

隆起对砂岩型铀矿成矿的控制及找矿启示

聂逢君¹⁾, 杨舒琪¹⁾, 封志兵^{1)*}, 夏 菲¹⁾,
罗 敏²⁾, 王守玉³⁾, 张博程¹⁾

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) 核工业二四〇研究所, 辽宁沈阳 110032; 3) 核工业二一六大队, 新疆乌鲁木齐 830011

摘 要: 沉积盆地古隆起对油气成藏起到明显控制作用, 对砂岩型铀矿成矿的制约也不可忽视。砂岩型铀矿通常就位于盆地边缘构造斜坡带和盆地内部隆起附近。隆起对砂岩型铀矿成矿的控制具体体现在: 控制地下水补-径-排体系、控制层间氧化作用、控制沉积相带发育、伴生断裂促进物质输运以及为成矿供给铀等。中国北方沉积盆地中新生代以来经历复杂的构造活动, 盆地内非均衡发展而多形成隆起, 因此我国铀矿找矿尤其需要重视隆起对铀成矿的控制。其中, 盆地内部找矿应重点关注被大幅抬升的隆起, 而盆地边缘构造斜坡带上找矿需重视微隆起以及基底上覆地层的褶皱。将隆起作为关键控矿要素, 优选适用的攻深找盲方法, 精细刻画盆地基底隆升形成的背斜、褶皱及伴生断裂, 可有效提高铀矿找矿效率并拓展铀矿找矿空间。

关键词: 砂岩型铀矿; 隆起; 构造斜坡带; 盆地内部; 成矿流体

中图分类号: P619.14 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2024.022201

Constraints of Uplift on Sandstone-type Uranium Mineralization and Its Implications for Prospecting

NIE Fengjun¹⁾, YANG Shuqi¹⁾, FENG Zhibing^{1)*}, XIA Fei¹⁾,
LUO Min²⁾, WANG Shouyu³⁾, ZHANG Bocheng¹⁾

1) State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013;

2) Research Institute No.240, China National Nuclear Corporation, Shenyang, Liaoning 110032;

3) Geologic Party No.216, China National Nuclear Corporation, Wulumuqi, Xinjiang 830011

Abstract: Paleo-uplifts in sedimentary basins play a significant role in controlling the accumulation of oil and gas, and their impact on sandstone-type uranium mineralization should not be underestimated. Sandstone-type uranium deposits are typically located on the slopes at the margins of basins and near the uplifts within the basins. The constraints of uplifts on the sandstone-type uranium mineralization are particularly evident in the control of groundwater recharge-runoff-discharge system, the regulation of interlayer oxidation reactions, the influence on sedimentary facies development, the promotion of material transport through associated faults, and the supply of uranium for mineralization. Since the Cenozoic era, the sedimentary basins in northern China have undergone complex tectonic activities, resulting in the formation of multiple uplifts due to the uneven development within basins. Therefore, in uranium exploration in China, particular attention needs to be paid to the control of uplifts on uranium mineralization. In this regard, exploration within the basin should focus on uplifts that have undergone significant tectonic uplift, while exploration on the slopes at the margins of basins should emphasize micro-uplifts and folds in overlying formations of the basement. Considering uplifts as key ore-controlling factors, selecting appropriate prospecting methods, and finely characterizing the anticlines, folds, and associated faults

本文由中国铀业有限公司-东华理工大学核资源与环境国家重点实验室联合创新基金项目(编号: 2023NRE-LH-08; NRE2021-02)、国家自然科学基金项目(编号: U2244205; U2067202; 42172098)、中国核工业地质局科研项目(编号: 202311-5)和中国核工业地质局调查评价项目(编号: 202212-8)联合资助。

收稿日期: 2023-10-21; 改回日期: 2024-01-20; 网络首发日期: 2024-02-23。责任编辑: 张改侠。

第一作者简介: 聂逢君, 男, 1962 年生。博士, 教授。主要从事砂岩型铀矿成矿作用研究工作。E-mail: niefj@263.net。

*通信作者: 封志兵, 男, 1989 年生。博士, 副教授。主要从事砂岩型铀矿成矿作用与探测技术研究工作。E-mail: zbfengjl@163.com。

formed by the uplift of the basin basement can effectively enhance uranium prospecting efficiency and expand the uranium prospecting space.

