

川北广元田坝子剖面含铀沥青脉的发现 及其地质意义



Pre-pub. on line: www.
geojournals.cn/georev

邱林飞^{1,2)}, 丁波¹⁾, 刘红旭¹⁾, 胡宝群^{2*)}, 王战永³⁾, 肖柯相³⁾

1) 核工业北京地质研究院, 中核集团铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京, 100029;

2) 东华理工大学, 南昌, 330013; 3) 核工业 280 研究所, 广汉, 618300

内容提要: 通过野外地质调查, 在四川盆地西北部广元市青川县田坝子剖面发现了多处具铀异常 ($\approx 70 \times 10^{-6}$) 的含铀沥青脉。对含铀沥青脉开展了矿物学、元素地球化学、光谱学研究, 并与研究区典型砂岩型铀矿床 (303 矿床) 中的“有机质”开展了对比研究。研究表明, 含铀沥青脉中含有大量的微粒状矿物, 包括微米级的石英、重晶石、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿及呈微—纳米结构的草莓状黄铁矿, 沥青脉中的微量元素和稀土元素十分富集, 主要富集 Mo、Re、Cd、U、Ba 元素, 次要富集 Sc、V、Ni、Cu、Zn、Rb、Tl 等。川北 303 砂岩型铀矿床的矿石中也发现了铀矿物与沥青脉共生的现象, 同时也具有重晶石—黄铁矿—闪锌矿等的矿物组合, 其微量元素和稀土元素与田坝子剖面沥青脉具有相似性, 表明川北地区的铀矿化可能与古油气藏的裂解破坏具有成因上的联系, 在四川盆地的构造活动区, 或许具有寻找与构造油气作用相关的铀矿床的潜力。川北沥青脉在灰化之后, 其中的铀、钼、铯元素都富集到了可综合利用的程度, 建议在未来的研究中, 可适当关注川北沥青脉的伴生元素的综合利用。

关键词: 沥青脉; 古油藏; 砂岩型铀矿; 四川盆地

四川盆地作为我国南方最大的含油气盆地, 历来为地质和勘探学家所关注。前人经过 20 年多年的研究和找矿工作, 已在四川盆地发现了 4 个中、小型铀矿床 (3031、3033、4210、7201)、数十个铀矿点以及大量的异常点 (带), 是寻找砂岩型铀矿的有利盆地 (陈友良等, 1995; 郭宁和孙泽轩, 2017)。其中铀矿床及铀矿点主要集中在四川盆地北部苍溪—通江地区, 最为典型的为 303 中型矿床。前人对 303 矿床开展了少量的矿物学、元素地球化学、同位素、年代学等研究工作, 普遍认为川北 303 矿床属于沉积成岩型铀矿床, 成矿过程中可能叠加了一定热液流体的改造作用 (巫声扬等, 1988 和 1991; 朱西养等, 2004; 侯学文等, 2017; 莫帮洪等, 2019)。按照这个成矿模式, 几乎“宣判”了在四川盆地北部寻找类似北方沉积盆地“层间氧化带”型砂岩铀矿床的可能性极低。依托中国铀业有限公司地勘费项目, 笔者等在川北地区开展了大量的野外地质调查工作, 在广元市青川县建峰镇田坝子剖面发现了多处宽度约为数十厘米至 1 m 不等的沥青脉, 手持式伽玛辐

射仪 (HD-2000 型) 现场测试放射性强度超过 120 Ur (放射性元素总含量单位), 这为研究川北地区铀成矿和古油藏的关系提供了天然样本。本文通过对川北田坝子剖面含铀沥青脉与 303 矿床铀矿石的矿物学、元素地球化学、光谱学的对比研究, 探讨了 303 矿床中与铀成矿密切相关的有机质类型, 提出了川北地区下一步铀矿找矿的关注方向, 并建议适当关注川西沥青脉的伴生元素的综合利用。

1 区域地质背景

含铀沥青脉均发现于四川省广元市, 其大地构造位置位于扬子准地台与松潘—甘孜断皱系的过渡部位 (图 1a)、龙门山断前构造带的北段广元上寺—磨刀崖地区 (图 1b), 该地区目前还未有砂岩型铀矿床 (点) 的报道。该区由于地表和钻井中寒武系至三叠系油气显示极为丰富, 下古生界又有大量沥青脉而受到石油地质专家的广泛关注 (黄第藩等, 2008; 周文等, 2007; 刘光祥等, 2003; 王约等, 2008)。区内出露地层包括下寒武统、中奥陶统、中—下志留

注: 本文为中国铀业有限公司地勘费项目 (编号: 202133-2) 的成果。

收稿日期: 2021-04-28; 改回日期: 2021-11-21; 网络首发: 2021-12-20; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2021.12.025

作者简介: 邱林飞, 男, 1984 年生, 高级工程师, 在职博士研究生, 主要从事铀矿地质与地球化学研究; Email: qlf0602@163.com。通讯作者: 胡宝群, 男, 1965 年生, 教授, 博导, 长期从事铀矿地质和金矿地质、应用地球化学等方面的教学和科研; Email: Bqhu@ecut.edu.cn。

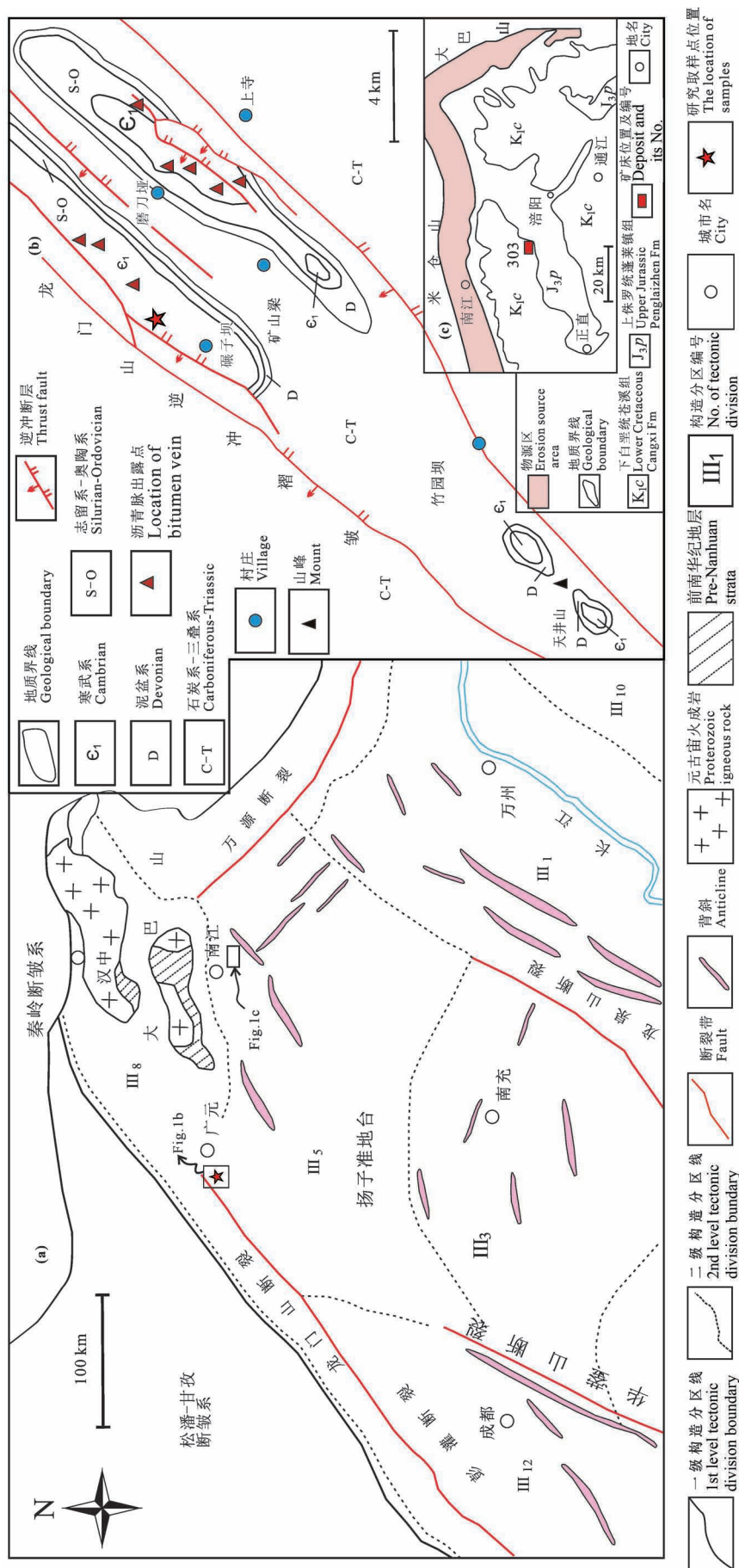


图1 川北广元田坝元田构造位置示意图 (a) (据魏健, 2014修改)、含铀沥青脉出露区地质简图 (b) (据刘光祥等, 2003修改) 及 303矿床区域地质简图 (c) (据侯学文等, 2017修改)

