

活化断层对加拿大阿萨巴斯卡盆地 不整合型铀矿的控制

李增华^{1,2,3}, 池国祥^{3*}, 邓 腾^{1,2,4}, 许德如^{1,2,4}

(1. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学 地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. Department of Geology, University of Regina, Regina Canada S4S 0A2; 4. 中国科学院 广州地球化学研究所 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室, 广东 广州 510640)

摘 要: 先存断层的活化对许多热液矿床的形成起到至关重要的作用。加拿大阿萨巴斯卡盆地的不整合型铀矿是一个受活化断层控制矿床的典型例子。该铀矿产于基底与盆地砂岩之间的不整合面附近, 并与根植于基底的断层密切相关。这些控矿基底断层切穿并错动了盆地的不整合面。一系列证据表明这些基底断层以韧性的方式形成于盆地之前, 但在盆地形成之后又发生脆性活化, 而正是这种断层活化作用控制铀矿的产出。先存断层作为完整岩石中的薄弱位置, 在后期构造运动中, 其活化比产生新断层更容易发生。数值模拟表明在后期挤压构造运动中, 有先存基底断层的不整合面被显著错动, 而无先存断层的不整合面并没有错动。基底断层的脆性活化, 不仅在活化过程中为流体提供了驱动力, 而且由于活化导致岩石渗透率的提高, 为后期的流体流动提供了通道以及容矿场所, 形成阿萨巴斯卡盆地的不整合型铀矿。

关键词: 断层活化; 构造控矿; 阿萨巴斯卡盆地; 不整合型铀矿

中图分类号: P613 文献标志码: A 文章编号: 1001-1552(2019)03-0518-010

0 引 言

许多后生金属矿床的形成受地壳变形引起的构造控制, 成矿多发生在断层和剪切带内, 或者与其相关的断裂系统内(Cox et al., 2001)。热液金属矿床作为一类重要的矿床, 其形成离不开大量含矿流体源源不断流经成矿场所并沉淀金属矿物。在成矿学的研究中, 构造控矿作为一个普遍现象已经被国内外学者和生产单位广泛关注。许多矿床的地质特征研究表明, 其形成与先存断层的活化密切相关。例如, 澳大利亚 Drummond 盆地中的浅成低温热液型金矿分布主要受活化后的北东向走滑断层控制(Henley and

Adams, 1992)。又如, 中国小秦岭石英脉型金矿的形成与早期韧性剪切带在挤压应力下发生脆性活化形成的逆断层有关(薛良伟等, 1998)。断层活化是指断层沉寂很长时间后又发生活动。成矿作用可以和断层活化同时发生, 也可以发生在断层活化一段时间以后。在前一种情况下, 断层活动本身可能为成矿流体的流动提供了动力; 而在后一种情况下, 活化的断层为流体的流动提供了运移通道。

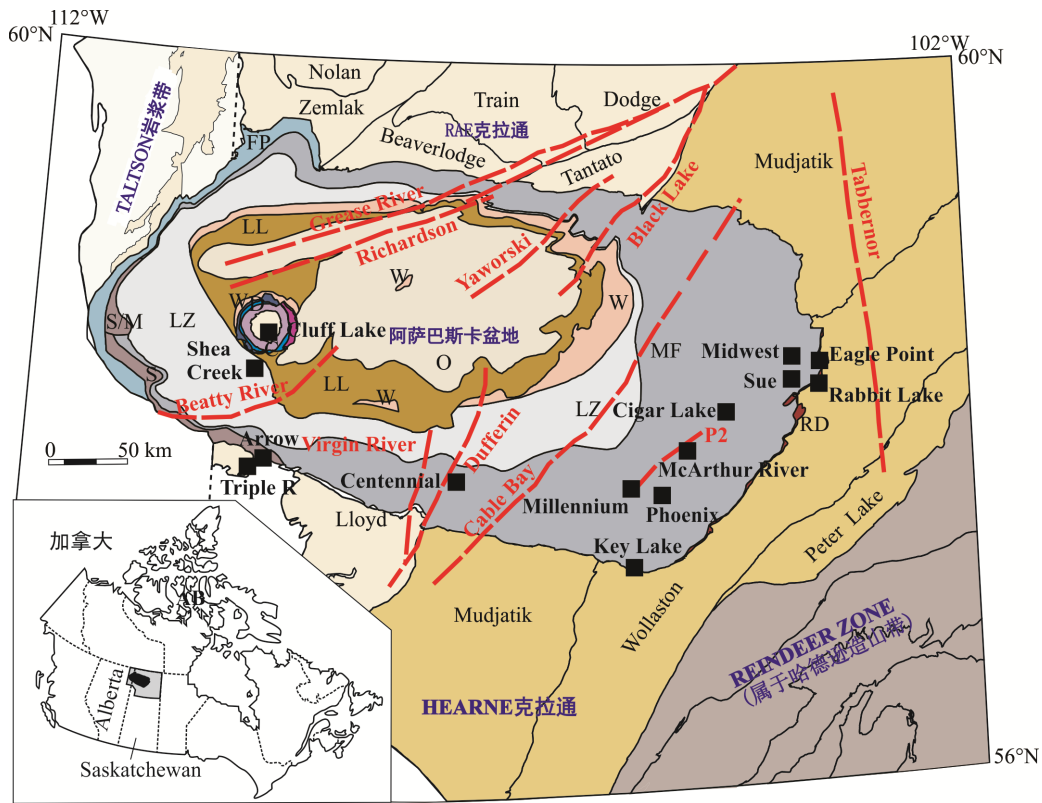
不整合型铀矿以品位高、资源量大著称, 以加拿大阿萨巴斯卡盆地(Athabasca Basin)为典型代表(图 1)。该盆地的铀矿床产于太古宙-古元古代变质结晶基底与上覆晚古元古代-中元古代砂岩之间的