Key words: sandstone-type uranium deposit; uplift; tectonic slope zone; interior of the basin; ore-forming fluids

砂岩型铀矿凭借开采成本低、利于环保等优势,成为当今中国铀矿勘探与开发的首选类型(张金带等, 2019)。构造活动是砂岩型铀矿成矿的主要控制因素之一(陈正乐等, 2010; 韩效忠等, 2023)。根据我国早期学习和引进前苏联的砂岩型铀矿成矿理论, 沉积盆地所经历的次造山运动触发砂岩型铀矿成矿, 之后相对稳定的构造环境为铀的长时间聚集成矿提供有利条件(李胜祥等, 2006)。随着中国砂岩型铀矿找矿的大规模实践, 发现铀成矿明显受控于中国特殊的大地构造背景(张金带等, 2010; 焦养泉等, 2015; Cheng et al., 2020)。在区域构造为主导的地质背景下, 北方沉积盆地成为中国主要的砂岩型铀矿富集区(张金带等, 2010)。与此同时, 引导铀成矿的动力学背景也为学者重点关注。中国北方沉积盆地自中生代以来不同区域所经历的构造演化历史差别大, 西北地区铀成矿主要受控于印度板块俯冲作用下喜马拉雅造山运动引起的持续挤压抬升, 东北地区铀成矿主要受控于太平洋板块俯冲引起的反转构造、伸展构造等, 中北地区铀成矿是蒙古—鄂霍茨克洋闭合与前述构造活动综合作用的结果(黄净白等, 2005; 陈正乐等, 2010; 刘波等, 2020; 聂逢君等, 2021)。这也决定了产自不同区域的铀矿床各具特点, 自西向东主要找矿目的层从侏罗系向白垩系转变(焦养泉等, 2022); 铀矿体形态从以卷状为主向板状、透镜状为主转变; 越往东部深部热流体作用于铀成矿的现象愈加明显(封志兵等, 2021a)。这些研究成果证实了中国独特的地质构造格局下砂岩型铀矿成矿的特殊性。然而, 与区域构造相比, 有关局部构造控制砂岩型铀矿成矿的研究成果少有报道。

作为盆地构造演化的产物, 古隆起的形成与发展对油气成藏的控制是石油地质的重要研究内容(马永生等, 2005; 何登发等, 2008; 包洪平等, 2022)。随着产铀区地质-地球物理资料的大量积累, 局部构造、断裂与砂岩型铀矿的密切空间关系得到关注(聂逢君等, 2021; 俞初安等, 2023)。砂岩型铀矿往往产出在特定的构造单元区域, 即隆起的翼部或周边(Jin et al., 2016; 封志兵等, 2022)。鉴于此, 本文系统地梳理已知铀矿床与隆起的空间关系, 在厘清隆起形成演化过程与砂岩型铀矿成矿关系的基础上, 分析隆起对砂岩型铀矿成矿的控制并探讨找矿启示, 进而为砂岩型铀矿找矿实践提供有益借鉴。

