DOI:10.19948/j.12-1471/P.2022.04.03

鄂尔多斯盆地西南部彭阳铀矿床下白垩统洛河组铀的赋存状态初探

赵华雷[1,2,6],臧永亮[3*],李建国[2,4],张 博[1,2],陈路路[1,2,5,6],苗培森[1,2],刘晓杰[3]

(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.中国石油华北油田公司,任丘 062552;4.中国地质调查局自然资源实物地质资料中心,北京 100192;5.东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,南昌 330013;6.中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室,武汉 430074)

摘 要:彭阳铀矿床位于鄂尔多斯盆地西南部天环坳陷南端,是我国在风成沉积中发现的第一个大型砂岩型铀矿。其含铀岩系为下白垩统洛河组,为一套沙漠相为主的沉积岩系,盆地边缘地区则发育有部分冲积扇及河流相沉积。铀矿体主要赋存于洛河组风成砂岩中,砾岩中也发育有少量矿体。本文在野外地质调查研究的基础上,通过薄片鉴定、扫描电镜及能谱分析和逐级化学提取实验等手段,开展岩石学特征、矿物共生组合及铀赋存状态的初步研究。结果表明,铀矿物大多为沥青铀矿,其共伴生矿物以新生组分锐钛矿、黄铁矿、磷灰石、粘土矿物为主,也有少量铀矿物赋存于石英长石等原生颗粒的边缘或裂隙中。逐级化学提取实验分析显示,彭阳铀矿床中铀的赋存状态主要为碳酸盐态、残渣态和有机质及硫化物结合态,其中以铀矿物形式赋存的铀含量平均约为四分之三,吸附态铀含量约为四分之一。上述研究为铀沉淀富集规律研究和地浸采矿应用提供基础资料。

关键词:砂岩型铀矿床;彭阳铀矿床;赋存状态;洛河组;鄂尔多斯盆地

中图分类号:P619.14 **文献标识码:**A **文章编号:**2097-0188(2022)04-0021-07

铀的赋存状态研究是铀沉淀富集规律和矿床成因研究的基础,且对铀矿床选冶方法的选择有重要的指示作用,因此是铀矿理论研究和采矿应用的前提和基础[1-2]。铀的赋存状态大致分为两种,一种是铀矿物态,一种是吸附态,通常可以采用α径迹蚀刻和逐级化学提取实验这两种方法从定性-定量角度区分这两种赋存状态。而铀矿物态的研究属矿物学研究范畴,方法主要有高分辨率扫描电镜和电子探针等[3-4]。目前鄂尔多斯盆地东北部地区铀矿床赋存状态方面的研究成果较为丰富,铀矿物大多为铀石和水硅铀矿,沥青铀矿较少[5-6],且主要分布于砂岩的碎屑颗粒边缘、裂隙及其胶结物中[1,7-9]。寸小妮等[10]对大营铀矿铀的赋存状态研究发现,矿石中的铀主要以铀矿物和吸附铀两种形式存在,两种占比大体相当。秦艳等[11]对鄂尔多斯盆地延长组长7段的研究表明,该富铀烃源岩中的铀主要赋存于胶磷矿中,少量以吸附形式赋存于有机质中。张鑫等[12]对伊犁盆地蒙其古尔铀矿床的研究显示,铀主要赋存在石英或长石的边缘,且与黄铁矿、有机质等关系密切。

近年来由天津地质调查中心牵头实施的北方砂岩型铀矿调查工程,是在"煤铀兼探"和"油铀兼探"思路的基础上,针对煤田、油田钻孔资料和测井资料进行二次开发利用,开展砂岩型铀矿调查,目前已成为砂岩型铀矿调查领域的重要勘查方向之一[13-15]。彭阳铀矿床是近期在鄂尔多斯盆地西南部新发现的铀矿床,也是我国在风成沉积中发现的第一个大型砂岩型铀矿[16]。由于发现较晚,矿床的成矿特征及成矿作用尚未有深入研究,如矿床铀矿物特征及赋存状态方面研究较为缺乏。本文在野外地质调查研究的基础上,开展彭阳铀矿区洛河组中铀的赋存状态初

收稿日期:2021-03-16

资助项目:国家自然科学基金项目(92162212);构造与油气资源教育部重点实验室开放基金(TPR-2022-22);东华理工大学核资源与环境国家重点实验室开放基金项目(2020NRE10);中国石油华北油田科技项目(HBYT-L-2022-JS-180);国家重点研发计划项目(2018YFC0604200);中国地质调查局项目(DD20221678、DD20190119)、国际地球科学计划(IGCP675)。

作者简介:赵华雷(1989-),男,高级工程师,博士,主要从事矿物学、岩石学、矿床学方面的研究,E-mail: zhaohualei89@163.com;*通讯作者:臧永亮(1980-),男,工程师,主要从事油气开发和铀矿勘查工作,E-mail: el_zangyongliang@petrochina.com.cn.