收稿日期: 2018-07-08; 改回日期: 2018-12-20

项目资助: 国家重点研发计划项目“深地资源勘查开采”(2016YFC0600401)资助。

第一作者简介: 李增华(1983-), 男, 博士, 主要从事构造与成矿以及流体动力学的研究。Email: lizenghua@gmail.com

通信作者: 池国祥(1963-), 男, 教授, 主要从事矿床学及地质流体方面的研究。Email: guoxiang.chi@uregina.ca



阿萨巴斯卡群各组地层: FP. Fair Point 组; S. Smart 组; RD. Read 组; MF. Manitou Falls 组; LZ. Lazenby Lake 组; W. Wolverine Point 组; LL. Locker Lake 组; O. Otherside 组; D. Douglas 组; C. Carswell 组。黑色方块代表主要的铀矿床, 粗虚线代表主要的活化区域断层。

图 1 加拿大阿萨巴斯卡盆地地质简图(据 Jefferson et al., 2007; Ramaekers et al. 2007 修改)

Fig.1 Regional geological map of the Athabasca Basin in Northern Saskatchewan, Canada

不整合面附近, 而且无一例外均与根植于基底的断层密切相关(Thomas et al., 2000; Jefferson et al., 2007)。但是, 对于这些基底断层的构造属性, 尤其是其对不整合型铀矿的控制机理, 目前还理解不够。本文通过归纳总结阿萨巴斯卡盆地内铀矿的地质特征, 认为控矿断层不仅是简单的基底断层, 而是在沉积盆地形成之后又活化的基底断层; 并运用数值模拟的方法, 证明基底先存断层的存在对后期构造变形有重要影响, 有先存断层的基底比没有先存断层的基底更容易变形, 使不整合面发生错动; 最后, 讨论了先存断层活化的一般机制, 以及阿萨巴斯卡盆地先存基底断层活化对铀矿形成的意义。由于成矿流体来自盆地, 活化的基底断层比不活化的基底断层更可能与成矿流体沟通, 从而控制铀矿成矿作用。

1 地质背景

阿萨巴斯卡盆地位于加拿大萨斯喀彻温省(Saskatchewan)北部, 其基底为太古宙-古元古代的

变质杂岩, 主要包括花岗片麻岩、变沉积岩以及基性到酸性的侵入岩, 而且整个基底都遭受了强烈的变形和变质作用。从东向西, 基底分为 Hearne 克拉通、Rae 克拉通和 Taltson 岩浆带, 根据其地球物理特点划分为不同的小地块(domain)(Card et al., 2007)(图 1)。其中 Hearne 克拉通分为 Mudjatik、Wollaston 和 Peter Lake 地块。盆地东部的矿床多分布在 Mudjatik 和 Wollaston 地块过渡带附近(图 1)。在阿萨巴斯卡盆地沉积之前, 哈德逊造山运动(1.8 Ga)曾普遍改造基底岩石的构造特征。初始的变形 D_1 和 D_2 包括 W-NW 方向的褶皱和逆冲挤压运动, 形成强烈的韧性面理。后期的变形 D_3 主要以 NE 向直立褶皱为特征, 并被呈近正交的 D_4 褶皱所叠加, 最终形成盆地-穹窿构造模式(Annesley et al. 2005)。

哈德逊造山运动后期基底变质岩系被抬升和剥蚀, 在 1.72 Ga 左右阿萨巴斯卡盆地开始沉积(Jeanneret et al., 2017)。已保存的阿萨巴斯卡群岩石主要为河流相砾岩和石英砂岩, 盆地顶部有少量的海相地层。现存盆地地层大约有 1.5 km 厚, 但在地质历史时期最厚可能达到 5~6 km(Pagel et al., 1980)。盆地

中下部 Wolverine Point 组凝灰质碎屑锆石 U-Pb 定年结果为 1644 ± 13 Ma (Rainbird et al., 2007), 上部 Douglas 组的黑色泥岩有机质 Re-Os 定年结果为 1541 ± 13 Ma (Creaser and Stasiuk, 2007), 且整个阿萨巴斯卡盆地的地层又被 1267 ± 2 Ma 的 Mackenzie 辉绿岩侵入 (LeCheminant and Heaman, 1989)。盆地中沉积地层近水平, 变形程度很低, 未发生变质作用 (Ramaekers et al., 2007)。砂岩发育许多 NE 向沉积槽, 而其方向与基底断层走向相吻合, 表明这些基底断层在盆地沉积过程中和盆地沉积后发生多次活化 (Jefferson et al., 2007)。

目前认为主成矿作用发生在大约 1.54 Ga (Rabiei et al., 2017; Chi et al., 2018), 此时盆地可能厚约 3 km (Chi et al., 2018)。虽然许多铀矿测年年龄可一直延续到 60 Ma, 但认为其主要与后期热液改造有关 (Chi et al., 2018)。根据与不整合面的关系, 矿体大致分为砂岩型(产于不整合面之上)和基底型(产于不整合面之下)两个大类(图 2), 而且矿体均受根植于基底的断层控制, 它们通常切穿并逆向错动不整合面和上覆的砂岩地层(图 2)。盆地内铀总资源量约 60 万吨, 矿石品位因矿床而异, 变化在 $0.14\% \sim 22\%$ U_3O_8 之间, 平均品位约 1.97% U_3O_8 (Jefferson et al., 2007)。虽然大部分已发现铀矿床分布在盆地的东部, 但最近几年在盆地西南部的 Patterson Lake 区域也发现几处大型矿床, 包括 Triple R 和 Arrow 等矿床(图 1, Card and Noll, 2016)。对于铀矿的成因模式, 目前普遍认为盆地内氧化态的含铀流体运移到基底断层切穿不整合面的位置, 然后通过基底中还原性物质或还原性的流体发生反应而导致铀矿沉淀 (Jefferson et al., 2007)。