Fig. 1 Schematic tectonic position of Tianbazi section in Guangyuan, northern Sichuan (a) (modified from Wei Jian, 2014&) ; sketch geological map of the area of the U-bearing bitumen vein (b) (modified from Liu Guangxiang et al., 2003&) and sketch geological map of the area of the 303 U-deposit (c) (modified from Hou Xuewen et al., 2017&)

统、泥盆系、石炭系、二叠系、中一下三叠统及侏罗系,除侏罗系为陆相沉积外,其他层系均属海相或海陆过渡相沉积(刘光祥等,2003)。下寒武统中、下部为灰色、灰绿色泥质粉砂岩—粉砂岩,间夹灰绿色页岩,中奥陶统下部为钙质粉砂岩夹钙质页岩,上部为龟裂纹灰岩,中一下志留统为灰绿色页岩、砂质页岩及粉砂岩,泥盆系、二叠系的栖霞组(P_{1q})、茅口组(P_{1m})、吴家坪组(P_{2w})及下三叠统飞仙关组(T_3f)以碳酸盐岩为主,间夹薄层泥页岩或硅质岩,侏罗系为陆相砂泥岩,与下伏层系呈角度不整合接触(刘光祥等,2003;王约等,2008;魏健,2014;饶丹等,2008),不同层系岩石地层中均未见铀异常。303 铀矿床位于含铀沥青脉发现点的正东约 150 km 的巴中市南江县内(图 1a),铀矿化主要产于侏罗系蓬莱镇组(J_3p)与白垩系苍溪组(K_1c)的沉积间断面之上(图 1c),铀矿体一般赋存于苍溪组第一韵律底界之上 0 ~ 8 m 的范围内,矿体呈似层状、透镜状顺地层分布,倾角一般为几度至十几度,赋矿砂岩为钙

质胶结中细粒岩屑长石砂岩,富含黑色“有机质”,铀矿化与有机质、黄铁矿化密切相关(侯学文等,2017)。

由于逆掩断层的推覆作用,在四川盆地龙门山褶皱带东南缘形成了 2~3 排幅度相对较低的褶皱构造,它们形成于海西运动的末期(黄第藩等,2008)。海西运动使龙门山褶皱隆升并向东南推掩而形成了东缘的褶皱带,并且形成了一些与主轴方向大体一致的小型断层和十分发育的裂缝系统,为下伏震旦系(埃迪卡拉系)和下寒武统油藏的原油注入提供了有利条件。川北广元地区沥青脉的形成与震旦系和寒武系的烃源岩有关(黄第藩等,2008,王杰等,2016)。

2 样品与实验方法

2.1 沥青脉与铀矿石宏观产出特征

沥青脉主要集中分布在下寒武统泥质粉砂岩中,沿次一级断层、裂隙分布,走向一般为 $30^{\circ} \sim$



图 2 广元田坝子剖面沥青脉及巴中 303 矿床铀矿石野外宏观产出特征

Fig. 2 Outcropping of the bitumen vein from the Tianbazi section in Guangyuan and U-ores from the 303 deposit in Bazhong City

50°, 倾角为 50° ~ 70°, 呈脉状、透镜状产出, 宽度为数十厘米至 2 m 不等, 长度为数米至数百米不等, 是古油藏后期运移、聚集和裂解的产物。手标本呈黑色、块状构造, 与镜煤或高碳质页岩相似, 表面光亮, 结构均匀、坚实, 可以点燃(图 2a、b)。野外现场, 手持式伽玛辐射仪(HD-2000)现场测试该沥青脉放射性强度超过 120 Ur, 本研究在田坝子剖面含铀沥青脉的北东段和南西段分别随机性的各采集了一件样品(样品号: LQ-1 和 LQ-2), 两块样品距离大约差距 200 m, 用于开展研究。并采集了 303 砂岩型铀矿床中的 2 件高品位富铀矿石(样品号: LX25-5-5 和 LX25-5-6)和 2 件低品位铀矿石(样品号: LX25-5-1 和 LX25-5-4)进行对比研究, 303 矿床富铀矿石为富含有机质的岩屑长石砂岩, 手标本一般呈深灰色、灰黑色, 矿石中的有机质呈浸染状、细脉状, 部分沿层理顺层分布, 部分与岩层层理具有明显的交角(图 2c、d)。

2.2 实验方法

对采集的沥青脉开展了显微观察、扫描电镜、电子探针、显微激光拉曼光谱、显微红外光谱、主量元素和微量元素和稀土元素的研究工作。其中, 显微观察使用 Leica DM4P 偏光显微镜。扫描电镜观察使用 TESCAN VEGA3 和 FEI Nova Nano SEM450 型扫描电子显微镜, 工作条件为 20 kV, 束流为 15 μA 。电子探针分析使用 JXA-8000 型电子探针高压为 20 kV, 束流为 10 nA, 工作距离为 11 mm, 面扫描步长为 1 μm 。激光拉曼分析使用法国 HORIBA 公司生产的 LabRAM Evolution 型激光拉曼光谱仪, 扫描范围为 100 ~ 4000 cm^{-1} , 激光器波长为 532 nm。红外光谱分析使用 Bruker 公司生产的 LUMOS 显微傅里叶红外光谱仪, 模式为 ATR, 扫描范围为 640 ~ 4000 cm^{-1} 。主量元素分析使用 Axios-mAX 波长色散 X 射线荧光光谱仪和 Z-2000 石墨炉原子吸收分析仪, 将样品粉碎至 200 目以下, 称取 1 g 样品, 先用马弗炉在 650 $^{\circ}\text{C}$ 条件测定烧失量后, 再测定灰分中的主量元素, 具体测试过程参照相关国家和行业标准执行。微量元素测定使用 ELEMENT XR 等离子体质谱仪, 将样品粉碎至 200 目以下, 称取 0.5 g 样品, 使用硝酸溶解样品后测定微量元素和稀土元素, 参照国标 GB/T 14506.30-2010 执行, 测试精度优于 0.01‰。上述测试均在核工业北京地质研究院完成。

3 结果与讨论

3.1 矿物学

扫描电镜—能谱分析表明, 含铀沥青脉中含有大量的微粒状矿物, 包括微米级的石英、钾长石、钠长石、白云石、重晶石、黄铜矿、闪锌矿、方铅矿及呈微—纳米结构的草莓状黄铁矿, 个别矿物中含少量的铀。其中, 石英、钾长石、钠长石和白云石主要呈条状、短柱状、不规则状(图 3a、b), 可能为古油气流体所经过的地层中混入的碎屑岩颗粒, 重晶石、黄铁矿、黄铜矿、闪锌矿、稀土矿物等呈极小的微米—亚微米结构, 一般为 1 ~ 5 μm , 呈微粒状、草莓状、浑圆状(图 3c—f), 应该为古油气系统裂解后重新结晶形成的矿物, 其中未发现独立的铀矿物。利用电子探针面扫描功能分析了 Si、Fe、U、V、Mo、S、Ba 元素分布状态, 其中 Si、Fe、S、Ba、V 元素含量较高(图 4a、b、d、e、f), U、Mo 元素含量相对较低(图 4c、g), 表明 U 和 Mo 元素可能以超显微结构存在沥青中。303 矿床富铀矿石中的铀矿物主要为铀石, 与细脉状有机质密切共生, 并可见到黄铁矿、重晶石、闪锌矿等结晶矿物与铀矿物相伴生, 一般为 1 ~ 10 μm , 呈微粒状、草莓状、浑圆状(图 3g—l), 指示铀矿石中与成矿密切相关的蚀变矿物组合与沥青脉中结晶的矿物组合特征具有一定相似性。

3.2 沥青脉及铀矿石中有机质光谱学

对田坝子剖面沥青脉和 303 矿床铀矿石的有机质分别开展了激光拉曼和红外光谱分析, 分析结果如图 5 所示。沥青脉具有较强的一级峰和较弱的二级峰特征, 一级峰由 1381 cm^{-1} (D 峰)和 1577 cm^{-1} (G 峰)构成, 二级峰由 2637 cm^{-1} (2D 峰)、2883 cm^{-1} (2D+2G 峰)、3163 cm^{-1} (2G 峰)等构成(图 5a)。铀矿石中的有机质仅具有较强的一级峰, 由 1309 cm^{-1} (D 峰)和 1577 cm^{-1} (G 峰)构成(图 5b)。D 峰与碳物质的无序程度有关, 其谱带的宽度随着有机质的演化而降低, G 峰与碳物质分子结构中 C = C 键的拉伸振动有关, 其谱带的强度随着有机质的演化而增加(Vermaak et al, 2011)。因此, 沥青为高无序度、高演化程度的有机质, 而铀矿石中的有机质有序度和演化程度均相对较低。