步研究，为铀沉淀富集规律研究和地浸采矿应用提供基础资料。

1 区域地质概况

鄂尔多斯盆地是在华北克拉通内大型石炭-二叠纪盆地之上叠加了中生代盆地的多重叠合盆地[17-18]，是我国北方重要的煤、油气、铀等多种能源矿产共存的盆地之一，其东西南北的外围分别被吕梁山、贺兰山-六盘山、秦岭和大青山所环绕。盆地内的构造单元总体上可划分为伊盟隆起、伊陕斜坡、天环坳陷、西缘逆冲带、晋西挠褶带和渭北隆起。盆地有侏罗系、石炭系、二叠系等多套含煤层系，煤炭资源十分丰富。主要含油层系为三叠系延长组和侏罗系，天然气则绝大部分为古生界气藏，少数为三叠系油顶气藏，油气分布整体具有“上油下气、南油北气”的特点[17]。

彭阳铀矿床位于鄂尔多斯盆地西南部彭阳-泾川地区，大地构造位置上位于天环坳陷南端（图1），

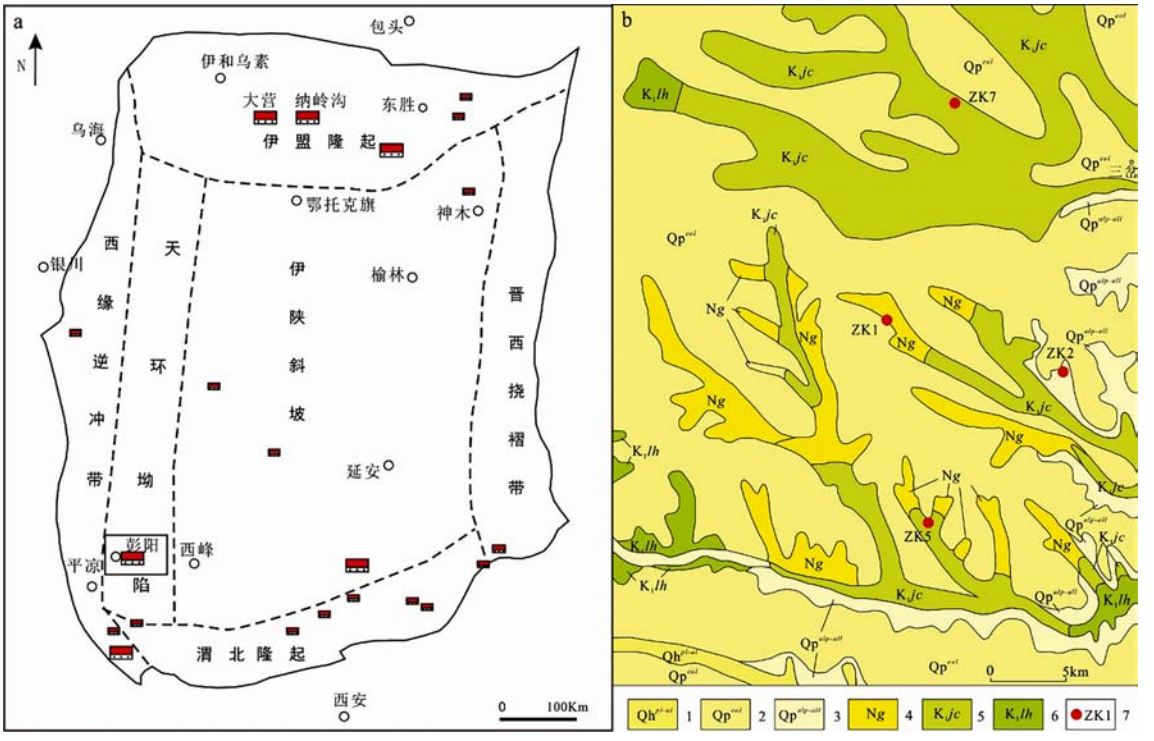

图1 鄂尔多斯盆地彭阳铀矿床大地构造位置（a）及地质简图（b）（据文献[19]修改）

Fig.1 Tectonic location (a) and geological diagram (b) of the Pengyang uranium deposit in Ordos Basin (modified by literature[19])

1.第四系全新统冲洪积物；2.第四系更新统风积黄土；3.第四系更新统冲洪积物；4.新近系甘河沟组；5.白垩系泾川组；6.白垩系罗汉洞组；7.采样钻孔位置

西邻西缘逆冲带，构造条件十分有利，矿区坐落于我国第一大油气田-长庆油田的边缘。区域上的中新生界盖层主要有上三叠统延长组、下侏罗统延安组、中侏罗统直罗组和安定组、下白垩统志丹群、新近系甘河沟组及第四系。其中下白垩统志丹群为主要的含铀岩系，自下而上又可划为宜君组、洛河组、环河华池组、罗汉洞组和泾川组。

矿区内下白垩统地层一般呈单斜产出，倾角较缓。区域上断裂构造十分发育，以北西向、近南北向断裂构造为主。铀矿体主要赋存于下白垩统洛河组中，赋矿岩石以砂岩为主，在靠近盆地边缘的洛河组砾岩中也发育有少量矿体。矿体在洛河组的顶、底和中部均有产出，钻孔中常见1~3层矿化[16]，单层矿化厚度最大可至50 m。