2 基底断层对铀矿的控制

通过对盆地内不同矿床的研究表明, 切穿不整合面的基底断层与成矿密切相关, 矿体多位于脆性基底断层与不整合面的交叉部位(图 2; Jefferson et al., 2007)。以伊利石化、绿泥石化、电气石化、硅化以及去硅化等为主的蚀变晕大多环绕在这些控矿断层周围(图 2), 显示这些基底断层控制成矿流体的运移 (Jefferson et al., 2007)。基底断层根植于基底, 多表现为逆断层, 破碎带普遍发育, 盆地与基底之间的不整合面被逆向错动达数十米到上百米(图 2), 而直接上覆于基底断层的砂岩变形程度有限, 只是发育大量裂隙。

由于阿萨巴斯卡盆地的铀矿床绝大部分埋藏深, 品位特别高(局部可达百分之几十), 所以其高放射性决定了开采一般是用遥控机械, 就近实地进行观察很困难。目前的研究主要靠岩心观察, 这也造成了这类矿床虽然已开采几十年, 但详细的构造观察比较局限 (Tourigny et al., 2007)。Tourigny et al. (2007) 通过对阿萨巴斯卡盆地东部的 Sue C 铀矿床露天采坑进行的局部构造填图, 揭示了该矿床的基底普遍发育哈德逊期的韧性断层和线理-面理组构(图 3), 其中最为显著的是区域性的 S_2 片理, 为哈德逊造山运动中主挤压变形期形成的。 S_2 呈 NNE 方向, 向南东倾且倾角大于 65° , 并叠加到早期的 F_1 褶皱上, 局部上 S_2 也会与轴迹呈 NNE 向的 F_2 褶皱共面(图 3)。线理 L_2 以拉长的堇青石斑状变晶呈现, 主要沿 S_2 面向下倾伏。另外一组为 D_2 后期形成的 NNE 向韧性断层, 主要平行于 S_2 片理或者低角度 ($<10^\circ$) 与 S_2 相交(图 3)。这些 NNE 向的 D_2 断层近直立向东陡倾,

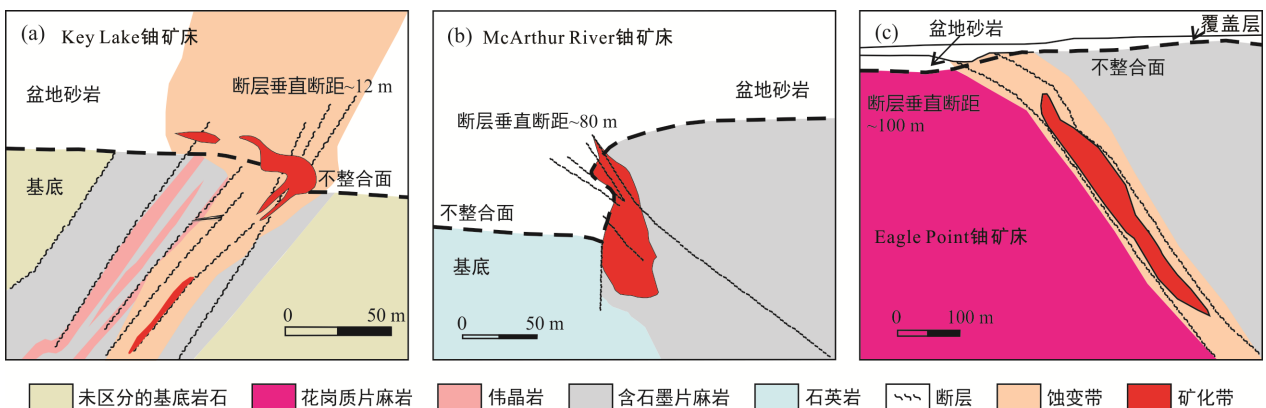


图 2 剖面图展示活化的基底断层逆向错动了盆地与基底间的不整合面且控制了矿体的产出(据 Li et al., 2015, 2017 修改)
Fig.2 Cross-sections showing reactivated basement-rooted faults controlling the unconformity-related uranium deposits and reverse displacement of the unconformity surface in the Athabasca Basin