红外光谱分析结果显示, 沥青脉具有 800 cm^{-1} 、876 cm^{-1} 、1028 cm^{-1} 、1161 cm^{-1} 、1375 cm^{-1} 、1455 cm^{-1} 、1602 cm^{-1} 、2854 cm^{-1} 、2924 cm^{-1} 及 3430 cm^{-1} 附近的吸收峰, 铀矿石中的有机质具有 694 cm^{-1} 、788 cm^{-1} 、1021 cm^{-1} 、1245 cm^{-1} 、1455 cm^{-1} 、1550 cm^{-1} 、1649 cm^{-1} 、2852 cm^{-1} 、2924 cm^{-1} 、2959 cm^{-1} 及 3700 cm^{-1} 附近的吸收峰。其中, 3430 cm^{-1} 与 3700

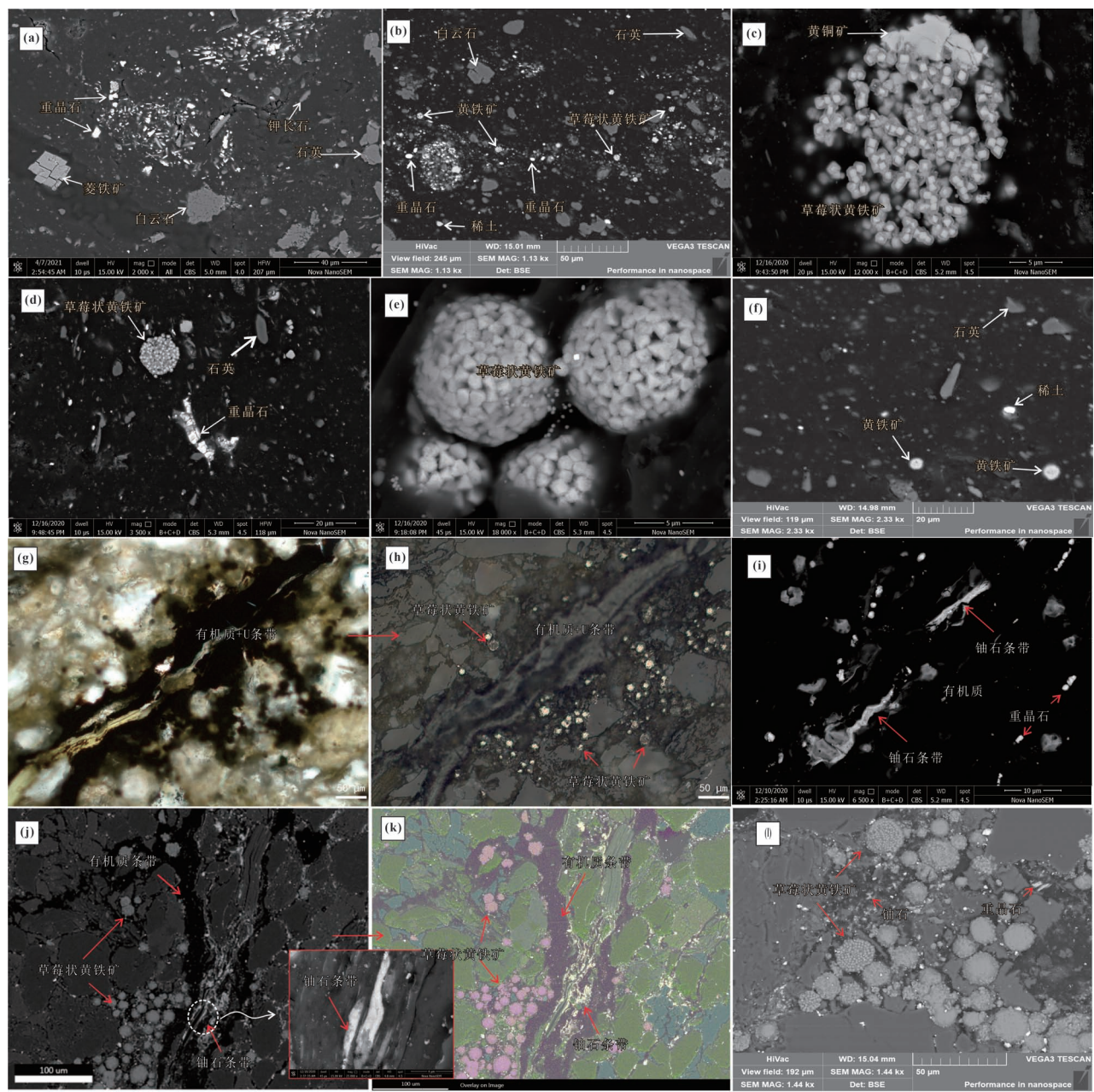


图 3 广元田坝子剖面沥青青脉及巴中 303 矿床富铀矿石中的主要矿物显微特征: (a)一(f),(i),(j)、(l) 电子背散射照片; (g) 透射光照片; (h) 反射光照片; (k) 扫描电镜面扫描合成图。(a)、(b) 沥青脉中发育微—细粒状重晶石、黄铁矿,条状、短柱状、不规则状石英、钾长石、白云石和菱铁矿;(c)一(e) 沥青脉中见草莓状黄铁矿、短柱状重晶石及少量的黄铜矿;(f) 沥青脉中发育草莓状黄铁矿及微粒状稀土矿物;(g)一(l) 铀矿石微裂缝中充填黑色脉状有机质及草莓状黄铁矿、细粒状重晶石

Fig. 3 Microscopic lithofacies of the bitumen vein from Tianbazi section in Guangyuan and U-ores from 303 deposit in Bazhong City: (a)一(f),(i),(j)、(l) BSE image; (g) Transmitted light image; (h) reflected light image; (k) Overlay image of elements by Scanning Electron Microscope (a)、(b) Micro—fine grained barite, pyrite, strip and short column quartz, potash feldspar, dolomite and siderite were observed in the bitumen vein;(c)一(e) Strawberry-shaped pyrite, short columnar barite and a small amount of chalcopyrite were observed in the bitumen vein;(f) Strawberry-like pyrite and particulate REE minerals were observed in bitumen vein;(g)一(l) The micro-fractures of uranium ore are filled with black vein-like organic matter, strawberry-like pyrite, and fine-grained barite