2 洛河组特征

鄂尔多斯盆地南部洛河组分布较为广泛，西部埋藏较深，在彬县-甘泉地区可见地层露头。其沉积相以沙漠相为主[20-23]，在接近盆地边缘地区则发育有冲积扇及河流相沉积。区域上洛河组岩性主要由一套巨厚的砂岩、厚度变化较大的砾岩和少量泥岩组成，砂岩露头上常见大型高角度（层理角度通常可达

27°~33°)板状交错层理、楔状交错层理或槽状交错层理等(图2)。

鄂尔多斯盆地西南部彭阳-泾川地区的洛河组厚度通常在200~400 m,上部为红色砂岩、砾岩和含砾砂岩,中部为浅黄色中细砂岩夹浅红色细砂岩,下部为灰色和浅绿灰色中细砂岩。西部为一套近源洪冲积扇沉积,地层厚度变化大,近距离内厚度即能发生急剧变化,具有明显的冲洪积物的特征。中东部地区以风成沉积为主,岩性主要为红色、浅红色、浅黄色、灰色中细粒岩屑长石砂岩、长石砂岩(图3),偶夹薄层泥岩及含砾砂岩,与西部的冲洪积砾岩多呈"指状交互"。该层在研究区分布较为稳定,总体沉积环境为风成沙漠相,另有少量洪冲积扇相和河流相,沉积期气候较为炎热干旱。总体上,含矿目的层洛河组砂岩十分发育,颗粒磨圆度和分选性好,以颗粒支撑为主,孔隙度较大,岩石结构疏松,渗透性良好。矿区范围内洛河组(K11)并无露头,仅在钻孔中可见。铀矿体多位于洛河组中下部的灰色中细砂岩中,局部可见明显的油迹[24]。砂岩中可见沿裂隙切层或顺层发育的还原性流体蚀变现象,具有明显的蚀变分带,从中心向外围依次为绿灰色-黄色/浅红色-红色砂岩[16]。

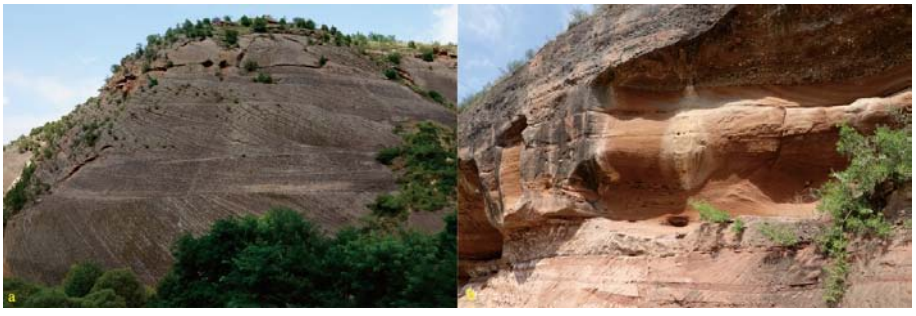

图2 鄂尔多斯盆地南部洛河组露头照片

Fig.2 Outcrop photos of Luohe Formation in southern Ordos Basin

a.大型高角度板状、楔状交错层理;b.大型高角度板状、槽状交错层理

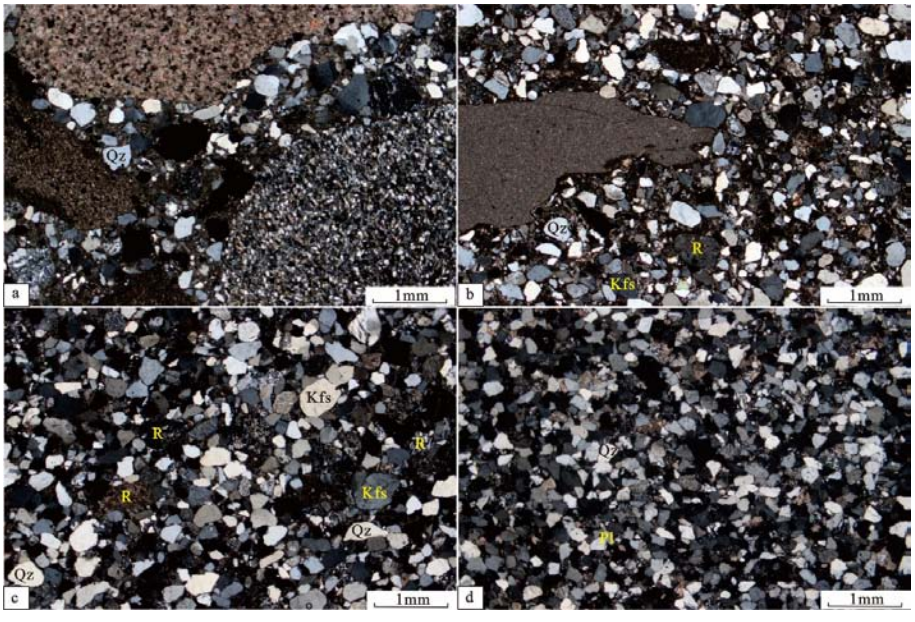

图3 研究区洛河组岩石显微镜下(正交偏光)照片

Fig.3 Microscopic (orthogonally-polarized) photos of rocks from Luohe Formation in the study area