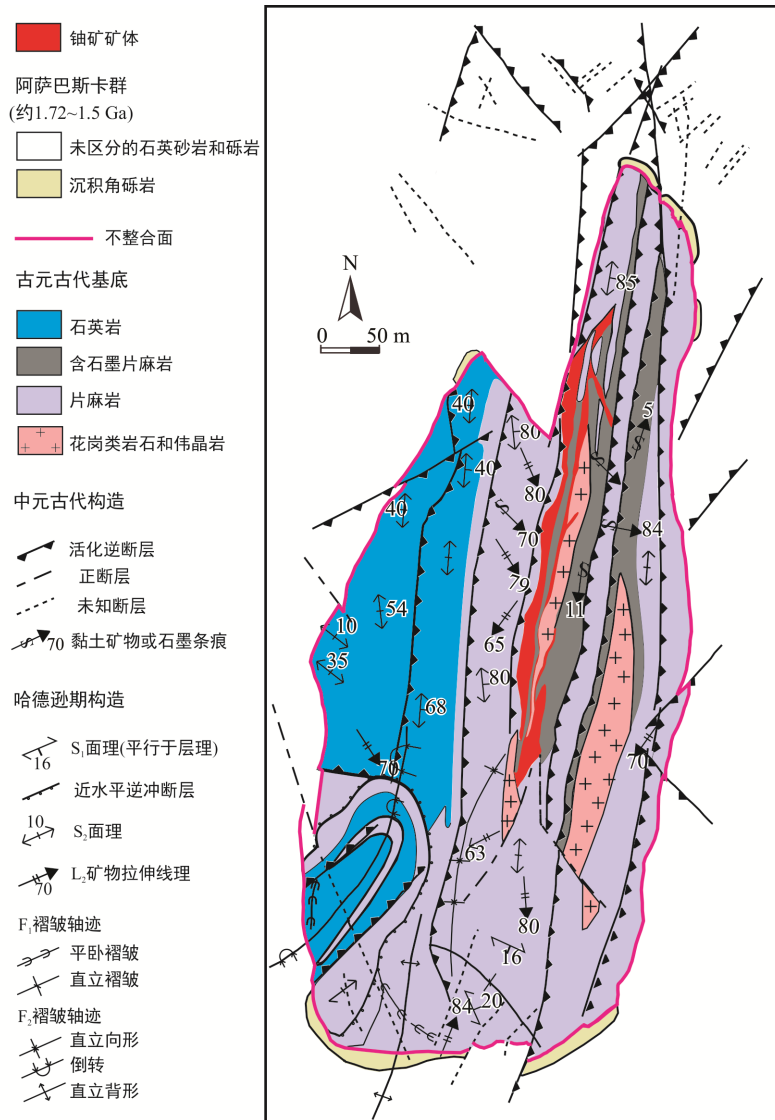


图 3 Sue C 铀矿露天矿坑地质与构造图(据 Tourigny et al., 2007 修改)
 Fig.3 Geological and structural map of the Sue C pit

呈现为 1~40 m 宽的高变形带, 并以强烈的 D₂ 期 S-L 组构为特征。D₂ 断层主要沿着不同机械性质的岩石界面发育, 如 Sue C 矿体上盘较弱的含石墨片麻岩与下盘较强的其他未含石墨的片麻岩和石英岩等(图 3)。控制 Sue C 矿体的断层同时切穿了基底岩石和上覆的近水平层状砂岩, 而且矿体主要赋存于活化的中元古代脆性构造中, 这些脆性构造叠加在哈德逊期韧性断层和 S-L 组构上(Tourigny et al., 2007), 呈 NNE 向, 向东陡倾, 根植于基底且可延伸到上部砂岩达 60 m, 与不整合面和近水平的层状砂岩呈近正交, 逆向错动不整合面达 20 m(图 4)。虽然有如此大的断层断距但上部近水平层状砂岩变形程度很低(图 4)。另外对发生脆性破碎的基底岩石进行显微构造研究也表明镜下可见残余的 S₂ 片理和 L₂ 线理, 说

明脆性变形是叠加在原来韧性变形上的, 且没有明显破坏哈德逊期的韧性构造组构(Tourigny et al., 2007)。虽然研究区内也发育有另外的一组 NE 向和一组 NW 向断层(图 3), 但其与成矿无关, 可能是成矿后的构造活动。

不整合面被控矿基底断层大规模逆向错动的现象在阿萨巴斯卡盆地的其他矿床中也很常见, 例如, Key Lake 矿床的 Deilmann 矿体主要受 W-SW 向的陡倾 Key Lake 断层控制, 断层发育在花岗伟晶岩和含石墨片麻岩中, 并逆向错动不整合面达 12 m(图 1、2a, Harvey and Bethune, 2007)。McArthur River 矿床的矿体受 NE 向的 P2 断层控制(图 1、2b), 断层错动不整合面达 80 m(McGill et al., 1993)。Eagle Point 铀矿床断层断距达 100 m(Andrade, 1989)(图 1、

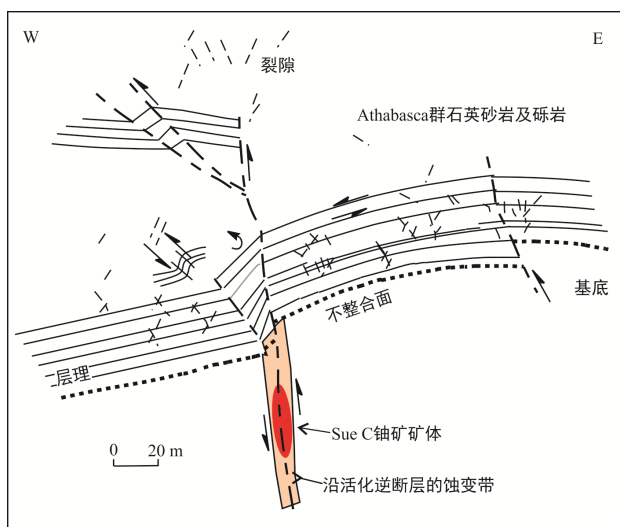


图 4 Sue C 铀矿地质剖面简图, 该图展示了活化基底逆断层错动不整合面并控制矿体的产出(据 Tourigny et al., 2007)

Fig.4 Simplified sectional view of the Sue C uranium deposit showing the structural control of the reactivated basement faults on uranium mineralization

2c)。盆地中的 Centennial 铀矿床受区域上的 Dufferin 断层控制(图 1), 而 Dufferin 断层错动不整合面的断距达 250 m(Reid et al., 2014)。

3 基底断层活化的数值模拟

为了进一步说明阿萨巴斯卡盆地的基底断层在盆地形成之后, 如何在后期构造运动中活化并错动不整合面, 本文应用 FLAC3D 软件进行数值模拟。FLAC3D 软件被广泛用于构造变形和流体运移的模拟中(如 Oliver et al., 2006; 赵义来和刘亮明, 2011)。详细的模拟理论基础和方法, 可参考 Oliver et al. (2006)和 Li et al. (2017)等。模型中的所有岩石设定为多孔的摩尔-库伦材料, 其力学行为服从摩尔-库伦模型, 即变形初始以弹性形变的形式, 当应力超过弹性极限, 进入屈服阶段后以塑性形变的方式变形。流体流动受达西定律控制。变形造成的形变引起孔隙压力的变化, 造成流体流动, 而孔隙压力的变化又会引起有效应力的变化, 造成进一步的形变。在模型中所有岩石均为均质和各向同性。