1 隆起与砂岩型铀矿的空间匹配关系

1.1 盆地边缘构造斜坡带隆起与铀矿化

产出在盆地边缘构造斜坡带的铀矿床并非连续分布, 而是有选择性地间隔分布在构造斜坡带的特定部位(古抗衡等, 2010)。伊犁盆地探明的砂岩型铀矿都产出在盆地南缘的构造斜坡带上。该构造斜坡带在中国境内长达 100 多 km, 自西向东已探明达拉第、蒙其古尔、扎吉斯坦、乌库尔其、库捷尔太、洪海沟等系列铀矿床。构造斜坡带上发育多个次级构造单元, 自西向东包括洪海沟西部拗陷、库捷尔太背斜、苏东布拉克微凹、乌库尔其微凸、扎吉斯坦向斜以及库鲁斯泰—达拉地复式向斜等。其中红海沟、库捷尔太铀矿床位于库捷尔太背斜一带; 乌库尔其铀矿床位于与其同名的舒缓背斜边缘; 蒙其古尔、扎吉斯坦铀矿床虽然位于扎吉斯坦向斜, 但同样位于后期断裂形成的次级背斜之上; 达拉地铀矿床产出在鲁斯泰—达拉地复式向斜附近(图 1a; 表 1; 陈奋雄等, 2016a, b)。吐哈盆地十红滩铀矿床位于盆地西南缘的艾丁湖斜坡带。该构造斜坡带自西端苏巴什到东部的迪坎尔同样长达 100 多 km, 十红滩铀矿床产出在基底隆起—十红滩背斜附近, 铀矿体围绕背斜产出(图 1b)。除此之外, 在吐哈盆地苏巴什、白嘴山、迪坎尔等地的找矿目的层微翘起地段也探明铀矿点(权建平等, 2006; 乔海明等, 2016)。鄂尔多斯盆地纳岭沟、塔然高勒和大营铀矿床组成世界级铀矿田。它们集中产出在盆地东北部, 围绕近北东向的微隆起产出。其中, 塔然高勒铀矿位于微隆起带西侧、纳岭沟铀矿位于微隆起带东南侧, 而大营铀矿床则距离隆起区较远, 但矿体呈弧形围绕构造斜坡带产出(图 1c; 表 1; 俞初安等, 2023)。

伊犁盆地是一个跨国界的盆地, 盆地大部分区域位于哈萨克斯坦国, 其南缘构造斜坡带是全球砂岩型铀矿集中产出区。天山造山带向盆地内延伸而形成中卡兹库姆次造山带, 铀矿床环绕该次造山带产出(图 2)。非洲尼日尔境内阿加德兹盆地探明的砂岩型铀矿床主要产出在阿尔利特断裂两侧。它们集中分布在埃尔利特、伊姆拉伦和特吉达 3 个区域, 其中特吉达铀矿区位于断背斜和断向斜相间的“堑垒式”构造区域。根据现有资料, 区内已探明的铀矿床围绕背斜核部出露地表(聂逢君等, 2010)。