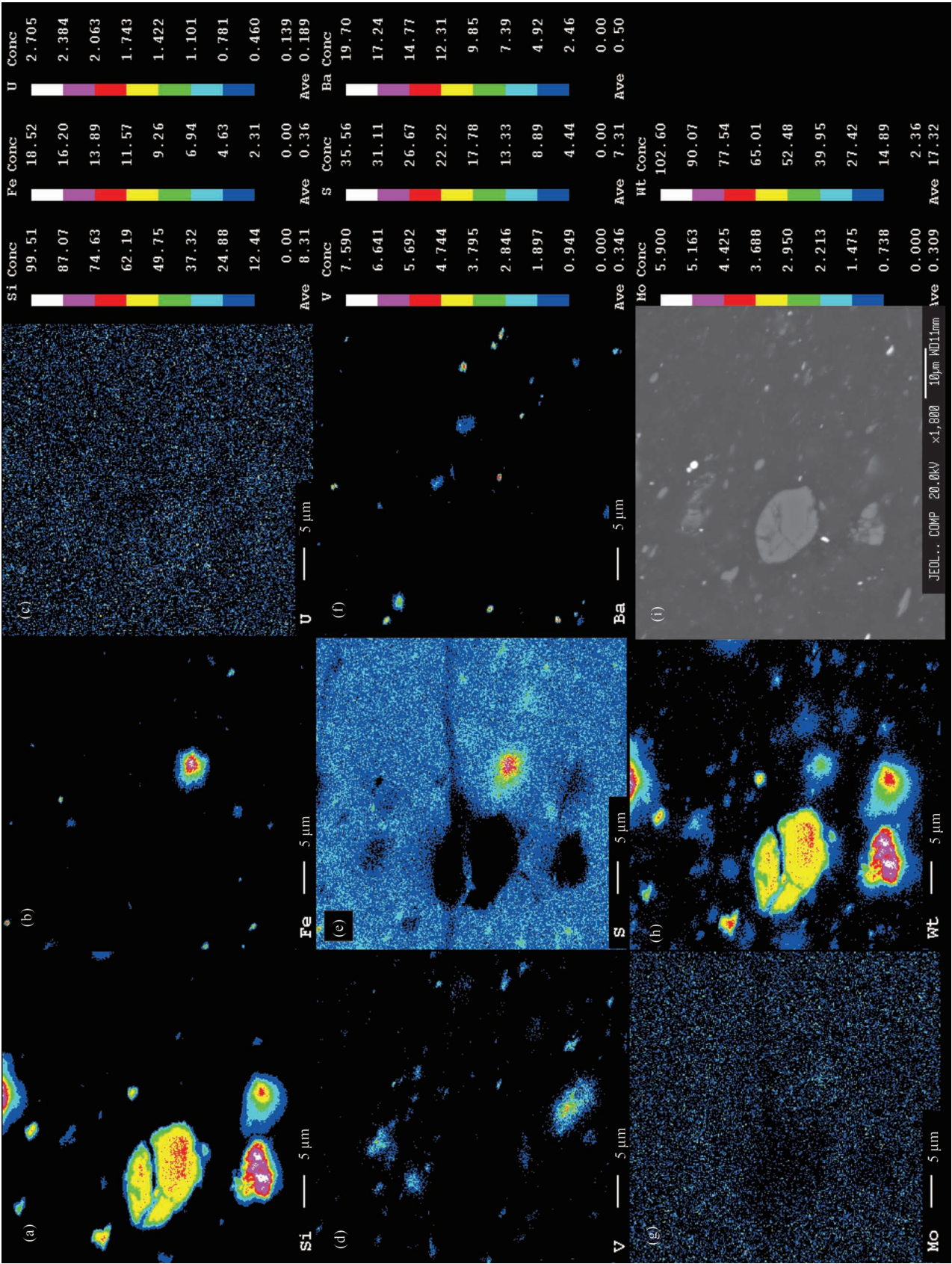


图 4 广元田坝子剖面含铀沥青元素电子探针扫描分布图: (a) Si 元素面扫描分布图; (b) Fe 元素面扫描分布图; (c) U 元素面扫描分布图; (d) V 元素面扫描分布图; (e) S 元素面扫描分布图; (f) Ba 元素面扫描分布图; (g) Mo 元素面扫描分布图; (h) 元素面扫描分布合成图; (i) 电子背散射照片

Fig. 4 Scanning distribution map of elements of the bitumen vein by EPMA from Tianbazi section, Guangyuan: (a) scanning distribution map of Si; (b) scanning distribution map of Fe; (c) scanning distribution map of U; (d) scanning distribution map of V; (e) scanning distribution map of S; (f) scanning distribution map of Ba; (g) scanning distribution map of Mo; (h) overlay image of all elements; (i) BSE image

cm^{-1} 附近的吸收峰与 H_2O 和羟基的振动有关, $2854\text{ cm}^{-1} \sim 2924\text{ cm}^{-1}$ 的吸收峰与脂肪族中的甲基、亚甲基的伸缩振动有关, $1600 \sim 1650\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰与苯环的 $\text{C}=\text{C}$ 键或甲基—亚甲基团中的 $\text{C}-\text{H}$ 键的伸缩振动有关 (Masson, 2001; Karlsson, 2003), $1450 \sim 1550\text{ cm}^{-1}$ 附近的吸收峰与 CH_2 和 CH_3 基团的 $\text{C}-\text{H}$ 键的变形振动和对称拉伸振动有关, 1380 cm^{-1} 附近的吸收峰与 CH_2 和 CH_3 基团的弯曲振动或芳族化合物 $\text{COO}-$ 基团的不对称拉伸振动有关, 1245 cm^{-1} 附近的吸收峰与醛类化合物的伸缩振动有关, 1030 cm^{-1} 附近的吸收峰与醇类、醚类的 $\text{C}-\text{O}$ 键的弯曲振动有关 (Wu Meng et al, 2016), $700\text{ cm}^{-1} \sim 800\text{ cm}^{-1}$ 的谱带与芳族化合物的振动有关 (Guan Xiaohong et al, 2007)。因此, 无论是田坝子剖面的沥青脉, 还是 303 铀矿床中的有机质, 它们都是一种具有复杂分子结构, 包含多个基团 (甲基、亚基、羧基、苯环等) 的大分子有机物。

3.3 元素地球化学

3.3.1 主量元素

田坝子剖面沥青脉与 303 矿床富铀矿石主量元素分析结果如表 1 所示。沥青脉的烧失量约为 70%, 其中的 SiO_2 含量可达 20% 以上, 其次含有 Al、Fe、Mg、Ca、K 等。沥青脉的烧失量基本反应了其中的有机质含量, 其中也含有少量的碳酸盐矿物 (方解石和白云石) 分解所释放的 CO_2 , 高 SiO_2 含量与扫描电镜矿物学研究所观察到的结果一致。高品位富铀矿石 (铀含量大于 2‰) 的烧失量为 14.7% ~ 17.53%, SiO_2 含量为 47% ~ 49%, CaO 含量为 14% ~ 19%, 低品位铀矿石 (铀含量大于 0.3‰) 的烧失量为 8.21% ~ 9.38%, SiO_2 含量为 60.61% ~ 64.08%, CaO 含量为 5.53% ~ 9.38%, 富铀矿石和铀矿化砂岩中的 Al、Fe、Mg、K 等的含量变化不大, 低品位铀矿石的烧失量低于富铀矿石约为 6% ~ 8%。303 矿床铀矿石中较高的碳酸盐含量指示赋矿砂岩曾发生强烈碳酸盐胶结作用, 较高的烧失量除与碳酸盐较为发育外, 还与铀矿石中富含有机质有关。

3.3.2 微量元素和稀土元素

田坝子剖面沥青脉与 303 矿床富铀矿石及低品位铀矿石的微量元素和稀土元素分析结果如表 2 所示。分析结果表明, 沥青脉中的微量元素和稀土元素十分富集, 总含量达到了 8000×10^{-6} 以上, 主要富集 Mo、Cd、U、Re、Ba 元素, 次要富集 Sc、V、Ni、Cu、Zn、Rb、Tl, 相对亏损 Li、Be、Co、In、Th 等 (图 6)。稀土元素配分曲线显示, 沥青脉的各类稀土元素丰度均为球粒陨石的十倍以上, 表明田坝子剖面沥青脉中是十分富含稀土元素的, 轻重稀土的分异不大, 整体表现为略微右倾的缓倾斜型 (图 7)。303 矿床高品位富铀矿石中的微量元素和稀土元素也十分富集, 总含量达到了 5000×10^{-6} 以上, 主要富集 Mo、Cd、U、Re、Ba 元素, 次要富集 Sc、V、Sb、Rb、Tl, 相对亏损 Be、Co、Ga、In、Th 等, 低品位铀矿石中的微量元素和稀土元素也十分富集, 总含量介于 $2500 \times 10^{-6} \sim 5800 \times 10^{-6}$ 之间, 微量元素与高品位富铀矿石基本一致, 也主要富集 Mo、Cd、U、Re 元素, 次要富集 Sc、V、Sb、Rb、Tl, 相对亏损 Be、Co、Ga、In、Th 等, 但含量总体低于高品位富铀矿石。303 矿床富铀矿石的稀土元素配分曲线表现为右倾型, 更为富集轻稀土, 具有低负 Eu 异常 (δEu 为 0.19 ~ 0.31)。总体上, 田坝子剖面沥青和铀矿石中的大部分微量元素特征都表现出了较高的相似性, 尤其是都富含 Mo、Cd、U、Re、Sc、Sb 元素, 稀土元素含量都较高, 普遍达到球粒陨石的十倍以上, 但 303 矿床铀矿石中的轻稀土相对更为富集, 这可能与测试的样品为粉碎后的砂岩全岩样品有关, 砂岩全岩样品中往往含有更富轻稀土的壳源岩石组分端元。

表 1 广元田坝子剖面沥青脉与巴中 303 矿床富铀矿石砂岩主量元素含量(单位:%)

Table 1 Major elements content (%) of the bitumen vein from the Tianbazi section in Guangyuan and uranium ores from the 303 deposit in Bazhong City

样品性质	样号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	P ₂ O ₅	FeO	烧失量	合计
含铀沥青脉	LQ-1	22.83	1.42	0.416	0.903	1.7	0.373	0.385	0.023	0.119	0.091	0.34	68.99	97.59
	LQ-2	21.68	1.38	0.413	0.85	1.68	0.336	0.383	0.018	0.122	0.089	0.34	70.21	97.50
矿化砂岩	LX-25-5-1	60.61	9.63	3.41	1.59	9.38	1.86	1.66	0.103	0.665	0.128	1.64	9.38	100.05
	LX-25-5-4	64.08	10.07	4.03	1.69	5.53	1.86	1.65	0.058	0.66	0.119	2.11	8.21	100.07
富矿石	LX-25-5-5	46.74	6.84	2.75	1.34	19.06	1.50	1.17	0.122	0.49	0.099	1.54	17.53	99.18
	LX-25-5-6	49.25	7.65	4.74	1.15	14.31	1.56	1.34	0.164	0.485	0.106	1.02	14.76	96.54