我们采用了 Li et al. (2017)中的模型, 即整个模型宽 5 km, 高 2.5 km, 处于地表 4.5 km 以下, 模型包含盆地盖层和基底两个大部分。根据阿萨巴斯卡盆地地层的特点, 盖层又分为低渗透率的地层和下覆的高渗透率砂岩层(1.5 km 厚)。基底中的断层宽

50 m, 被宽为 200 m 的上盘和下盘包围。断层被上部盆地地层覆盖, 并没有切穿不整合面(图 5a), 这是与 Li et al. (2017)中的模型不同的地方。模型中各个单元的力学和流体参数(见表 1)。

在初始状态时, 岩石中的孔隙为饱和状态, 孔隙压力设为静水压力(Chi et al., 2013, 2014), 并固定模型顶面的孔隙压力。初始状态下模型顶界面承受 4.5 km 厚的岩石垂向压力, 用以模拟初始地应力平衡。结合盆地内控矿的断层均表现为逆断层, 推测铀矿床形成于挤压环境下, 因此模型的力学边界条件设置为对整个模型左右两个边界施加对称的相向位移速度, 代表区域挤压应力场。

模拟结果表明, 在整个模型压缩到 2% 的时候, 发现整个模型已经被明显挤压, 但形变更多的集中在断层上, 断层已发生活动并延伸到盖层中去(图 5b)。断层发生逆向错动产生的垂直断距达 15 m。相比之下, 在没有先存断层的地方, 不整合面并没有被错动(图 5b)。

4 讨论

4.1 先存断层活化的一般机制

完整岩石中新断层(断裂)的发育与其所受的构造

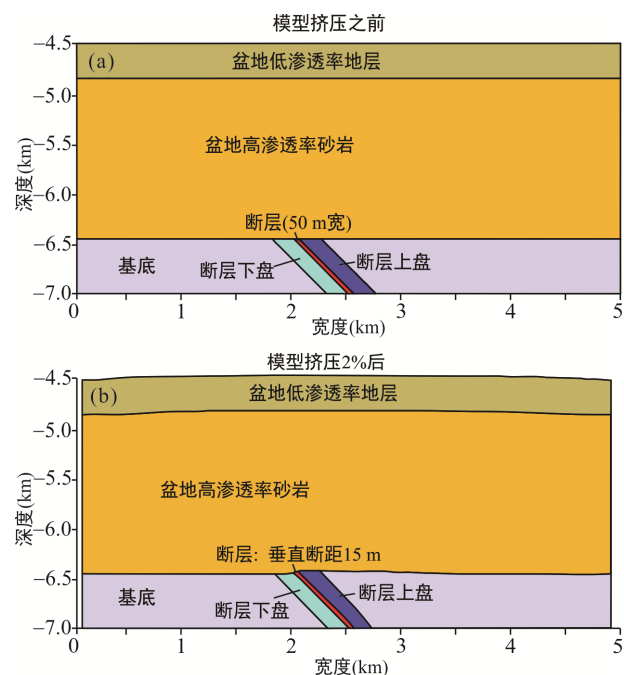


图 5 用于数值模拟的阿萨巴斯卡盆地不整合型铀矿的简化地质模型(据 Li et al., 2017 修改)

Fig.5 Cross-sectional view of the physical model used for numerical simulation in the Athabasca Basin

表 1 数值模拟中岩石力学和流体参数(据 Li et al., 2017)

Table 1 Input parameters of various hydrological units used in model setups

参数	低渗透率地层	高渗透率砂岩	基底	断层	断层上盘	断层下盘
密度(kg/m ³)	2400	2500	2650	2400	2650	2650
体积模量(Pa)	2.80E+10	3.20E+10	4.95E+10	9.50E+09	4.95E+10	4.95E+10
剪切模量(Pa)	1.70E+09	4.00E+09	2.90E+10	3.00E+07	2.90E+10	2.90E+10
内聚力(Pa)	2.70E+06	3.00E+06	4.00E+06	3.00E+03	4.00E+06	4.00E+06
抗张强度(Pa)	1.80E+06	1.20E+06	5.00E+06	6.00E+05	1.50E+06	6.00E+06
摩擦角	30°	30°	30°	15°	20°	30°
剪胀角	2°	4°	3°	5°	4°	3°
孔隙度	0.15	0.2	0.1	0.2	0.1	0.1
渗透率(m ²)	1.00E-15	3.00E-13	3.00E-16	1.00E-12	3.00E-16	1.00E-17

应力和所在的流体压力体系有密切关系(Sibson, 1985, 2001)。因地壳中岩石普遍饱含流体, 在岩石空隙中产生的流体压力称为孔隙压力 P_f 。应力是岩石变形和破裂的主因, 而流体对岩石孔隙及裂隙空间施加的压力可以降低多孔岩石的有效应力, 进而可以在相对小的应力下诱发岩石变形。岩石所受的有效应力等于主应力减去孔隙压力。对于均一的、各向同性的完整岩石, 断层(断裂)的形成可用复合的 Griffith-Coulomb 破裂准则来预测和分析(图 6)。而先存断层作为完整岩石里的“伤疤”, 其岩石力学性质显著降低, 其抗张强度可以降到零, 所以在后期构造运动中, 活化这些先存断层会比发育新的断层更容易实现(Sibson, 1985, 2001), 这表现在破裂包络线的右移及穿过原点(图 6)。Sibson (1985, 2001)讨论了上地壳浅部断层的活化, 认为断层原有的方向以及差异应力值和流体压力都影响断层活化的程度,