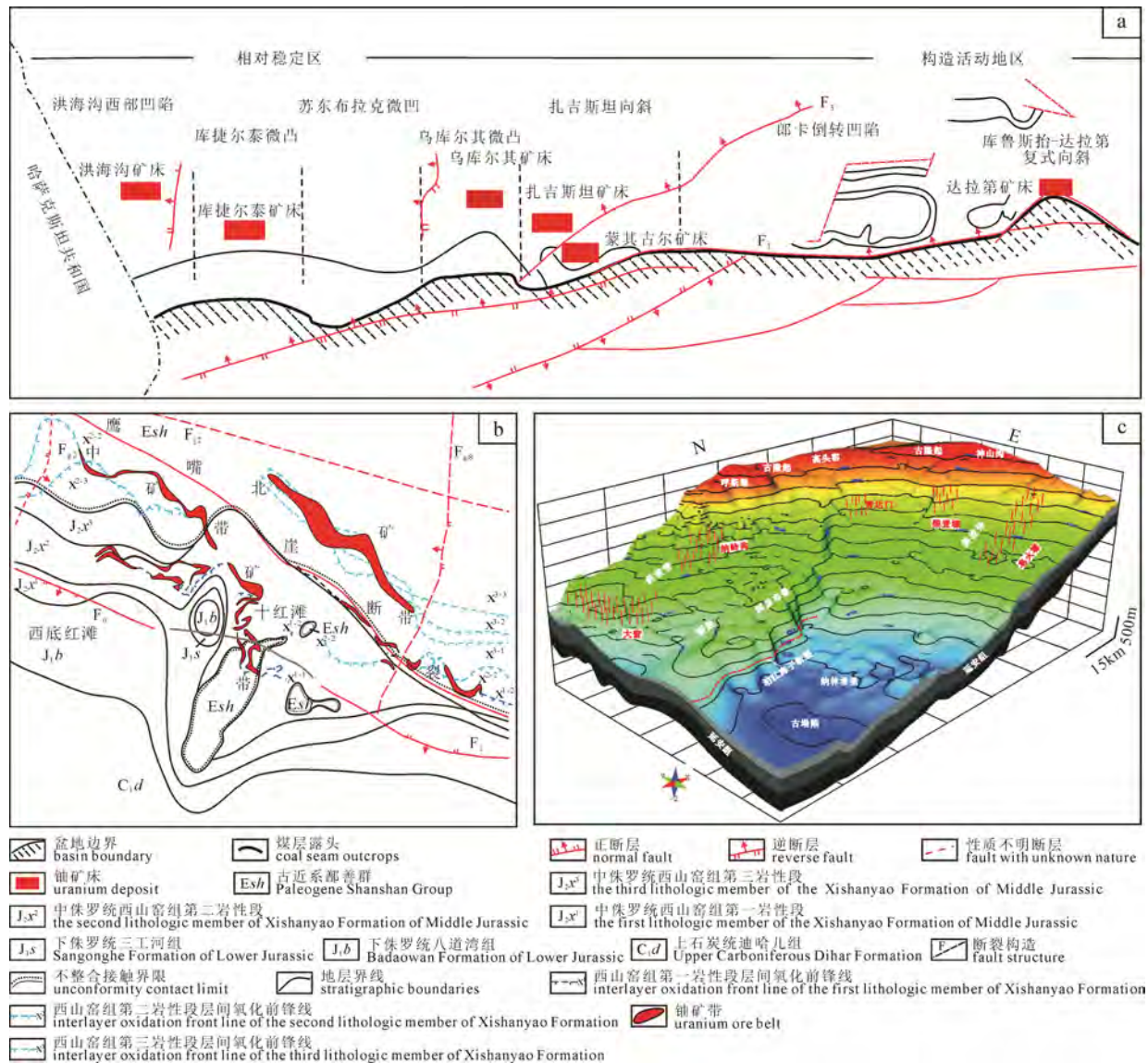


图1 伊犁盆地南缘铀矿床与局部构造的空间关系(a, 据陈奋雄等, 2016a)、吐哈盆地十红滩地区铀矿体与局部构造的空间关系(b, 据乔海明等, 2016)和鄂尔多斯盆地东北缘东胜地区铀矿床空间分布与直罗组沉积前古地貌(c, 据张云等, 2022)

Fig. 1 Spatial relationship between uranium deposits and local structures in the southern margin of Yili Basin (a, after CHEN et al., 2016a), spatial relationship between uranium-ore bodies and local structures in the Shihongtan district, Turpan-Hami Basin (b, after QIAO et al., 2016), and spatial distribution of uranium deposits and pre-depositional paleogeography of the Zhiluo Formation in the Dongsheng district, northeastern margin of Ordos Basin (c, after ZHANG et al., 2022)

1.2 盆地内部隆起与铀矿化

长期以来,盆地边缘构造斜坡带是砂岩型铀矿的主要找矿区域。但近年在盆地内部探明的铀矿床和日益增多的找矿线索表明,盆地内部同样具有一定的砂岩型铀矿找矿前景(封志兵等, 2021b)。

现已探明产出在盆地内部的砂岩型铀矿都位于隆起翼部或周缘地势低洼处。松辽盆地已探明的砂岩型铀矿床位于盆地西南部的开鲁拗陷内,截至目前已探明钱家店、宝龙山、海力锦和大林等大-中型砂岩型铀矿床,是盆地内部隆起翼部砂岩型铀矿成矿的典型(封志兵等, 2022)。这些铀矿床围绕宝龙山构造天窗附近产出。除宝龙山构造天窗之外,矿区附近还发育架玛吐、协代等花岗岩凸起(图3),

