜下,就能完成对各矿物总体形貌、类型等观察并拍摄背散射图像,从而清楚、直观地识别出各铀矿物的形态、空间分布以及与其他矿物的共存关系,亦可以同时获得铀矿物的各项元素分析数据,较大地提高了工作效率。在实际测试中,有时由于样品表面不够平整或参数设置等问题,会导致局部信息无法识别或计数率低,一般会有 1% ~ 5% 的未知物相无法定名和归类^[43]。因此需要根据不同类型的样品选择不同的测试参数,在测试过程中根据所出现的问题及时调整,从而找到适合被测样品的参数范围,以求获得更加精准的数据和图像。另外,由于 AMICS 系统基于计算机软件的分析计算,遇到复杂的矿物边缘或细小的矿物时通常会存在一定误差,因此需要我们在研究中综合对比 BSE 图像和 AMICS 图像,从而获得更为准确的结论。在未来的研究中,可进一步探究 AMICS 参数设置对不同样品分析数据和图像的影响,以获得更加精准的数据和图像。

4 结论

本文运用自动矿物分析系统 - 扫描电镜 - 能谱相结合的原位分析方法,对鄂尔多斯盆地北 - 南 - 西缘砂岩型铀矿的矿石矿物进行了识别、鉴定和赋存状态研究,查明了研究区铀矿物类型包括铀石、沥青铀矿、晶质铀矿和硅钙铀矿,与铀矿物共生的矿物有石英、黄铁矿、金红石、长石、云母、高岭石等。其中铀矿物与黄铁矿关系密切。盆地北缘铀矿物以铀石为主,而西缘、南缘则以沥青铀矿为主。

本文通过 AMICS 整体快速扫描 - 局部观察及能谱分析 - AMICS 精细扫描三个步骤,为砂岩型铀矿基础研究工作提供了一种行之有效的测试方法,建立了 AMICS - SEM - EDS 分析技术,为铀矿物及其共生矿物组合的快速识别鉴定、赋存状态研究以及矿物相扫描提供了一套便捷、高效、可靠的分析方

法。在未来的研究中,可进一步探究 AMICS 参数设置对不同样品分析数据和图像的影响,找到适合砂岩型铀矿分析的合适参数范围,以获得更加精准的数据和图像。该方法在铀矿床矿物学、岩石学等基础研究中有望得到更广泛的应用,并可在其他不透明金属矿物研究中进行推广。

5 参考文献

- [1] 邢秀娟,柳益群,樊爱萍. 鄂尔多斯盆地店头地区砂岩型铀矿成因初步探讨[J]. 中国地质,2006,33(3): 591 - 597.
Xing X J, Liu Y Q, Fan A P. Genesis of sandstone - type uranium deposits: A case study in the Diantou Area of the Ordos Basin [J]. *Geology in China*, 2006, 33 (3): 591 - 597.
- [2] 吴仁贵,祝民强,余达淦,等. 沉积体系分析与底河道型砂岩铀矿成矿条件讨论:以鄂尔多斯中生代盆地北部东胜地区为例[J]. 矿床地质,2002,21(A1): 878 - 880.
Wu R G, Zhu M Q, Yu D G, et al. Analyses of depositional system and studies on metallogenic condition of basal - channel sandstone uranium deposit [J]. *Mineral Deposits*, 2002, 21 (A1): 878 - 880.
- [3] 陈路路,冯晓曦,司马献章,等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟地区铀矿物赋存形式研究及其地质意义[J]. 地质与勘探,2017,53(4): 632 - 642.
Chen L L, Feng X X, Sima X Z, et al. Occurrence forms of the uranium minerals in the Nalinggou Area of the Ordos Basin and geological implications [J]. *Geology and Exploration*, 2017, 53 (4): 632 - 642.
- [4] 李泽明,李占春,张振强,等. 河北青龙县四三三铀矿田围岩蚀变岩石学特征研究[J]. 东华理工大学学报(自然科学版),2020,43(1): 48 - 54.
Li Z M, Li Z C, Zhang Z Q, et al. Petrological features of rock alternation in No. 433 uranium orefield in Qinglong County of Hebei Province [J]. *Journal of East China University of Technology*, 2020, 43 (1): 48 - 54.
- [5] 高飞,庞雅庆,赵琳,等. 诸广长江地区花岗岩型铀矿铀矿物赋存状态研究[J]. 铀矿地质,2015,31(A1): 330 - 335.
Gao F, Pang Y Q, Zhao L, et al. Study on occurrence of uranium mineral in Changjiang granite - type uranium deposits of Zhuguang [J]. *Uranium Geology*, 2015, 31 (A1): 330 - 335.
- [6] 温利刚,曾普胜,詹秀春,等. 矿物表征自动定量分析系统 (AMICS) 技术在稀土稀有矿物鉴定中的应用[J]. 岩矿测试,2018,37(2): 121 - 129.