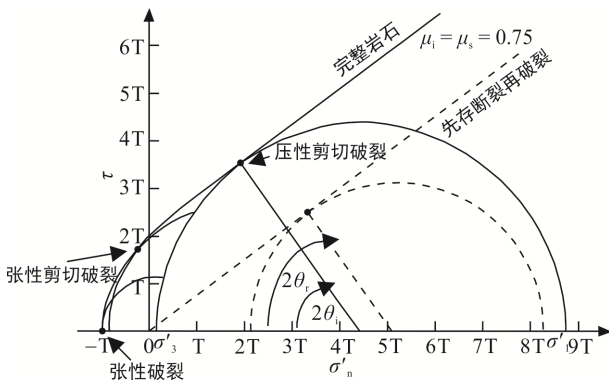
并且先存断层的存在导致在后期构造运动中自身优先活化, 而抑制其周围的完整岩石发育其他任何形式的脆性破裂(Sibson, 2001)。

但另一方面, 由于断层活化的机制和特征非常复杂。两期断层活动都是脆性的很常见, 比如现存断层透镜体中有早期断层角砾岩。有些断层既表现为脆性, 又可同时显示韧性特征, 可能是后期的脆性活化叠加到先成的韧性构造上, 也可能是当脆性断层被构造作用埋深、而深部(~5 km)又刚好有成矿热液活动, 那么, 脆性断层的活化也可以表现为韧性或脆韧性断层(与余心起个人交流)。因此特定断层活化的过程和机制因构造背景和地质条件而异。

4.2 断层活化对阿萨巴斯卡盆地不整合型铀矿的意义

如前所述, 加拿大阿萨巴斯卡盆地的不整合型铀矿受基底断层控制, 而这些基底断层切穿并错动不整合面几十米到几百米, 如此大程度的断层活动, 而上部砂岩多近水平且变形程度很低, 表明这些断层应为继承的基底断层在盆地沉积后发生再活化, 而不太可能为盆地形成后新发育的断层, 因为在后期的构造应力场中先存的基底断层作为薄弱带更容易发生再活动, 这些推断也被数值模拟所证实: 有先存断层的不整合面在后期挤压运动中被明显错动, 而无断层的不整合面没有什么错动(图 5), 说明了是先存基底断层的活化造成了不整合面大尺度的错动。

从成矿的角度而言, 先存断层作为岩石中的薄弱位置, 后期多次活化会不断提高断层自身及周边围岩的渗透率, 有利于成矿流体的运移和汇集, 在温度、压力和化学等条件合适时沉淀金属矿物。地球化学研究表明, 阿萨巴斯卡盆地铀矿的成矿流体来源于盆地内的卤水(Richard et al., 2011)。要使这些流体汇聚到不整合面附近并成矿, 必须有合适的通



横轴和纵轴分别为用岩石抗拉强度(T)标准化后的剪应力(τ)和有效正应力($\sigma'_n = \sigma_n - P_f$)。以内摩擦系数 μ_s 为 0.75 为例。

图 6 应力圆(Mohr 圆)图解完整岩石(实线)和先存断裂再破裂(虚线)的包络线(据 Sibson, 2001)

Fig.6 Composite failure envelope for intact rock (bold line) plus the reshear condition for a cohesionless fault (dashed) plotted on a Mohr diagram

道,正是盆地形成后基底断层的多次脆性活化作为流体运移提供了通道和容矿场所。针对断层与流体关系的流体动力学数值模拟研究也表明,这些断层在构造活跃期,不仅被用作流体运移的通道,而且提供流体运移的驱动力(Li et al., 2016, 2017)。在挤压环境下,基底断层发生活化而引起的流体流动的方向,取决于挤压的程度:在挤压程度相对较低时,流体可以沿着断层流出基底进入盆地;但当挤压程度相对较高时,基底断层切穿不整合面的位置发生扩容(代表张裂隙发育),导致流体从盆地沿断层进入基底(Li et al., 2017)。而通过模拟活化后的基底断层和热对流的关系,认为早期活化的断层提高了断层的渗透率。在构造静默期,盆地流体运移以热对流为主,流体自基底流入盆地和自盆地进入基底都能沿着高渗透的断层发生,此时活化后的断层为流体流动提供通道,流体流动及成矿发生在断层活动之后(Li et al., 2016)。这些对活化基底断层的流体动力学分析,为阿萨巴斯卡盆地及其他类似盆地的铀矿找矿勘探,提供了新的思路。

另外一方面,这些广泛发育的基底断层,因其不同的走向和倾向,可能导致其活化后的程度和运动学特点不一致。控矿的活化基底断层多为陡倾断层,但其走向变化很大,从南北向到东西向都有。这决定了在统一的构造应力条件下它们活化的运动学特征不一致,并造成不整合面错动程度的差异,值得做进一步的研究。有些学者根据铀矿的成矿年龄,认为这些断层的活化与远程(几百到几千公里以外)的板块活动有关(Alexandre et al., 2009)。虽然断层活化对成矿的意义已经逐渐被人们所认识,但由于构造历史复杂造成研究难度很大,这些基底断层具体的活化历史、运动学特征以及所受的区域应力情况仍有待进一步的研究。例如,在统一的 NW-SE 构造挤压应力条件下(Mercadier et al., 2010),控制 McArthur River 铀矿床的 NE 向 P2 断层活化时主要发生逆断层运动,错动不整合面达 12 m; 而 Cigar Lake 铀矿床受 E-W 向断层控制,不整合面基本没有被错动,活化时可能以右旋走滑位移为主。另外,在主成矿期后的某些地质时期,可能的拉张性构造环境造成这些断层活化的特征更复杂化。例如,对 Shea Creek 铀矿床的研究表明某些晚期次的矿化(热液改造)可能与这个时期的全球张性板块运动造成断层重新活化有关(Sheahan et al., 2016)。因此对这些问题的认识需要做进一步的工作,数值模拟可能会提供一些思路。