a.砾岩;b.含砾砂岩;c/d.长石砂岩;R.岩屑;Qz.石英;Kfs.钾长石;Pl.斜长石

3 样品分析方法

本次研究的铀矿石样品主要采自于彭阳铀矿区的6个钻井,共计采集下白垩统洛河组砂砾岩样品30余件,其中高品位的矿石样品大多从矿区的4个工业铀矿孔中获得。野外现场取样前先将覆盖于岩芯外表的泥浆清理干净,然后采集所需样品用于探针片的磨制及样品的前处理等工作。探针片的制备及样品的前处理由河北省区域地质矿产调查研究所实验室完成。铀矿物学研究是先在显微镜下观察洛河组的蚀变矿物组合,再利用扫描电镜、背散射及能谱联合分析铀矿物的类型及赋存共生关系。扫描电镜分析在核工业北京地质研究院分析测试中心以及中国地质调查局铀矿地质重点实验室完成,所用的仪器为Tescan GA-IA 3,加速电压为15kV,能谱及背散射探测器采用的是牛津仪器X-maxN能谱仪。逐级化学提取分析在核北京地质研究院分析测试中心完成,仪器为DCR-e型等离子体质谱分析仪,测试方法为HR-ICP-MS。

4 结果与讨论

4.1 铀矿物赋存特征

本次研究在岩相学观察的基础上,结合扫描电镜及能谱分析,初步查明了铀矿物的赋存特征。综合光学显微镜

下及扫描电镜下的观察发现，铀矿物大多赋存于洛河组砂岩碎屑颗粒之间的孔隙中，呈团块状或星点浸染状分布（图4）。砂岩碎屑填隙部位疏松多孔，是含铀成矿流体运移的主要通道，也是铀沉淀成矿的良好储存空间[25]。电子探针分析结果表明，铀矿物以沥青铀矿为主，少量含钛铀矿物和铀石[26]。综合镜下观察结果表明，铀矿物的赋存分布主要分为以下两类：

（1）赋存于原生碎屑颗粒边缘

洛河组砂岩中的碎屑颗粒以石英、长石及岩屑等原生碎屑为主，常见细小颗粒的铀矿物呈星点状分布于石英、长石等碎屑矿物颗粒边缘或充填于其裂隙中（图4a-4c），呈条带状或团块状分布。

（2）赋存于新生矿物周围

大量的镜下观察发现，矿石中赋存于新生矿物组分周围的铀矿物最多，且通常分布于碎屑颗粒之间填隙部位。与铀矿物密切共生的新生矿物主要有锐钛矿、黄铁矿、磷灰石、粘土矿物（绿泥石）、碳酸盐（方解石和白云石为主）等。扫描电镜下背散射图像显示，彭阳铀矿区洛河组中的铀矿物多呈星点浸染状或星点状集合体围绕锐钛矿周缘产出（图4c-4d），可能是铀被锐钛矿等矿物的吸附后，被还原剂还原沉淀形成。其次亦常见铀矿物与黄铁矿共生（图4e），应该是Fe^{3+}与铀酰离子同时被还原后结晶形成，或者是黄铁矿周围形成的还原性微环境使铀以沥青铀矿等矿物形式被分散吸附富集[25-26]。再其次有与极细小的磷灰石（或胶磷矿）共生的铀矿物（图4f），其对铀矿物的富集也有一定的贡献。另外还有绿泥石等粘土矿物吸附铀矿物（图4d、4f），以及与方解石等碳酸盐矿物共生的铀矿物（图4e）。