4 地质意义

4.1 对铀成矿的启示

沉积盆地内,有机质参与金、铜铅锌等各类金属(尤其是铀)矿床的成矿作用的早已被国内外学者所证实 (Spirakis, 1996; Langmuir, 1978; 卢家烂等, 2004; Qiu Linfei et al, 2021)。在砂岩型铀成矿作用中,铀的成矿机理可概括为:蚀源区或地层中的铀,经表生流体的氧化作用形成铀酰离子(UO_2^{2+}),当含铀酰离子的含矿流体流经富含还原性介质的地层

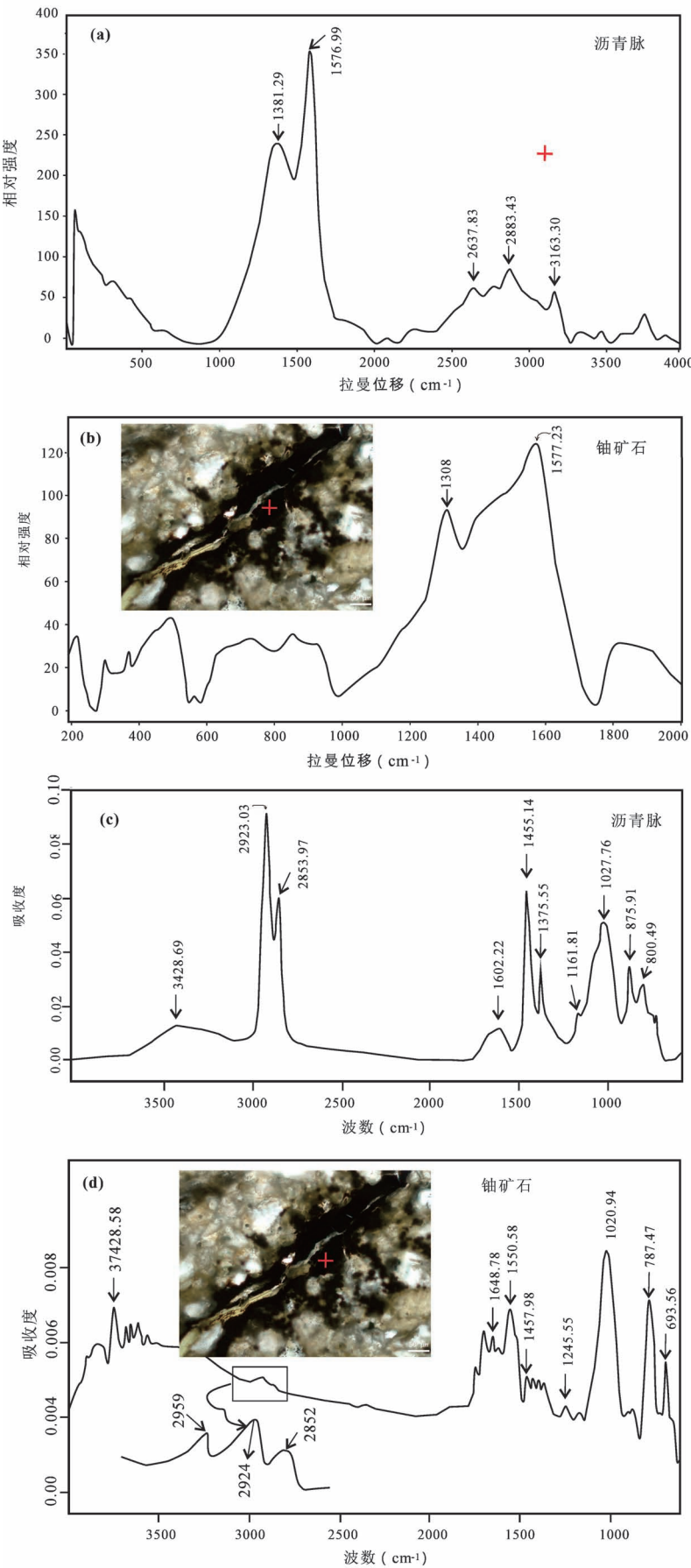
时,发生氧化—还原作用,使易溶解迁移的 6 价铀转化为难溶解迁移的 4 价铀而发生沉淀 (Langmuir, 1978)。根据铀成矿作用中有机质的类型又可以分为两种成矿模式(图 8) (Bonnetti et al, 2020):第一种认为还原剂主要为地层中的沉积有机质(如炭屑、腐殖质等),第二种认为还原剂主要为深部油气分异—裂解过程中所形成的 H_2S 和轻烃组分($\text{C}_1 \sim \text{C}_5$),哪类有机质在铀成矿作用中起主导作用还存在明显不同的认识。

四川盆地西北部具有良好的铀成矿条件,下白

表 2 广元田坝子剖面沥青脉与 303 矿床铀矿石及铀矿化砂岩微量元素、稀土元素含量($\times 10^{-6}$)

Table 2 Trace elements and REE elements content ($\times 10^{-6}$) of the bitumen vein from the Tianbazi section and U-ores from the 303 deposit, Guangyuan

样号	LQ-1	LQ-2	LX25-05-01	LX25-05-04	LX25-05-05	LX25-05-06	样号	LQ-1	LQ-2	LX25-05-01	LX25-05-04	LX25-05-05	LX25-05-06
Li	5.46	5.54	25.5	29.7	28.9	40.8	Tl	3.32	3.84	0.264	7.59	1.48	30.7
Be	0.44	0.44	0.998	1.36	0.84	1.51	Pb	15.5	16.9	28	18	75.6	204
Sc	3.71	4.1	8.36	9.55	7.44	7.91	Bi	0.157	0.165	0.078	0.111	0.054	0.098
V	1663	1712	104	69.8	130	588	Th	1.68	1.85	7.07	7.25	4.75	5.67
Cr	412	430	158	175	210	148	U	65.1	70.2	324	261	2983	8990
Co	5.39	6.03	8.61	11.3	7.48	9.86	La	12.5	11.8	30.8	33.2	22.5	27.5
Ni	418	432	23.3	25.8	21.2	23.5	Ce	20.2	21.1	56.2	49.8	38.9	43.7
Cu	160	171	29.2	18.3	10.3	14.7	Pr	2.84	3.15	7.99	6.26	5.41	5.74
Zn	357	375	58.8	71.8	43.2	56.2	Nd	13	13.6	31.1	21.8	19.8	22.5
Ga	4.63	4.99	9.83	13	7.89	11.5	Sm	3.24	3.2	5.68	4.33	3.58	4.68
Rb	10	10.6	48.3	53.4	36.8	46.9	Eu	0.98	1.11	1.34	0.863	0.988	0.792
Sr	113	117	233	198	394	339	Gd	3.1	3.29	5.17	3.19	3.37	3.65
Y	51.8	54.4	26.1	13.6	16.7	20.6	Tb	0.781	0.721	0.838	0.478	0.576	0.639
Mo	444	464	40.9	4034	112	1121	Dy	3.93	4.2	4.51	3.08	2.83	3.43
Cd	12.1	13.8	0.27	10.2	0.422	2.81	Ho	1.08	1.13	0.865	0.491	0.619	0.631
In	0.012	0.015	0.029	0.044	0.027	0.037	Er	3.29	3.53	2.35	1.62	1.64	1.97
Sb	1.77	1.97	0.905	1.07	0.787	6.19	Tm	0.637	0.705	0.387	0.264	0.257	0.28
Cs	0.643	0.695	2.59	2.89	1.87	2.04	Yb	4.43	4.51	2.53	1.72	1.84	2.01
Ba	4422	4491	1233	543	422	1061	Lu	0.669	0.749	0.357	0.256	0.252	0.268
W	2.06	2.03	0.778	1.28	1.01	1.53	ΣREE	70.677	72.795	150.117	127.352	102.562	117.79
Re	0.358	0.372	0.132	0.51	3.46	17.8	δEu	0.31	0.34	0.25	0.23	0.28	0.19