- Wen L G, Zeng P S, Zhan X C, et al. Application of the automated mineral identification and characterization system (AMICS) in the identification of rare earth and rare minerals [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018, 37 (2): 121 - 129.
- [7] 方明山, 王明燕. AMICS 在铜矿伴生金银综合回收中的应用 [J]. *矿冶*, 2018 (3): 104 - 108.
- Fang M S, Wang M Y. Application of AMICS in comprehensive recovery of associated gold and silver in a copper ore [J]. *Mining & Metallurgy*, 2018 (3): 104 - 108.
- [8] 李波, 梁冬云, 张莉莉, 等. 自动矿物分析系统的统计误差分析 [J]. *矿冶*, 2018, 27 (4): 120 - 123.
- Li B, Liang D Y, Zhang L L, et al. The statistical deviation analysis of automatic process mineralogy analysis system [J]. *Mining & Metallurgy*, 2018, 27 (4): 120 - 123.
- [9] 王明燕, 肖仪武, 祁小军. 刚果(金)某氧化铜钴矿工艺矿物学特性及对浸出工艺的影响 [J]. *矿产保护与利用*, 2020 (1): 118 - 123.
- Wang M Y, Xiao Y W, Qi X J. Process mineralogy and its influence on metallurgy technology of a copper - cobalt oxidized ore in Congo (DRC) [J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2020 (1): 118 - 123.
- [10] 狄永强. 试论鄂尔多斯北部中生代盆地砂岩型铀矿找矿前景 [J]. *铀矿地质*, 2001, 18 (6): 340 - 347.
- Di Y Q. Preliminary discussion on prospecting potential for sandstone - type uranium deposits in Mesozoic - Cenozoic basins, northern Ordos [J]. *Uranium Geology*, 2001, 18 (6): 340 - 347.
- [11] Jin R S, Miao P S, Sima X Z, et al. Structure styles of mesozoic - cenozoic U - bearing rock series in northern China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2016, 90 (6): 2104 - 2116.
- [12] 杨晓勇, 罗贤冬, 凌明星, 等. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿床地球化学特征及其地质意义 [J]. *地质论评*, 2008, 54 (4): 539 - 549.
- Yang X Y, Luo X D, Ling M X, et al. Geochemical features of sandstone - type uranium deposits in the Ordos Basin and their geological significances [J]. *Geological Review*, 2008, 54 (4): 539 - 549.
- [13] 苗培森, 李建国, 汤超, 等. 中国北方中生代盆地深部砂岩铀矿成矿条件与找矿方向 [J]. *地质通报*, 2017, 36 (10): 1830 - 1840.
- Miao P S, Li J G, Tang C, et al. Metallogenic condition and prospecting orientation for deep sandstone - hosted uranium deposits in Mesozoic - Cenozoic basins of North China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36 (10): 1830 - 1840.
- [14] 杨晓勇, 凌明星, 赖小东. 鄂尔多斯盆地东胜地区地浸砂岩型铀矿成矿模型 [J]. *地学前缘*, 2009, 16 (2): 239 - 249.
- Yang X Y, Ling M X, Lai X D. Metallogenic model of the Dongsheng *in-situ* leaching sandstone - type uranium deposit in the Ordos Basin [J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16 (2): 239 - 249.
- [15] Wang Z T, Zhou H R, Wang X L, et al. Characteristics of the crystalline basement beneath the Ordos Basin: Constraint from aeromagnetic data [J]. *Geoscience Frontiers*, 2015, 6: 465 - 475.
- [16] Yang M H, Li L, Zhou J, et al. Segmentation and inversion of the Hangjinqi fault zone, the northern Ordos Basin (North China) [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 70 (71): 64 - 78.
- [17] Cai Y Q, Zhang J D, Li Z Y, et al. Outline of uranium resources characteristics and metallogenic regularity in China [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2015, 89 (3): 918 - 937.
- [18] Bonnetti C, Cuney M, Bourlance S, et al. Primary uranium sources for sedimentary - hosted uranium deposits in NE China: Insight from basement igneous rocks of the Erlian Basin [J]. *Mineralium Deposita*, 2017, 52 (3): 297 - 315.
- [19] 刘晓雪, 汤超, 司马献章, 等. 鄂尔多斯盆地东北部砂岩型铀矿常量元素地球化学特征及地质意义 [J]. *地质调查与研究*, 2016, 39 (3): 169 - 176.
- Liu X X, Tang C, Sima X Z, et al. Major elements geochemical characteristics of sandstone - type uranium deposit in north - east Ordos Basin and its geological implications [J]. *Geological Survey and Research*, 2016, 39 (3): 169 - 176.
- [20] Zhang T F, Sun L X, Zhang Y, et al. Geochemical characteristics of the Jurassic Yan' an and Zhiluo Formations in the northern Margin of Ordos Basin and their paleoenvironmental implications [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2016, 90 (12): 3454 - 3472.
- [21] Gallegos T J, Campbell K M, Zielinski R A. Persistent U(IV) and U(VI) following *in-situ* recovery (ISR) mining of a sandstone uranium deposit, Wyoming, USA [J]. *Applied Geochemistry*, 2015, 63: 222 - 234.
- [22] 刘波, 时志强, 彭云彪, 等. 中国北方兴蒙地区叠合盆地砂岩型铀成矿特征及勘查方法综述 [J]. *地质与勘探*, 2019, 55 (6): 1343 - 1355.
- Liu B, Shi Z Q, Peng Y B, et al. Review on metallogenic characteristics and exploration methods of sandstone - type uranium deposits in superimposed basins in the