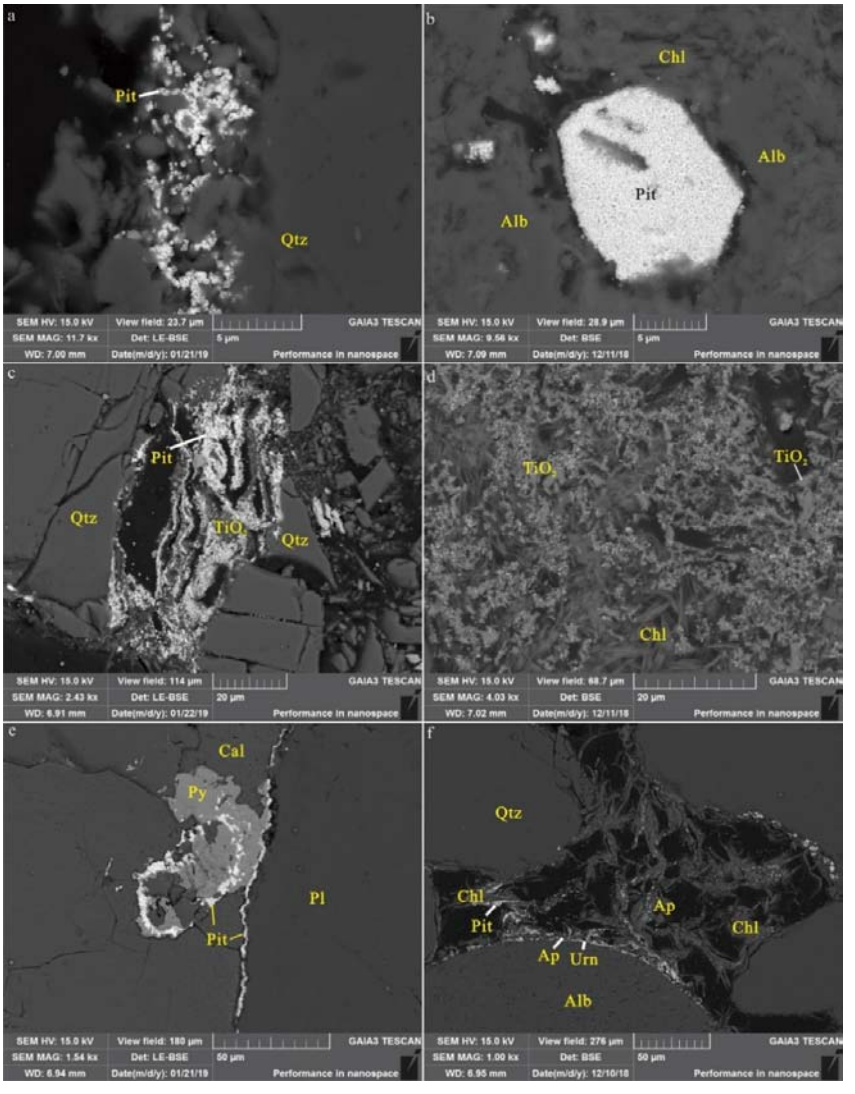

图4 彭阳铀矿区铀矿物背散射（BSE）照片

Fig.4 Backscattering (BSE) photos of uranium minerals in Pengyang uranium deposit

a.赋存于石英颗粒边缘的星点浸染状沥青铀矿；b.细小的沥青铀矿集合体产出于长石边缘的裂隙中；c.砂岩填隙部位的浸染状沥青铀矿，偶见与锐钛矿伴生；d.星点状铀矿物围绕锐钛矿、绿泥石产出；e.赋存于长石颗粒边缘及与黄铁矿密切伴生的沥青铀矿；f.与磷灰石、绿泥石相伴生的铀矿物. Qtz. 石英；Alb. 钠长石；Pl. 斜长石；TiO_2. 钛氧化物类（如锐钛矿）；Pit. 沥青铀矿；Urn. 铀矿物；Ap. 磷灰石（胶磷矿）；Cal. 方解石；Py. 黄铁矿

4.2 铀的赋存状态

本次研究选取了16个不同品位矿样，用Tessier法的流程先后提取5态，即可交换离子态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态、有机质及硫化物态和残渣态，然后分别分析不同形态下铀的含量分布，具体实验步骤见文献[10, 27]。逐级化学提取实验的原理是用不同的溶蚀或交换度的化学试剂从弱到强的顺序依次去溶蚀或交换样品中某一形态的元素，从每个步奏中分别分离出一个地球化学相，分别测定每个相的元素含量[2, 10, 27-28]。详细的实验结果见表1和图5，各形态铀特征如下：

（1）可交换离子态，又称水溶态。主要是通过扩散作用或外层络合作

用吸附在黏土矿物表面，能直接被水等中性试剂提取的铀元素形态[2]，通过加入萃取试剂使吸附在沉积物表面的铀被萃取出来。所测的16件不同品位矿石样品中以可交换离子态存在的铀占0.17%~2.28%，平均为1.37%，其所占比例较少，表明矿石中只有少量铀被吸附在黏土矿物表面。

(2)碳酸盐结合态，又称弱酸提取态。主要以沉淀或共沉淀形式赋存于碳酸盐(方解石、白云石、菱锰矿等)中的铀形态，实验中通常使用乙酸萃取，该过程通常不会破坏样品中的铁锰氧化物和硅酸盐等矿物，对剩余三种形态铀提取的影响也不大。据表1可见，16件不同品位矿石样品中以碳酸盐结合态存在的铀所占比例为19.42%~74.25%，平均为43.21%，为彭阳铀矿区矿石中铀赋存的最主要类型。

(3)铁锰氧化态，又称可还原态。主要指以较强的结合力赋存于铁锰氧化物中的铀形态，此种形态铀的特点是在还原性环境下不稳定，通常可用盐酸羟胺溶液溶解提取。16件不同品位矿石样品中铁锰氧化态的铀含量较低，约0.42%~6.67%，平均1.78%。

(4)有机质及硫化物态，又称可氧化态。此形态的铀是吸附或包裹在有机质和黄铁矿颗粒表面，或与有机质、黄铁矿结合形成螯合物或硫化物。目前常用的萃取剂为H_2O_2，其氧化能力较强，可溶解样品中锰的氧化物等，因此该形态的铀通常在铁锰氧化态之后萃取。由表1和图5可见，以有机质及硫化物态存在的铀占4.39%~50.53%，平均22.73%，比例相对较高。严格上来说，这一部分铀中既有吸附态的(即吸附在有机质及粉末状黄铁矿中)，又有呈粒状、细脉状铀矿物形式赋存于有机质、黄铁矿等硫化物中，但目前两者无法区分，暂时将其归于吸附态的铀。扫描电镜分析过程中发现有较多的铀矿物与黄铁矿共生，沿黄铁矿边缘分布(图4e)，因此初步认为此形态的铀中与黄铁矿结合的铀应多于与有机物结合的铀。