综上所述,本文分析的断层活化对加拿大阿萨巴斯卡盆地不整合型铀矿的控制,对其他类型的热液矿床也有很大的借鉴意义。同时研究构造活化对于找矿也有重要意义。古老地层中常发育了相对较老的先存构造,其中部分可能被后续的构造变形所覆盖,另外一些保留下来的构造可能受到后期构造热事件的影响,发生重新活化,并成为年轻矿体的含矿构造。所以应加强对先存构造尤其是深部构造的构造环境和动力学特征的研究,以便正确理解其活化对成矿的控制,最终服务于深部找矿。

5 结 论

加拿大阿萨巴斯卡盆地的不整合型铀矿受活化后的基底断层控制。先存基底断层作为薄弱位置,在后期构造运动中,会比产生新断层更容易发生。数值模拟表明在后期挤压构造运动中,有先存基底断层的不整合面被显著错动,而无先存断层的不整合面并没有错动,而正是这种的先存基底断层的活化作用控制了铀矿的产出。基底断层的脆性活化,不仅在活化过程中为流体提供了驱动力,而且提高了岩石的渗透率,为后期的流体流动提供了通道以及容矿场所,最终控制了阿萨巴斯卡盆地的不整合型铀矿的形成。

致谢:感谢中国地质大学(北京)余心起教授和另外一名匿名审稿人提出的建设性修改意见。

参考文献(References):

- 薛良伟, 石铨曾, 尉向东, 郑亚东, 张进江. 1998. 小秦岭石英脉型金矿的反转成矿机制. 科学通报, 43(2): 203-206.
- 赵义来, 刘亮明. 2011. 复杂形态岩体接触带成矿耦合动力学三维数值模拟: 以安庆铜矿为例. 大地构造与成矿学, 35(1): 128-136.
- Alexandre P, Kyser K, Thomas D, Polito P and Marlat J. 2009. Geochronology of unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada and their integration in the evolution of the basin. *Mineralium Deposita*, 44(1): 41-59.
- Andrade N. 1989. The Eagle Point Uranium deposits, northern Saskatchewan, Canada. IAEA-Tecdoc: 455-490.
- Annesley I R, Madore C and Portella P. 2005. Geology and thermotectonic evolution of the western margin of the

- Trans-Hudson Orogen: Evidence from the eastern sub-Athabasca basement, Saskatchewan. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 42(4): 573–597.
- Card C D and Noll J. 2016. Host-rock protoliths, pre-ore metasomatic mineral assemblages and textures, and exotic rocks in the western Athabasca Basin: Ore-system controls and implications for the unconformity related uranium model. Saskatchewan Geological Survey, Saskatchewan Ministry of the Economy, Miscellaneous Report.
- Card C D, Pana D, Portella P, Thomas D J and Annesley I R. 2007. Basement rocks to the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta // Jefferson C W and Delaney G. EXTECH IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. Natural Resources Canada, Ottawa: 69–87.
- Chi G X, Bosman S A and Card C D. 2013. Numerical modeling of fluid pressure regime in the Athabasca basin and implications for fluid flow models related to the unconformity-type uranium mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, 125: 8–19.
- Chi G X, Li Z H and Bethune K M. 2014. Numerical modeling of hydrocarbon generation in the Douglas Formation of the Athabasca basin (Canada) and implications for unconformity-related uranium mineralization. *Journal of Geochemical Exploration*, 144: 37–48.
- Chi G X, Li Z H, Chu H X, Bethune K M, Quirt D H, Ledru P, Normand C, Card C D, Bosman S, Davis W J and Potter E G. 2018. A shallow-burial mineralization model for the unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin. *Economic Geology*, 113(5): 1209–1217.
- Cox S F, Knackstedt M A and Braun J. 2001. Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems. *Reviews in Economic Geology*, 14: 1–24.
- Creaser R A and Stasiuk L D. 2007. Depositional age of the Douglas Formation, northern Saskatchewan, determined by Re-Os geochronology // Jefferson C W and Delaney G. EXTECH IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. Natural Resources Canada, Ottawa: 341–346.
- Harvey S E and Bethune K M. 2007. Context of the Deilmann orebody, Key Lake mine, Saskatchewan // Jefferson C W and Delaney G. EXTECH IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. Natural Resources Canada, Ottawa: 249–266.
- Henley R W and Adams D P M. 1992. Strike-slip fault reactivation as a control on epithermal vein-style gold mineralization. *Geology*, 20(5): 443–446.
- Jeanneret P, Goncalves P, Durand C, Poujol M, Trap P, Marquer D, Quirt D and Ledru P. 2017. Geochronological constraints on the Trans-Hudsonian tectono-metamorphic evolution of the pre-Athabasca basement within the Wollaston-Mudjatik Transition Zone, Saskatchewan. *Precambrian Research*, 301: 152–178.
- Jefferson C, Thomas D, Gandhi S, Ramaekers P, Delaney G, Brisbin D, Cutts C, Quirt D, Portella P and Olson R. 2007. Unconformity-associated uranium deposits of the Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta // Jefferson C W and Delaney G. EXTECH IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. Natural Resources Canada, Ottawa: 23–67.
- LeCheminant A N and Heaman L M. 1989. Mackenzie igneous events, Canada - Middle Proterozoic hotspot magmatism associated with ocean opening. *Earth and Planetary Science Letters*, 96(1–2): 38–48.
- Li Z H, Bethune K M, Chi G X, Bosman S A and Card C D. 2015. Topographic features of the sub-Athabasca Group unconformity surface in the southeastern Athabasca Basin and their relationship to uranium ore deposits. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 52(10): 903–920.
- Li Z H, Chi G X and Bethune K M. 2016. The effects of basement faults on thermal convection and implications for the formation of unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Canada. *Geofluids*, 16(4): 729–751.
- Li Z H, Chi G X, Bethune K M, Thomas D and Zaluski G. 2017. Structural controls on fluid flow during compressional reactivation of basement faults: Insights from numerical modeling for the formation of unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin, Canada. *Economic Geology*, 112(2):