- Kingmeng Area, northern China [J]. *Geology and Exploration*, 2019, 55(6): 1343 – 1355.
- [23] Strakhovenko V D, Gas'kova O L. Thermodynamic model of formation of carbonates and uranium mineral phases in lakes Namshi – Nur and Tsagan – Tyrm (Cisbaikalia) [J]. *Russia Geology and Geophysics*, 2018, 59(4): 374 – 385.
- [24] 冯晓曦,滕雪明,何友宇. 初步探讨鄂尔多斯盆地东胜铀矿田成矿作用研究若干问题[J]. *地质调查与研究*, 2019, 36(2): 96 – 103, 108.
Feng X X, Teng X X, He Y Y. Study on land subsidence assessment in evaluation of carrying capacity of geological environment [J]. *Geological Survey and Research*, 2019, 36(2): 96 – 103, 108.
- [25] 肖志斌,耿建珍,涂家润,等. 砂岩型铀矿微区原位 U – Pb 同位素定年技术方法研究[J]. *岩矿测试*, 2020, 39(2): 262 – 273.
Xiao Z B, Geng J Z, Tu J R, et al. *In situ* U – Pb isotope dating techniques for sandstone – type uranium deposits [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2020, 39(2): 262 – 273.
- [26] Xia Y L, Zhang C E. Evolutionary characteristics of the U – Pb isotopic system in a certain uranium deposit in North Guangdong—A discussion on the model for its genesis [J]. *Geochemistry (English Language Edition)*, 1985, 4(3): 257 – 267.
- [27] 肖志斌,张然,叶雨娟,等. 沥青铀矿 (GBW04420) 的微区原位 U – Pb 定年分析[J]. *地质调查与研究*, 2020, 43(1): 1 – 4.
Xiao Z B, Zhang R, Ye L J, et al. *In situ* U – Pb dating of pitchblende (GBW04420) [J]. *Geological Survey and Research*, 2020, 43(1): 1 – 4.
- [28] Jin R S, Yu R A, Yang J, et al. Paleo – environmental constraints on uranium mineralization in the Ordos Basin: Evidence from the color zoning of U – bearing rock series [J]. *Ore Geology Reviews*, 2019(104): 175 – 189.
- [29] 李子颖,秦明宽,蔡煜琦,等. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿作用和前景分析[J]. *铀矿地质*, 2020, 36(1): 1 – 13.
Li Z Y, Qin M K, Cai Y Q, et al. Metallogenic models and prospective analysis of sandstone – type uranium deposits in Ordos Basin [J]. *Uranium Geology*, 2020, 36(1): 1 – 13.
- [30] 谢惠丽,焦养泉,刘章月,等. 鄂尔多斯盆地北部铀矿床铀矿物赋存状态及富集机理[J]. *地球科学*, 2020, 45(5): 1531 – 1543.
Xie H L, Jiao Y Q, Liu Z Y, et al. Occurrence and enrichment mechanism of uranium ore minerals from sandstone – type uranium deposit, northern Ordos Basin [J]. *Earth Science*, 2020, 45(5): 1531 – 1543.
- [31] 朱强,俞弋安,李建国,等. 鄂尔多斯盆地东北部塔然高勒地区还原介质对砂岩型铀矿的控制[J]. *煤田地质与勘探*, 2018, 46(6): 11 – 18.
Zhu Q, Yu N A, Li J G, et al. Control of reducing medium on uranium deposit of sandstone in Tarangaole Area, northeastern Ordos Basin [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2018, 46(6): 11 – 18.
- [32] Miao P S, Jin R S, Li J G, et al. The first discovery of a large sandstone – type uranium deposit in Aeolian depositional environment [J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2020, 94(2): 583 – 584.
- [33] 汤超,魏佳林,肖鹏,等. 松辽盆地北部砂岩型铀矿的赋存状态研究[J]. *矿产与地质*, 2017, 31(6): 1009 – 1016.
Tang C, Wei J L, Xiao P, et al. Research on uranium occurrence state of sandstone – type uranium deposit in the northern Songliao Basin [J]. *Mineral Resources and Geology*, 2017, 31(6): 1009 – 1016.
- [34] 马强,冯志刚,孙静,等. 新疆某地浸砂岩型铀矿中铀赋存形态的研究[J]. *岩矿测试*, 2012, 31(3): 501 – 506.
Ma Q, Feng Z G, Sun J, et al. Study on chemical speciation of uranium in samples from *in situ* leaching sandstone – type uranium deposit in Xinjiang [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2012, 31(3): 501 – 506.
- [35] 闵茂中,吴燕玉,张文兰,等. 铀石 – 沥青铀矿稠密韵律生长环带及其成因意义[J]. *矿物学报*, 1999, 19(1): 15 – 19.
Min M Z, Wu Y Y, Zhang W L, et al. A densely zoned rhythmically intergrowth of coffinite and pitchblende and its genetic significance [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 1999, 19(1): 15 – 19.
- [36] 张莉娟,安树清,徐铁民,等. 鄂尔多斯砂岩型铀矿床中灰绿色砂岩还原能力影响因素研究[J]. *岩矿测试*, 2018, 37(4): 396 – 403.
Zhang L J, An S Q, Xu T M, et al. Study on influencing factors for reduction capacity of gray – green sandstone in Ordos sandstone – type uranium deposits [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2018(4): 396 – 403.
- [37] 张成江,王德荫,傅永全. 铀矿物理学 [M]. 北京:原子能出版社, 2007.
Zhang C J, Wang D Y, Fu Y Q. *Uranium mineralogy* [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2007.
- [38] 王濮. 系统矿物学 [M]. 北京:地质出版社, 1987.
Wang P. *Systematic mineralogy* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.