(5)残渣态：是指固定于硅酸盐矿物、稳定铀矿物(如铀石等)和惰性含铀矿物等矿物晶格中的铀形态，是矿石中铀的主要赋存形式之一。残渣态铀占总体铀含量的0.69%~74.70%，平均30.91%，含量较高。

整体对比发现，不同钻孔样品各形式铀比例无明显区别，低品位样品(B2/ZK5、T106/ZK1、T108/ZK1等)中残渣态铀的比例相对稍高，中高品位样品(T12/ZK7、T13/ZK7、T14/ZK7、T15/ZK7、T16/ZK7、T17/ZK7)中碳酸盐态、有机质及硫化物态这两种形式的铀含量明显增加，这类形式的铀往往是在成矿过程中增加并富集的，如碳酸铀酰离子因物理化学条件的改变而伴随着碳酸盐沉淀，有机质及黄铁矿等硫化物能吸附还原铀并沉淀成矿[29-30]。

综上分析，彭阳铀矿床矿石中铀的5种形态所占比例关系是：碳酸盐态(43.21%)>残渣态(30.91%)>有机质及硫化物态(22.73%)>铁锰氧化态(1.78%)>可交换离子态(1.37%)。其中碳酸盐态和残渣态的铀是铀矿物的两种最主要形式，数据显示这两种形式的铀所占比例分布范围为46.49%~93.92%，平均为74.12%；而有机质黄铁矿态、可交换离子态和铁锰氧化态的铀是以分散吸附形式存在的三种方式，分布范围为6.08%~53.51%，平均为25.88%，其中以有机质黄铁矿态的铀为主，可交换离子态和铁锰氧化态的铀含量较低。因此，彭阳铀矿床中铀的赋存状态主要以铀矿物和吸附铀两种赋存形式存在，且赋存在铀矿物中比例明显大于吸附铀。

根据目前的地浸开采工艺，在地浸开采过程中，具备一定迁移能力和迁移活性的铀，被称为“活性铀”或“动态铀”，只有这部分铀才能被浸取剂溶解开采出来，而暂时无法开采出来的那部分铀被称为“惰性铀”，以残渣态为主[31-32]。“活性铀”

表1　逐级提取萃取液中铀的含量(μg/g)及比例表

Table 1　The content (μg/g) and ratio of uranium in the experiment of sequential extraction

样号	可交换离子态	碳酸盐结合态	铁锰氧化态	有机质及硫化物态	残渣态
B2/ZK5	0.22 (0.38%)	25.30 (44.63%)	0.46 (0.80%)	7.82 (13.79%)	22.90 (40.39%)
B3/ZK5	0.04 (0.17%)	11.50 (43.27%)	0.22 (0.83%)	6.35 (23.89%)	8.46 (31.83%)
T11/ZK7	0.34 (2.14%)	8.43 (53.11%)	0.24 (1.52%)	2.00 (12.60%)	4.86 (30.62%)
T12/ZK7	17.50 (2.28%)	337.00 (43.99%)	11.50 (1.50%)	250.00 (32.64%)	150.00 (19.58%)
T13/ZK7	17.30 (1.63%)	341.00 (32.09%)	14.40 (1.36%)	537.00 (50.53%)	153.00 (14.40%)
T14/ZK7	17.90 (1.81%)	451.00 (45.51%)	22.90 (2.31%)	424.00 (42.79%)	75.10 (7.58%)
T15/ZK7	16.50 (1.55%)	786.00 (73.98%)	36.70 (3.45%)	216.00 (20.33%)	7.29 (0.69%)
T16/ZK7	15.50 (2.13%)	399.00 (54.74%)	9.54 (1.31%)	263.00 (36.08%)	41.90 (5.75%)
T17/ZK7	5.85 (2.10%)	127.00 (45.67%)	1.16 (0.42%)	96.70 (34.77%)	47.40 (17.04%)
T18/ZK7	0.18 (1.40%)	9.54 (74.25%)	0.31 (2.39%)	2.15 (16.73%)	0.67 (5.23%)
T105/ZK1	0.07 (1.80%)	2.50 (61.52%)	0.27 (6.67%)	1.09 (26.82%)	0.13 (3.20%)
T106/ZK1	0.67 (0.38%)	33.70 (19.22%)	1.04 (0.59%)	8.95 (5.10%)	131.00 (74.70%)
T107/ZK1	1.00 (0.96%)	31.80 (30.55%)	2.80 (2.69%)	23.70 (22.77%)	44.80 (43.04%)
T108/ZK1	2.49 (1.05%)	46.20 (19.42%)	1.41 (0.59%)	12.80 (5.38%)	175.00 (73.56%)
T112/ZK1	1.74 (1.25%)	30.00 (21.59%)	1.14 (0.82%)	6.10 (4.39%)	100.00 (71.95%)
T113/ZK1	1.01 (0.88%)	31.80 (27.79%)	1.40 (1.22%)	17.30 (15.12%)	62.90 (54.98%)
均值	1.37%	43.21%	1.78%	22.73%	30.91%