垂统苍溪组为一套紫色、深灰色、灰黑色富含有机质的中细粒岩屑砂岩,砂岩岩屑中富含火山岩岩屑,赋矿砂岩 U 含量一般在 $10\times10^{-6} \sim 50\times10^{-6}$,具有良好的铀源条件(朱西养等,2004)。该区下寒武统地层中广泛出露沥青脉(黄第藩等, 2008; 周文等, 2007; 刘光祥等, 2003),其形成时代为新元古代晚震旦世(572 ~ 559Ma)(王杰等,2016),指示川西地区古油藏分布广,晚震旦世油气活动强烈。本研究发现,在田坝子剖面下寒武统地层中产出多处沥青脉,含有较高的铀含量(约 70×10^{-6}),而未见独立的铀矿物,也未发现其它矿物中含铀,铀应该是以超显微结构的形式赋存在沥青中,这表明了铀可以超显微结构形式(可能为络合物或螯合物)随油气共同迁移,这一点也被大量的成矿模拟实验所证实(Meunier et al, 1990; Wood et al, 1996; Sharma et al, 2020)。显微激光拉曼和红外光谱学研究表明,田坝子剖面的沥青脉和 303 铀矿床中的有机质具有相似性,它们都是一种具有复杂分子结构、包含多个基团(甲基、亚甲基、羧基、苯环等)的大分子有机物,沥青脉具有更高的无序度和演化程度。

图 5 广元田坝子剖面沥青脉和巴中 303 矿床富铀矿石中有机质的显微激光拉曼与红外光谱图:(a) 田坝子剖面沥青脉的显微激光拉曼光谱图;(b) 303 矿床富铀矿石中有机质的显微激光拉曼光谱图;(c) 田坝子剖面沥青脉的红外光谱图;(d) 303 矿床富铀矿石中有机质的红外光谱图

Fig. 5 Micro laser Raman and infrared spectrum of the bitumen vein from the Tianbazi section in Guangyuan and organic of U-ores from the 303 deposit in Bazhong City: (a) Micro-laser Raman spectra of the bitumen vein from the Tianbazi section; (b) Micro-laser Raman spectra of organic matter in high grade uranium ore from the 303 deposit; (c) Infrared spectrum of the bitumen vein from the Tianbazi section; (d) Infrared spectrum organic matter in high grade uranium ore from the 303 deposit

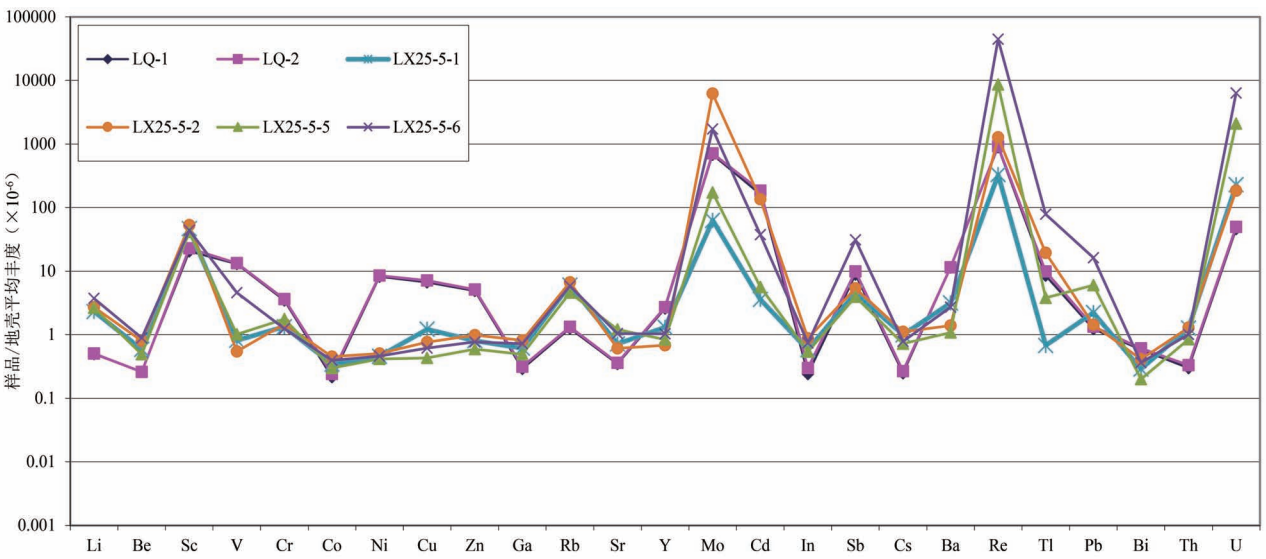


图 6 广元田坝子剖面沥青脉与巴中 303 矿床铀矿石/矿化砂岩微量元素蛛网图

Fig. 6 Trace element change curve of the bitumen vein from the Tianbazi section in Guangyuan and U-ores from the 303 deposit in Bazhong City

303 矿床富铀矿石中的特征元素 (Mo、Cd、U、Re、Sc 等) 与田坝子剖面沥青脉具有很大的相似性, 并且都富集稀土元素, 这些都表明 303 铀矿床的形成或许与油气流体的活动有关。事实上, 国际上与沥青 (古油藏) 密切相关的大型—超大型铀矿床 (田) 的实例非常丰富, 如美国的 grants、加蓬的 Oklo 及加拿大的 Athabasca 等 (Lecomte et al. , 2020; Fuchs et al. , 2017; Alexandre and Kyser. , 2006) 。因此, 本研究认为: 在川北地区, 铀成矿作用与油气流体活动

具有较强的关联性, 该区是四川盆地内古油藏出露最为普遍的地区, 具有寻找与油气流体活动相关的铀矿床的潜力, 未来的铀矿找矿工作中, 应该重点关注古油气藏 (沥青) 所出露的地区。

4.2 沥青脉中金属元素的综合利用

元素分析结果显示, 川西沥青脉中主要富含 Mo (450×10^{-6})、Cd (13×10^{-6})、U (70×10^{-6})、Re (0.4×10^{-6})、Ba (4000×10^{-6})、V (1700×10^{-6})、Cu (160×10^{-6})、Zn (360×10^{-6}) 等, 其烧失量约为 70%。在沥青被煅烧 (灰化) 后, 其中的有机质基本被去除, 因而其金属含量可以增长为原来的 3.5 倍左右, 即主要富集元素分别可达: Mo (1575×10^{-6})、Cd ($45\times$

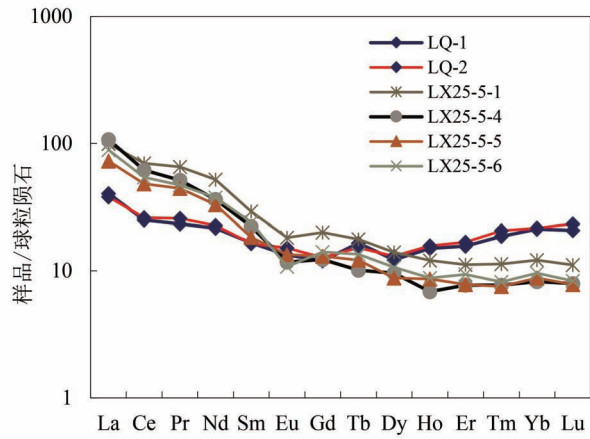


图 7 广元田坝子剖面沥青脉与 303 矿床铀矿石
稀土元素配分曲线

Fig. 7 REE distribution patterns of the bitumen vein from the Tianbazi section in Guangyuan and U-ores from the 303 deposit in Bazhong

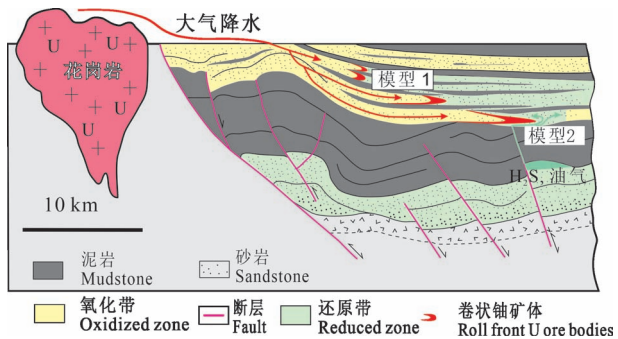


图 8 砂岩型铀矿两种主要的成矿模式
(据 Bonnetti et al. , 2020 修改)

Fig. 8 Two main metallogenic models of sandstone-type uranium deposits (modified after Bonnetti et al. , 2020)