- [39] 刘青宪. 铀矿物学 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2016.
Liu Q X. Uranium mineralogy [M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2016.
- [40] 段晓华, 张君弟. 鄂尔多斯盆地西南缘砂岩型铀矿赋矿地层及矿化特征 [J]. 铀矿地质, 2019, 35(2): 88-94.
Duan X H, Zhang J D. Stratigraphy and mineralization feature of ore-bearing layer for sandstone-type uranium deposit in the southwestern margin of Ordos Basin [J]. Uranium Geology, 2019, 35(2): 88-94.
- [41] 李伟涛, 李子颖, 李西得, 等. 二连盆地哈达图砂岩型铀矿铀的赋存状态研究 [J]. 铀矿地质, 2020, 36(1): 20-27.
Li W T, Li Z Y, Li X D, et al. Study on uranium occurring state in Hadata sandstone-type uranium deposit in Erlian Basin [J]. Uranium Geology, 2020, 36(1): 20-27.
- [42] 魏佳林, 汤超, 金若时, 等. 松辽盆地北部龙虎泡地区铁钛氧化物与砂岩型铀矿化关系探讨 [J]. 岩石矿物学杂志, 2019, 38(3): 375-389.
Wei J L, Tang C, Jin R S, et al. A study of the relationship between the Fe-Ti oxide and sandstone-hosted uranium mineralization in Longhupao Area, northern Songliao Basin [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2019, 38(3): 375-389.
- [43] 葛祥坤, 范光, 汪波, 等. 自动矿物分析仪用于砂岩型铀矿床矿物组成的定量分析 [M] // 中国核科学技术进展报告 (第五卷), 2017: 586-591.
Ge X K, Fan G, Wang B, et al. Mineral quantitative analysis of sandstone-type uranium ores by automatic mineral quantitative identification system [M] // Progress Report on China Nuclear Science & Technology (Vol. 5), 2017: 586-591.