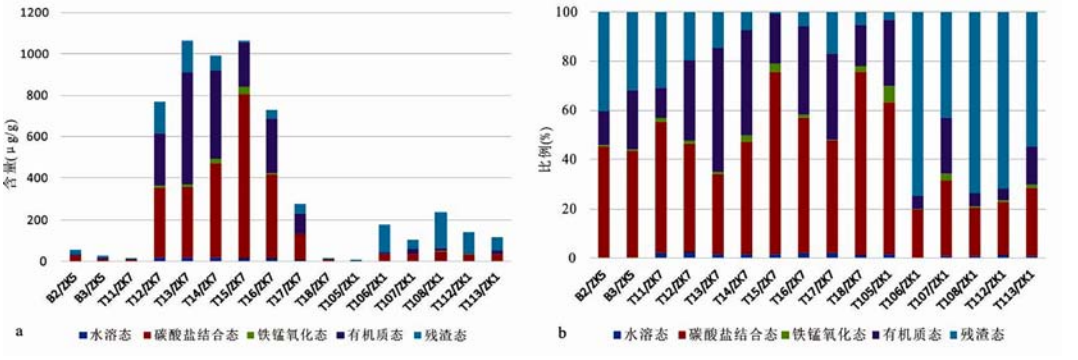

图5 彭阳铀矿床不同品位矿石中铀的逐级化学提取含量(a)及比例(b)

Fig.5 The content (a) and proportion (b) of uranium in ore samples of Pengyang uranium deposit by sequential chemical extraction experiments

主要包括以可交换离子态、碳酸盐结合态、有机质及硫化物态、铁锰氧化物结合态存在的铀，在16件不同品位矿石样品中占25.3%~99.31%，平均约为69.09%，特别是中高品位样品中可达81.42%~99.31%。从矿石中铀赋存状态方面来看，彭阳铀矿总体上较适合采用地浸技术开采。

5结论

(1)彭阳铀矿床铀矿物共生组合分析表明，铀矿物主要为沥青铀矿，共伴生颗粒(矿物)通常包括原生颗粒石英、长石、成岩碳酸盐，以及砂岩中新生组分锐钛矿、黄铁矿、磷灰石(胶磷矿)、粘土矿物(绿泥石、高岭土)、碳酸盐及有机质等，其中与砂岩中新生组分伴生的铀矿物占主导地位。

(2)通过逐级化学提取实验进行定量分析显示，彭阳铀矿床洛河组矿石中铀的赋存形式主要以碳酸盐态、残渣态、有机质及硫化物态为主。以铀矿物形式赋存的铀含量平均约为四分之三，吸附态铀含量约为四分之一。根据铀的赋存状态来看，彭阳铀矿床总体适合地浸开采。

参考文献：

[1] 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.

[2] 马晔, 吴柏林, 刘亚非, 等. 鄂尔多斯盆地HJQ地区砂岩型铀矿铀赋存状态研究[J]. 西北地质, 2013, 46(02): 141-152.

[3] DOVETON J H, MERRIAM D F. Borehole petrophysical chemostratigraphy of Pennsylvanian black shales in the Kansas subsurface[J]. Chemical Geology, 2004, 206(3-4): 249-258.

[4] ZHAO K D, JIANG S Y, CHEN W F. Mineralogy, geochemistry and ore genesis of the Dawan uranium deposit in southern Hunan Province, South China[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2014, 138 (3): 59-71.

[5] 吴柏林,张婉莹,宋子升,等. 鄂尔多斯盆地北部砂岩型铀矿铀矿物地质地球化学特征及其成因意义[J]. 地质学报, 2016, 90(12): 3393-3407.

[6] 王贵, 王强, 苗爱生, 等. 鄂尔多斯盆地纳岭沟铀矿床铀矿物特征与形成机理[J]. 矿物学报, 2017, 37(4): 461-468.

[7] 苗爱生,陆琦,刘惠芳,等. 鄂尔多斯盆地东胜砂岩型铀矿中铀矿物的电子显微镜研究[J]. 现代地质, 2010, 24(04): 785-792.

[8] CHEN L L, CHEN Y, FENG X X, et al. Uranium occurrence state in the Tarangaole area of the Ordos Basin, China: Implications for enrichment and mineralization[J]. Ore Geology Reviews, 2019, 115. doi: 10.1016/j.oregeorev.2019.103034.

[9] 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, 42(02): 96-103+108.

[10] 寸小妮,吴柏林,张洪深,等. 鄂尔多斯盆地大营铀矿铀的赋存状态研究[J]. 西北地质, 2016, 49(02):198-212.

[11] 秦艳, 张文正, 彭平安, 等. 鄂尔多斯盆地延长组长7段富铀烃源岩的铀赋存状态与富集机理[J]. 岩石学报, 2009, 25(10): 2469-2476.

[12] 张鑫, 聂逢君, 张成勇, 等. 伊犁盆地蒙其古尔矿床砂岩型铀矿赋存状态研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(33): 18-23.