另有地震资料揭示矿区附近还存在多个隐伏凸起。大林铀矿区探明的一条铀矿带受协代隆起周边发育的氧化带控制;海力锦铀矿床虽距离宝龙山构造天窗较远,但毗邻架玛吐凸起(图3)。二连盆地已探明多个大-中型铀矿床,包括巴彦乌拉、哈达图、芒来以及赛汉高毕等砂岩型铀矿床;努和廷、苏崩等泥岩型铀矿床。它们虽然毗邻巴音宝力格隆起,但都产出在马尼特拗陷和乌兰察布拗陷联接的沉积中心,即巴-赛-齐古河谷(康世虎等, 2017)。盆地基底呈“多隆多拗、隆拗相间”的构造格局,产铀区普遍发育局部隆起。其中,哈达图、赛汉高毕、巴彦乌拉等铀矿床位于塔木钦凸起附近(刘波等, 2018),更有甚者,地处盆地乌兰察布拗陷齐哈日格图凹陷

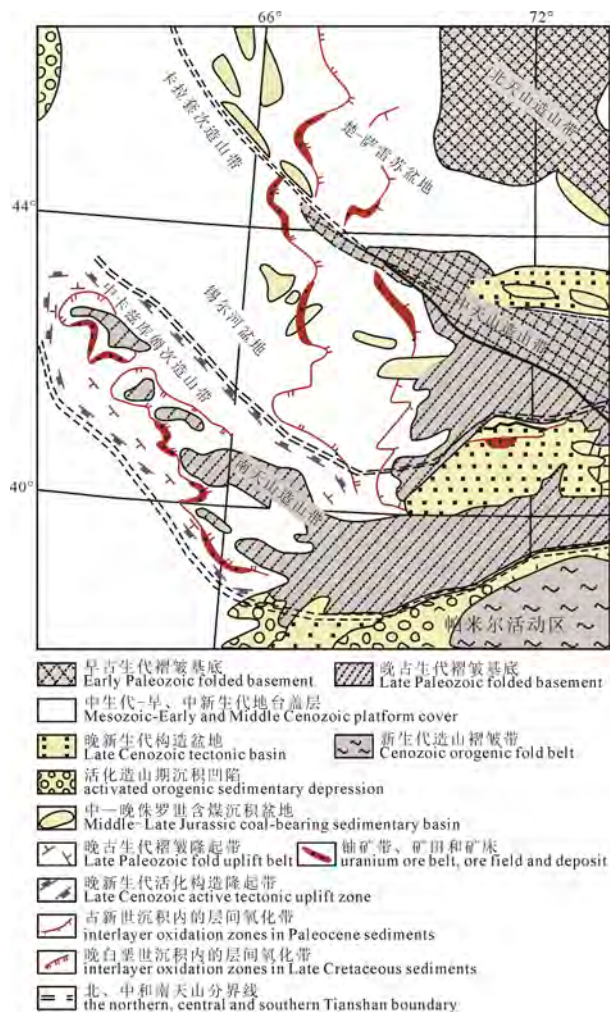


图2 中亚哈萨克斯坦铀矿与天山造山带的空间关系
(焦养泉等, 2015)

Fig. 2 Spatial relationship between the uranium deposits in Kazakhstan, Central Asia and Tianshan Orogenic Belt (JIAO et al., 2015)