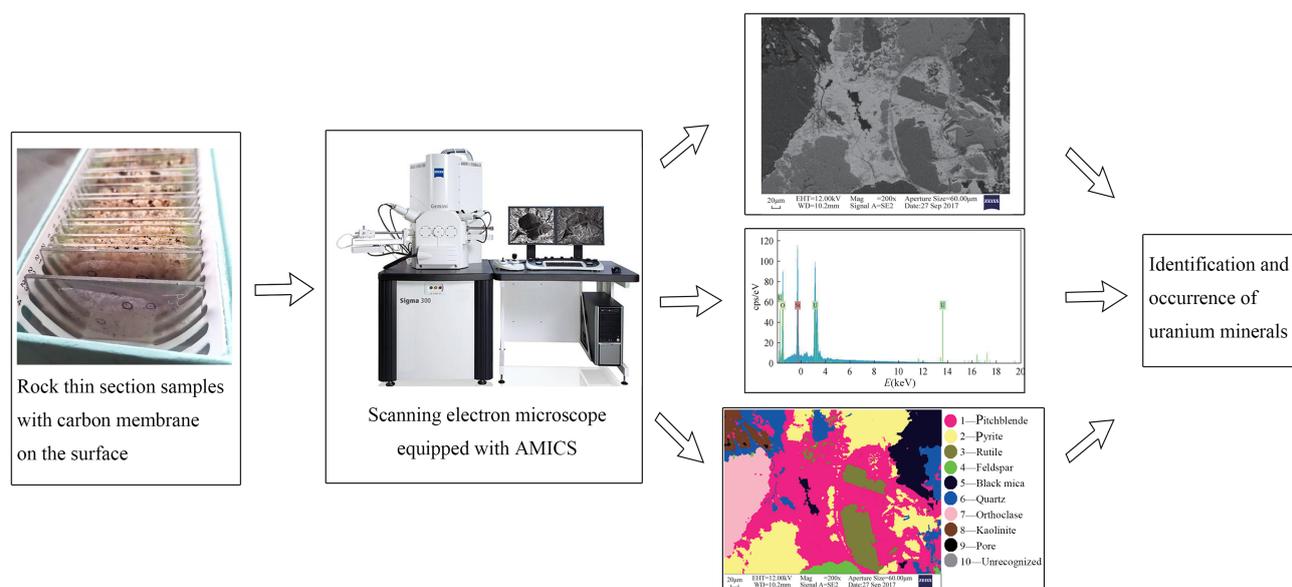
Application of Automatic Mineral Analysis Technology to Identify Minerals and Occurrences of Elements in Sandstone-type Uranium Deposits in the Ordos Basin