[13] 汤超, 金若时, 谷社峰, 等. 松辽盆地北部四方台组工业铀矿体的发现及其意义[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(1): 1-8.

[14] 肖鹏, 汤超, 魏佳林, 等. 大庆长垣南端四方台组沉积相特征及其与铀富集的关系[J]. 地质调查与研究, 2018, 41(1): 18-23.

[15] 吴兆剑, 韩效忠. 煤田资料的铀矿二次开发技术及其找矿意义-以二连盆地ZS煤田铀矿点的发现为例[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 617-627.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 刘池洋, 赵红格, 桂小军, 等. 鄂尔多斯盆地演化-改造的时空坐标及其成藏(矿)响应[J]. 地质学报, 2006, 80(5): 617-638.
[19] 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.
[20] 张忠义. 鄂尔多斯盆地白垩系洛河组-环河华池组沉积特征研究[D]. 西安: 长安大学硕士学位论文. 2005, 1-66.
[21] 杨友运. 鄂尔多斯盆地白垩系沉积建造[J]. 石油与天然气地质, 2006, 27(2): 167-171.
[22] 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.
[23] 朱欣然, 刘立, 贾士琚, 等. 鄂尔多斯盆地白垩系洛河组风成砂岩地球化学与物源区特征: 以靖边县龙洲乡露头为例[J]. 世界地质, 2018, 37(3): 702-711.
[24] 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(06): 675-690.
[25] 闵茂中, 彭新建, 王果, 等. 我国西北地区层间氧化带砂岩型铀矿床中铀的赋存形式[J]. 铀矿地质, 2006, 22(4): 193-201.
[26] 赵华雷, 李建国, 苗培森, 等. 鄂尔多斯盆地西南缘彭阳铀矿区矿物学研究及其对区域成矿的指示[J]. 大地构造与成矿学, 2020, 44(04): 607-618.
[27] 郑剑,贾志坤,王晓宁,等. 分步提取法在分析铀赋存形态中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2015, 41(15): 1-2.
[28] 宋照亮, 刘丛强, 彭渤,等. 逐级提取(SEE)技术及其在沉积物和土壤元素形态研究中的应用[J]. 地球与环境, 2004, 32(2):70-77.
[29] 汤超, 司马献章, 朱强, 等. 沉积盆地油气与砂岩型铀矿成矿关系研究[J]. 地质找矿论丛, 2017, 32(02): 286-294.
[30] JIN R S, FENG X X, TENG X M, et al. Genesis of green sandstone/mudstone from Middle Jurassic Zhiluo Formation in the Dongsheng Uranium Orefield, Ordos Basin and its enlightenment for uranium mineralization[J]. China Geology, 2020, 3, 52-66.
[31] 齐玲, 李功顺, 白静梅,等. 砂岩型铀矿铀源岩中活性铀浸出方法研究[J]. 铀矿地质, 2007, 23(2): 115-120.
[32] 夏彧, 周恳恳, 伍皓,等. 龙川江盆地砂岩型铀矿铀赋存形态研究[J]. 四川地质学报, 2018, 38(2):264-269.

Preliminary study on the occurrence state of uranium in the Lower Cretaceous Luohe Formation of Pengyang uranium deposit , southwestern Ordos Basin

ZHAO Hua-lei[1, 2, 6], ZANG Yong-liang[3], LI Jian-guo[2,4], ZHANG Bo[1, 2], CHEN Lu-lu[1, 2, 5, 6], MIAO Pei-sen[1,2], LIU Xiao-jie[3]

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 2. Key Laboratory of Uranium Geology, China Geological Survey, Tianjin 300170, China; 3. PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu, 062552, China;4. Cores and Samples Center of Natural Resources, Beijing 100192, China; 5. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (East China University of Technology), Nanchang, 330013, China;6. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources(China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China)

Abstract: The Pengyang uranium deposit is located in the south of Tianhuan Depression in Ordos Basin, which is the first large-scaled sandstone-type uranium deposit discovered in aeolian sediments in China. The uranium-bearing rock series occurred in the Lower Cretaceous Luohe Formation, which is dominated by desert facies, with some alluvial fan and fluvial facies sediments in the marginal area of the basin. Uranium ore bodies mainly occur in the eolian sandstone of Luohe Formation and subordinately develop in conglomerate. On the basis of field geological survey, this paper conducts preliminary research on petrological characteristics, mineral paragenesis and uranium occurrence state through the methods of thin section identification, scanning electron microscopy, energy spectrum analysis, and sequential chemical extraction. The results show that most of the uranium minerals are pitblende and the associated minerals are mainly new components such as anatase, pyrite, apatite and clay minerals. A small amount of uranium minerals also occur in the edge or fracture of primary particles. Sequential chemical extraction results show that the occurrence of uranium in the Pengyang uranium deposit is mainly carbonate state, residual state, sulfide-organic matter state, among which the average content of uranium in the form of uranium minerals is about 3/4, and the content of uranium in adsorbed form is about 1/4. These researches provide basic data for the study of uranium enrichment and the application of in-situ leaching mining.

Key words: sandstone-type uranium deposit; Pengyang uranium deposit; occurrence state; Luohe Formation; Ordos Basin