的哈达图铀矿床位于苏尼特隆起、东方红凸起、赛乌苏凸起和北部的塔木钦凸起之间的地势低洼处(图 4a)。该铀矿床的典型特征是, 黄色-氧化砂体十分发育, 而灰色-含矿砂体呈薄层“悬浮”在黄色-氧化砂体中(图 4b, c)。另外, 二连盆地川井坳陷探明的铀矿化位于苏海布龙剥蚀窗口和古近纪剥蚀窗口附近的氧化带前锋线位置(彭云彪等, 2018)。鄂尔多斯盆地西南部国家湾铀矿床位于李家河 NW-SE 向背斜的西南翼(张伟盟等, 2022), 与其邻近的环县铀矿化点也位于天环坳陷和西缘逆冲带交汇部位(俞初安等, 2023)。准噶尔盆地大庆沟铀矿床位于靠近盆地东缘的帐篷沟背斜翼部, 产在中侏罗统西山窑组的煤层中。铀矿化沿背斜两翼均有分布, 主要集中产出在东南翼的南部和中部(秦明宽等, 2017)。另外, 塔里木盆地北缘缺乏稳定平缓的构造环境, 不利于盆地边缘构造斜坡带铀的聚集成矿, 现已探明的铀矿化主要产出在盆地内部复背斜的翼部(鲁克改等, 2019)。

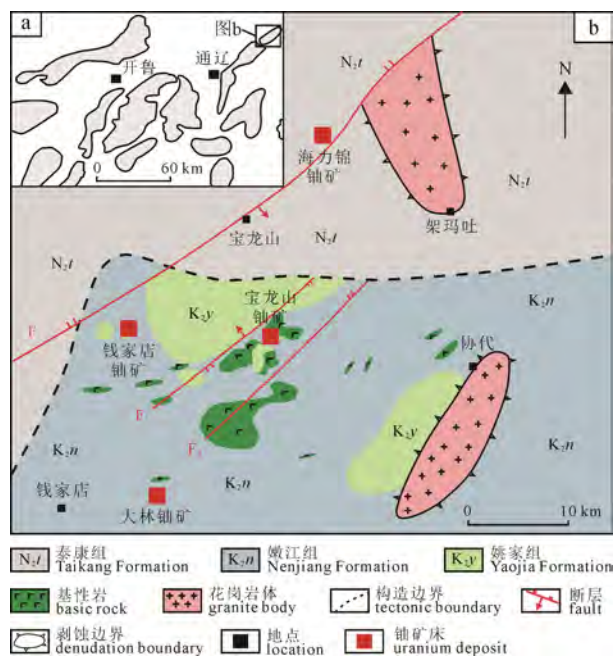


图3 松辽盆地西南部钱家店凹陷构造位置(a)、铀矿床与局部构造的空间关系(b)(黄少华等, 2022)

Fig. 3 Tectonic location (a), and spatial relationship between uranium deposits and local structures (b) of the Qianjiadian Sag, southwestern Songliao Basin (HUANG et al., 2022)

2 铀成矿相关的隆起形成与演化

2.1 与铀成矿有关的隆起

隆起是与坳陷相匹配的正向构造单元, 形态呈长条状、弧形、穹隆状(何登发等, 2008)。它可以形成在盆地内部, 也可以形成在盆地边缘; 可以是古老基底褶皱, 也可以是断裂、沉积盖层的变形。大型隆起往往是重要的油气聚集场所, 例如松辽盆地的中央古隆起、准噶尔盆地的陆梁隆起带和中央隆起带、塔里木盆地的中央隆起带等(何登发等, 2008; 包洪平等, 2022)。然而, 砂岩型铀矿往往产出在局部区域的隆起翼部。与控制油气成藏的大型隆起相比, 与砂岩型铀矿成矿有关的隆起通常规模较小。事实证明, 不管是位于盆地边缘构造斜坡带, 还是位于盆地内部的隆起都可以在空间上与铀矿密切相关(图 1 和图 2)。前人研究表明, 与伊犁盆地南缘铀矿空间密切相关的 4 类隆起类型分别为纵弯背斜型、对冲型、冲断层-褶皱型、同心褶皱型(陈奋雄等, 2016a); 与十红滩铀矿床空间有关的是鼻状背斜(古抗衡等, 2010); 与鄂尔多斯盆地东北区铀矿密切相关的是构造斜坡带上的微隆起。由此可知, 盆地边缘构造斜坡带上与铀矿在空间上密切相关的隆起可以是大幅抬升的构造天窗, 也可以是微小隆起。然而, 产出在盆地内部的铀矿床往往位于单个大型隆起翼部, 或位于多个局部隆起的夹持区。这些隆起多是由于盆地基底褶皱或构造差异引起,