- 451–466.
- McGill B D, Marlatt J L, Matthews R B, Sopuck V J, Homeniuk L A and Hubregtse J J. 1993. The P2 North uranium deposit, Saskatchewan, Canada. *Exploration and Mining Geology*, 2(4): 321–331.
- Mercadier J, Richard A, Boiron M C, Cathelineau M and Cuney M. 2010. Migration of brines in the basement rocks of the Athabasca Basin through microfracture networks (P-Patch U deposit, Canada). *Lithos*, 115: 121–136.
- Oliver N H, McLellan J G, Hobbs B E, Cleverley J S, Ord A and Feltrin L. 2006. Numerical models of extensional deformation, heat transfer, and fluid flows across basement-cover interfaces during basin-related mineralization. *Economic Geology*, 101(1): 1–31.
- Pagel M, Poty B and Sheppard S M F. 1980. Contribution to some Saskatchewan uranium deposits mainly from fluid inclusion and isotopic data // Ferguson S and Goleby A. Uranium in the Pine Creek geosyncline. International Atomic Energy Agency (IAEA), Vienna: 639–654.
- Rabiei M, Chi G, Normand C, Davis W J, Fayek M and Blamey N J F. 2017. Hydrothermal Rare Earth Element (Xenotime) Mineralization at Maw Zone, Athabasca Basin, Canada, and Its Relationship to Unconformity-Related Uranium Deposits. *Economic Geology*, 112(6): 1483–1507.
- Rainbird R H, Stern R A, Rayner N and Jefferson C W. 2007. Age, provenance, and regional correlation of the Athabasca Group, Saskatchewan and Alberta, constrained by igneous and detrital zircon geochronology // Jefferson C W and Delaney G. EXTECH IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. Natural Resources Canada, Ottawa: 193–209.
- Ramaekers P, Jefferson C W, Yeo G M, Collier B, Long D G F, Drever G, Mchardy S, Jiricka D, Cutts C, Wheatley K, Catuneanu O and Bernier S. 2007. Revised geological map and stratigraphy of the Athabasca Group, Saskatchewan and Alberta // Jefferson C W and Delaney G. EXTECH IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. Natural Resources Canada, Ottawa: 155–192.
- Reid K D, Ansdell K, Jiricka D, Witt G and Card C D. 2014. Regional Setting, Geology, and Paragenesis of the Centennial Unconformity-Related Uranium Deposit, Athabasca Basin, Saskatchewan, Canada. *Economic Geology*, 109(3): 539–566.
- Richard A, Banks D A, Mercadier J, Boiron M C, Cuney M and Cathelineau M. 2011. An evaporated seawater origin for the ore-forming brines in unconformity-related uranium deposits (Athabasca Basin, Canada): Cl/Br and $\delta^{37}\text{Cl}$ analysis of fluid inclusions. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75(10): 2792–2810.
- Sheahan C, Fayek M, Quirt D and Jefferson C W. 2016. A combined ingress-egress model for the kianna unconformity-related uranium deposit, Shea Creek Project, Athabasca Basin, Canada. *Economic Geology*, 111(1): 225–257.
- Sibson R H. 1985. A note on fault reactivation. *Journal of Structural Geology*, 7(6): 751–754.
- Sibson R H. 2001. Seismogenic framework for hydrothermal transport and ore deposition. *Reviews in Economic Geology*, 14: 25–50.
- Thomas D J, Matthews R B and Sopuck V. 2000. Athabasca Basin (Canada) unconformity-type uranium deposits: Exploration model, current mine developments and exploration directions // Cluer J K, Price J G, Struhsacker E M, Hardyman R F and Morris C L. Geology and Ore Deposits 2000: the Great Basin and Beyond. Geological Society of Nevada Symposium proceedings, Reno Nevada: 103–126.
- Tourigny G, Quirt D H, Wilson N S F, Wilson S, Breton G and Portella P. 2007. Geological and structural features of the Sue C uranium deposit, McClean Lake area, Saskatchewan // Jefferson C W and Delaney G. EXTECH IV: Geology and Uranium Exploration Technology of the Proterozoic Athabasca Basin, Saskatchewan and Alberta. Geological Survey of Canada, Bulletin 588. Natural Resources Canada, Ottawa: 229–247.

Controls of Reactivated Faults on the Unconformity-related Uranium Deposits in the Athabasca Basin, Canada

LI Zenghua^{1,2,3}, CHI Guoxiang^{3*}, DENG Teng^{1,2,4} and XU Deru^{1,2,4}

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. School of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. Department of Geology, University of Regina, Regina S4S 0A2, Canada; 4. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, CAS Key Laboratory of Mineral and Metallogeny, Guangzhou 510640, Guangdong, China)

Abstract: Reactivation of pre-existing faults plays an important role in the formation of many hydrothermal ore deposits. The unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin (Canada) is a good example of controls of fault reactivation on hydrothermal mineralization. The unconformity-related uranium deposits in the Athabasca Basin are closely associated with basement faults, which have significantly displaced the unconformity surface between the basin and basement. These faults were initially formed before the basin but were reactivated after the formation of the basin; it is the reactivation of the basement faults that controlled the uranium mineralization. Pre-existing faults represent structural weakness, therefore, it is easier for fractures to form along pre-existing faults (i.e., fault reactivation) than to be created in the intact rocks. Numerical simulation demonstrates that during tectonic compression, the unconformity surface with pre-existing basement fault was displaced, whereas the unconformity without pre-existing basement fault was not displaced. The process of fault reactivation and the resultant enhancement of permeability facilitate fluid circulation and mineralization, and eventually control the uranium mineralization in the Athabasca Basin.

Keywords: fault reactivation; structural control; Athabasca Basin; unconformity-related uranium deposits