10^{-6})、U (245×10^{-6})、Re (1.4×10^{-6})、Ba (14000×10^{-6})、V (5950×10^{-6})、Cu (560×10^{-6})、Zn (1260×10^{-6})。上述富集元素中,Mo(工业品位一般为 $600\times10^{-6}\sim800\times10^{-6}$)、U(工业品位一般为 300×10^{-6})、Re(稀有稀散元素,地球平均丰度仅为 0.001×10^{-6})在沥青灰化之后,可达工业综合利用价值。U 是核工业的“粮食”,是发展核工业必不可少的原料,Mo 是具有高熔点(2620°C)、高沸点(5560°C)、强度大、电导率大、导热性能好、耐腐蚀等显著的特征(李龙杰等,2020),铼是一种稀散难熔金属,具有高熔点(3180°C)、高沸点(5627°C)、耐热、耐腐蚀、耐磨等特性(陈振岩等,2021),铈铍合金因其良好的力学性能、热物理、抗辐照等特性被广泛用作核反应堆的核材料(黄洪涛等,2016;张家润等,2020),此外还广泛应用于国防、航空航天、电子及机械工业等特殊行业(张家润等,2020)。综上所述,铀、钼、铼元素是发展核工业十分重要的核材料,而川北沥青脉在灰化之后,其中的铀、钼、铼元素都富集到了可综合利用的程度。此外,川北广元市朝天区、剑阁县、青川县等地区广泛发育沥青脉,其产出规模大,延伸稳定(魏健,2014)。建议在未来的研究中,可适当关注川北沥青脉伴生元素的综合利用。

5 结语

(1) 本文详细研究了川北含铀沥青脉的矿物学、元素地球化学及光谱学特征,并对比研究了 303 矿床铀矿石及其有机质,证实了川北沥青脉中含有不可见的铀。

(2) 铀可能以超显微结构形式(可能主要为络合物或螯合物)随古油气流体共同迁移,结合 303 矿床铀矿石的蚀变矿物组合、有机质光谱学特征及其微量元素特征,认为川北地区的铀成矿作用与油气流体活动具有较强的关联性,具有寻找与油气流体活动相关的铀矿床的潜力。未来的铀矿找矿工作中,川北地区应该重点关注古油气藏(沥青)所出露的地区。

(3) 川北地区沥青脉经煅烧(灰化)之后,其中的 U、Mo、Re 已经达到了综合利用价值,应给予适当关注。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

陈友良. 1995. 川北砂岩型铀矿床成矿条件及成矿模式探讨. 四川

地质学报,15(1):56~59.

陈振岩,王雷,崔向东,单芝波,宋柏荣,张雷. 2021. 开鲁盆地钱家店铀矿区铼的地球化学特征与成矿作用. 沉积学报: 1~27.

郭宁,孙泽轩. 2017. 川北砂岩铀矿类型及找矿方向. 地质与勘探,53(1):54~62.

侯学文,孙泽轩,莫帮洪,张亮. 2017. 川北 303 铀矿床矿化特征及其控矿因素. 四川地质学报,37(4): 600~603.

胡彬和,李龙,吴晓春,孙征,柯国土. 2016. 铈铍合金对掉落临界安全的影响. 原子能科学技术,50(10):1813~1816.

黄第藩,王兰生. 2008. 川西北矿山梁地区沥青脉地球化学特征及其意义. 石油学报,29(1):23~28

黄洪涛,王卫军,钟武辉,郑剑平,赵守智. 2016. 铈铍合金在空间核电源中的应用性能研究进展. 原子能科学技术,54(3):505~511)

李龙杰,李忠,李荀. 2020. “铈不暇接”——无处不在的铈元素. 大学化学,35(11): 62~65.

刘光祥,王守德,潘文蕾,吕俊祥. 2003. 广元天井山古油藏剖析. 海相油气地质,8(1~2):103~107

卢家烂,傅家谟,彭平安. 2004. 金属成矿中的有机地球化学研究. 广州: 广东科技出版社

莫帮洪,刘志鹏,邓祖林,肖柯相,韩文文,杨航. 2019. 四川盆地北缘旺苍背斜铀成矿地质特征及找矿前景. 地质与勘探,55(02): 519~527.

饶丹,秦建中,腾格尔,张美珍. 2008. 川西北广元地区海相层系油苗和沥青来源分析. 石油实验地质,30(6):596~599+605.

王杰,腾格尔,刘文汇,马亮帮,陶成,周圆圆,王萍,李超. 2016. 川西矿山梁下寒武统沥青脉油气生成时间的厘定——来自于固体沥青 Re-Os 同位素等时线年龄的证据. 天然气地球科学,27(7): 1290~1298.

王约,王训练,高金汉,黄禹铭,苏文博,徐一帆. 2008. 川北青川地区下寒武统沥青质砾石的发现及其意义. 地质通报,27(1):149~152.

魏健. 2014. 广元天然沥青矿成因探讨. 导师: 钟康惠,李金高. 成都:成都理工大学硕士学位论文.

巫声扬,王德生,王淑华. 1988. 川北砂岩型铀矿床中沥青铀矿特征及其成矿时代. 矿物学报,8(4):365~372.

巫声扬,王德生. 1991. 川北陆相砂岩型铀矿床成岩与成矿过程中有机质对铀的富集作用. 铀矿地质,7(5): 265~272.

张家润,刘智勇,刘志宏,李启厚. 2020. 高纯铼及其化合物的制备与应用研究进展. 粉末冶金材料科学与工程,25(04):273~279.

周文,邓虎成,丘东洲,谢润成. 2007. 川西北天井山构造泥盆系古油藏的发现及意义. 成都理工大学学报(自然科学版),34(4): 413~417

朱西养,汪云亮,王志畅,张成江. 2004. 川北砂岩型铀矿稀土元素特征及铀成矿作用. 铀矿地质,02:71~79.

Alexandre P, Kyser T K. 2006. Geochemistry of uraniferous bitumen in the southwest Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada. Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists, 101(8): 1605~1612.

Bonnetta C, Zhou L L, Rieglere T, Bruggerd J, Fairclough M. 2020. Large S isotope and trace element fractionations in pyrite of uranium roll front systems result from internally-driven biogeochemical cycle. Geochimica et Cosmochimica Acta, 282: 113~132.

Charles S, Spirakis. 1996. The roles of organic matter in the formation of uranium deposits in sedimentary rocks. Ore Geology Reviews, 11(1996):53~69