ZHANG Ran^{1,2}, YE Li-juan^{1,2}, DANG Fei-peng³, XIAO Zhi-bin^{1,2*}, BI Jun-hui^{1,2}, ZHOU Jing⁴, GUO Hu^{1,2}, XU Ya-wen^{1,2}, GENG Jian-zhen^{1,2}, ZHOU Hong-ying^{1,2}

- (1. Tianjin Center of Geological Survey, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;
2. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;
3. No. 270 Research Institute of Nuclear Industry, Jiangxi 330200, China;
4. Henan Province Rock & Minerals Testing Center, Henan 450012, China)

HIGHLIGHTS

- (1) AMICS-SEM-EDS technology was used to find and identify uranium minerals, and to explore their occurrence, mineral composition and dissemination relationship.
- (2) The uranium minerals in the Ordos Basin included coffinite, pitchblende, uraninite and uranophane. In the northern margin of the basin, uranium mineral was dominated by uraninite, while in the western and the southern margin it was dominated by pitchblende.
- (3) Uranium minerals were often closely associated with pyrite and occur in the margins or gaps among rutile, quartz, feldspar and other minerals.



ABSTRACT

BACKGROUND: The Ordos Basin is one of the most important areas in China because it hosts lots of sandstone – type uranium deposits and a variety of other energy and mineral resources. The occurrence of uranium minerals is of great significance to the genetic understanding and prospecting of sandstone – type uranium deposits. However, the complex mineral composition, fine grain size, and various types and occurrences of uranium minerals make the initial identification stage of the study difficult. Currently, radiograph and electron probe microanalysis (EMPA) have played an important role in the identification of uranium minerals. Radiography can be used to obtain the position, occurrence and radioactive form of all uranium minerals in the light film at one time, but the mineral type cannot be identified. Moreover, it is a lengthy process and must be performed in darkness. Electron probe can be used to obtain the backscattered image of the uranium mineral. However, it takes time and effort to find uranium minerals with small content and small particle size in thin slices at high magnification, and it is impossible to quickly determine the types of associated minerals in BSE images.

OBJECTIVES: To find a more rapid and accurate method for identifying uranium minerals.

METHODS: The automatic mineral analysis system (AMICS), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were used to identify minerals from sandstone – type uranium deposits in the north, south, and west margins of the Ordos Basin.

RESULTS: The minerals in the study were identified as coffinite, pitchblende, uraninite and uranophane. Pyrite and titanium oxide were closely related to uranium minerals, and other associated minerals were identified as quartz, rutile, feldspar, mica and kaolinite.

CONCLUSIONS: AMICS – SEM – EDS *in situ* analysis technology proves to be a reliable method for the rapid identification of uranium minerals, associated minerals, and their occurrences.

KEY WORDS: automatic mineral analysis system; energy dispersive spectrometer; sandstone type uranium deposit; mineral identification; occurrence of uranium minerals; Ordos Basin