- Chen Youliang. 1995&. Discussion on metallogenic conditions and metallogenic models of sandstone-type uranium deposits in northern Sichuan. *Acta Geological Sichuan*, 15(1): 56~59.
- Chen Zhenyan, Wang Lei, Cui Xiangdong, Shan Zhibo, Song Bairong, Zhang Lei. 2021&. Geochemical characteristics and mineralization of rhenium in Qianjiadian uranium deposit in Kailu Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2021: 1~27.
- Christophe B, Zhou Lingli, Thomas R. 2020. Large S isotope and trace element fractionations in pyrite of uranium roll front systems result from internally-driven biogeochemical cycle. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 282 (2020) 113~132.
- Fuchs S H J, Schumann D, Williams-Jones A E, Murray A J, Couillard M, Lagarec K, Phaneuf M W, Vali H. 2017. Gold and uranium concentration by interaction of immiscible fluids (hydrothermal and hydrocarbon) in the Carbon Leader Reef, Witwatersrand Supergroup, South Africa. *Precambrian Research*, 293: 39~55.
- Guan Xiaohong, Chen Guanghao, Shang Chi. 2007. ATR—FTIR and XPS study on the structure of complexes formed upon adsorption of simple organic acids on aluminum hydroxide. *Journal of Environmental Sciences*, 19(2007): 438~443.
- Guo Ning and Sun Zexuan. 2017&. Types of sandstone uranium deposits in northern Sichuan and their prospecting directions. *Geology and Exploration*, 53(1): 54~62.
- Hou Xuewen, Sun Zexuan, Mo Banghong, Zhang Liang. 2017&. Ore-formation and Ore Control Factors of the Uranium Deposit 303 in North Sichuan. *Acta Geological Sichuan*, 37(4): 600~603.
- Hu Binhe, Li Long, Wu Xiaochun, Sun Zhen, Ke Guotu. 2016&. Effect of Mo—Re alloy on drop critical safety. *Atomic Energy Science and Technology*, 50(10): 1813~1816.
- Huang Difan, Wang Lansheng. 2008&. Geochemical characteristics of bituminous dike in Kuangshanliang area of the Northwestern Sichuan Basin and its significance. *Acta Petrolei Sinica*, 29(1): 23~28.
- Huang Hongtao, Wang Weijun, Zhong Wuye, Zheng Jianping, Zhao Shouzhi. 2016&. Research progress on application of Mo—Re alloys in space nuclear power. *Atomic Energy Science and Technology*, 54(3): 505~511.
- Karlsson K, Isacson U. 2003. Application of FTIR—ATR to Characterization of Bitumen Rejuvenator Diffusion. *Journal of materials in civil engineering*, 15(2): 157~165
- Langmuir D. 1978. Uranium solution—mineral equilibria at low temperature with applications to sedimentary ore deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42: 547~569.
- Lecomte A, Michels R, Cathelineau M, Morlot C, Brouand M, Flotte N. 2020. Uranium deposits of Franceville basin (Gabon): Role of organic matter and oil cracking on uranium mineralization. *Ore Geology Reviews*, 123: 103579.
- Li Longjie, Li Zhong, Li Xun. 2020&. “Molybdenum is overwhelming”——the ubiquitous element of molybdenum. *University Chemistry*, 35(11): 62~65.
- Liu Guangxiang, Wang Shoude, Pan Wenlei, Lü Junxiang. 2003&. Characteristic of Guangyuan Tianjingshan destroyed oil reservoir. *Marine Oil and Gas Geology*, 8(1~2): 103~107.
- Lu Jialan, Fu Jiamo, Peng Pingan. 2004#. Research on organic geochemistry in metal mineralization. Guangdong Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press.
- Masson J F, Pelletier L, Collins P. 2001. Rapid FTIR method for quantification of styrene—butadiene type copolymers in bitumen. *Appl. Polym. Sci.*: 79: 1034~1041.
- Meunier J D, Landais P, Pagel M. 1990. Experimental evidence of uraninite formation from diagenesis of uranium-rich organic matter. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 54(3): 809~817.
- Mo Banghong, Liu Zhipeng, Deng Zulin, Xiao Kexiang, Han Wenwen, Yang Hang. 2019&. Uranium metallogenic geological characteristics and prospecting prospects of Wang cang anticline in the northern margin of Sichuan Basin. *Geology and Exploration*, 55(2): 519~527.
- Paul A, Kyser T K. 2006. Geochemistry of uraniferous bitumen in the southwest Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada. *Economic Geology*, 101(8): 1605~1612.
- Potgieter-Vermaak S, Maledi N, Wagner N, Van Heerden J H P, Van Grieken R and Potgieter J H. 2011. Raman spectroscopy for the analysis of coal: A review. *J. Raman Spectrosc.*, 42, 123~129.
- Qiu Linfei, Li Xide, Liu Wusheng, Hu Baoqun, Gao Long, He Zhongbo. 2021. Uranium deposits of Erlan Basin (China): Role of carbonaceous debris organic matter and hydrocarbon fluids on uranium Mineralization. *Minerals*, 11(5), 532; <https://doi.org/10.3390/min11050532>.
- Rao Dan, Qing Jianzhong, Tenge'er, Zhang Meizhen. 2008&. Source analysis of oil seepage and bitumen originating from marine strata in Guangyuan area, Northwest Sichuan. *Petroleum Geology and Experiment*, 30(6): 596~599; 605.
- Sharma S, Mohana R, Rao Dumpalan, Rawat N. 2020. Experimental and DFT studies on complexation of uranyl with N-(2-Hydroxyethyl) iminodiacetic acid in aqueous medium *Inorganica. Chimica Acta*, 508: 119653
- Wang Jie, Tenge'er, Liu Wenhui, Ma Bangliang, Tao Cheng, Zhou Yuanyuan, Wang Ping, Li Chao. 2016&. Determination of oil and gas generation age of lower Cambrian bituminous veins in Kuangshanliang, west Sichuan——Evidence from the isochronal age of solid asphalt Re-Os isotopes. *Natural Gas Geoscience*, 27(7): 1290~1298.
- Wang Yue, Wang Xunlian, Gao Jinhan, Huang Yuming, Su Wenbo, Xu Yifan. 2008&. Discovery of bituminous gravels in the Lower Cambrian in Qingchuan, northern Sichuan, China, and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 27(1): 149~152.
- Wei Jian. 2014&. Discussion on the Genesis of Guangyuan Natural bitumen. Tutor: Zhong Kanghui and Li Jingao. Chengdu: Master Thesis of Chengdu University of Technology.
- Wood S A. 1996. The role of humic substances in the transport and fixation of metals of economic interest (Au, Pt, Pd, U, V). *Ore Geology Reviews*, 11(1~3): 1~31.
- Wu Meng, Song Mengya, Liu Ming, Jiang Chunyu, Li Zhongpei. 2016. Fungicidal activities of soil humic/fulvic acids as related to their chemical structures in greenhouse vegetable fields with cultivation chronosequence. *Scientific Reports*, 6(1): 32858.
- Wu Shengyang, Wang Desheng, Wang Shuhua. 1988#. Characteristics and metallogenic age of pitchblende in sandstone-type uranium deposits in northern Sichuan. *Acta Mineralogica Sinica*, 8(4): 365~372.
- Wu Shengyang, Wang Desheng. 1991&. Enrichment of uranium by organic matter in the process of diagenesis and mineralization of continental sandstone-type uranium deposits in northern Sichuan. *Uranium Geology*, 7(5): 265~272.
- Zhang Jiarun, Liu Yongzhi, Liu Zhihong, Li Qihou. 2020&. Research progress on the preparation and application of high-purity rhenium

and its compounds. *Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy*, 25(4): 273~279.

Zhou Wen, Deng Hucheng, Qiu Dongzhou, Xie Runcheng. 2007&. Discovery and significance of Devonian paleo-oil reservoirs in Tianjingshan structure, northwest Sichuan. *Journal of Chengdu University of Technology (Natural Science Edition)*, 34(4): 413~417.

Zhu Xiyang, Wang Yunliang, Wang Zhichang, Zhang Chengjiang. 2004&. Characteristics of REE and uranium metallogenesis of sandstone-type uranium deposits in northern Sichuan. *Uranium Geology*, 02:71~79.

Discovery and geological significance of the U-bearing bitumen vein from the Tianbazi section in Guangyuan, Northern Sichuan

QIU Linfei^{1,2)}, DING Bo¹⁾, LIU Hongxu¹⁾, HU Baoqun²⁾, WANG Zhanyong³⁾, XIAO Kexiang³⁾

1) CNNC Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing, 100029;

2) State Key Laboratory Breeding of Nuclear Resource and Environment, East China University of Technology, Nanchang, 330013;

3) No. 280, China National Nuclear Corporation, Guanghan, 618300

Abstract: A U-bearing bitumen vein with uranium anomalies ($\sim 70\times10^{-6}$, several locations) was identified in Qingchuan County, Guangyuan City, northern Sichuan Basin. The mineralogy, element geochemistry, and spectroscopy analyses were carried out for this U-bearing bitumen vein, with comparison to the “organic matters” in the nearby typical sandstone type uranium deposit (303 deposit). The U-bearing bitumen vein contains a large number of micro-grained minerals, including micro-sized quartz, barite, chalcopyrite, sphalerite, galena and strawberry-like pyrite with micro—nano structures. The bitumen vein is highly enriched in Mo, Re, Cd, U, and Ba, with slightly elevated Sc, V, Ni, Cu, Zn, Rb, Tl contents. Similar uranium- and bitumen-bearing veins have also been found in the 303 sandstone-type uranium deposit, with similar mineralogy (barite—pyrite—sphalerite and other minerals) and trace element concentrations. It is suggested that the uranium mineralization in northern Sichuan may be genetically related to the cracking and destruction of paleo-oil reservoirs. In the tectonic active area in the Sichuan Basin, it might be potential to find uranium deposits related to oil—gas activities. The U, Mo, and Re contents in the bitumen veins are all significantly enriched and could be comprehensively utilized after the bitumen was burned, it is therefore recommended to pay attention to these bitumen veins for comprehensive utilization of the aforementioned associated elements in future in northern Sichuan.

Keywords: bitumen vein; paleo-oil reservoir; sandstone-type uranium deposit; geological significance; Sichuan Basin

Acknowledgements: This study was financially supported by project of Geological Prospecting of China National Uranium Co., Ltd. (No. 202133-2). We would like to express our thanks to No. 280, China National Nuclear Corporation for the Geological Survey work, and We are grateful to the anonymous reviewers for their constructive suggestions which greatly improved the quality of the manuscript.

First author: Qiu Linfei, male, born in 1984, Senior engineer, On-job Ph. D. students, mainly engaged in Research on Uranium Geology and Geochemistry; Email: qlf0602@ 163. com

Corresponding author: HU Baoqun, male, born in 1965, professor, Ph. D. supervisor, mainly engaged in teaching and scientific research in uranium mine geology, gold mine geology, applied geochemistry, etc. ; Email: Bqhu@ euct. edu. cn?? Bqhu@ ecut. edu. cn??

Manuscript received on: 2021-04-28; Accepted on: 2021-11-21; Network published on: 2021-12-20

Doi: 10. 16509/j. georeview. 2021. 12. 025

Edited by: ZHANG Yuxu