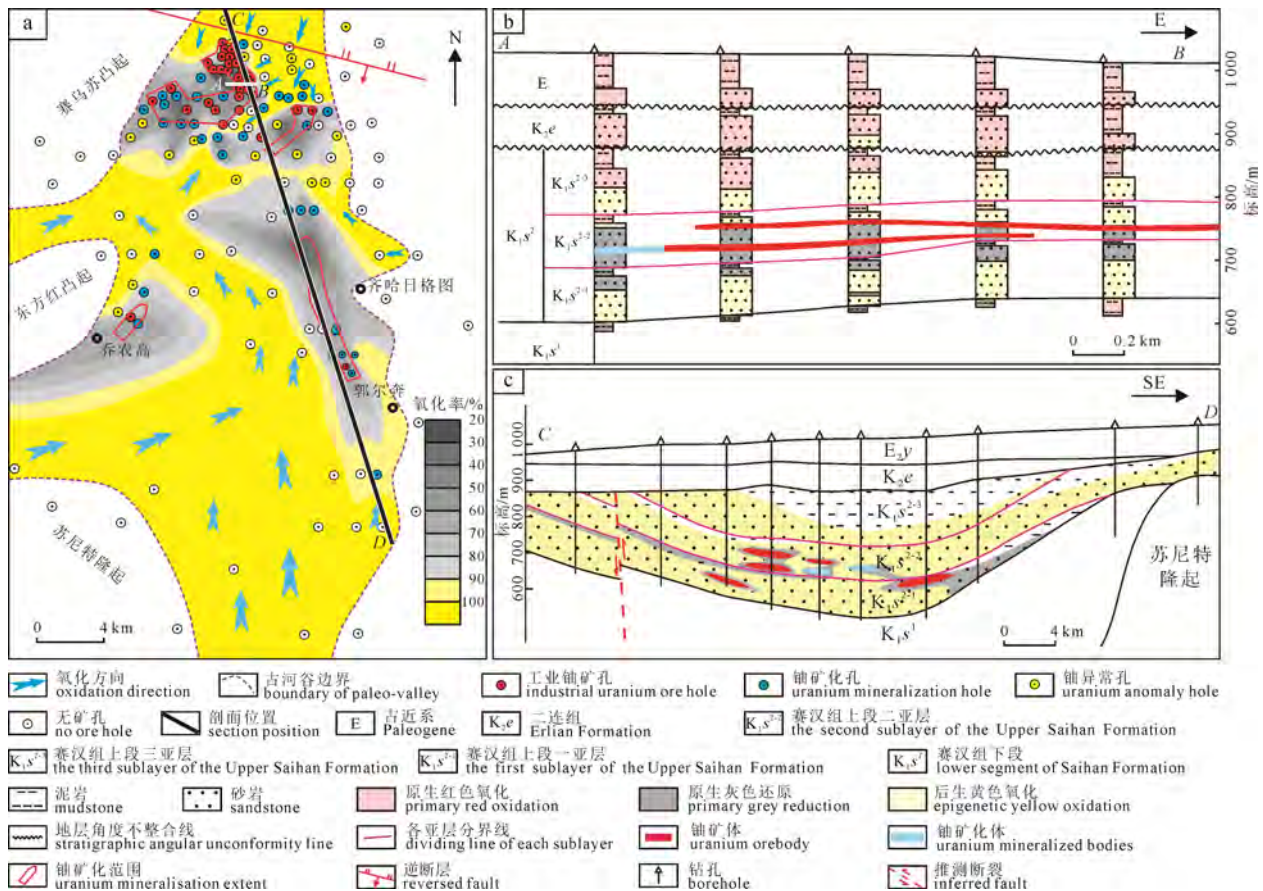


图4 二连盆地哈达图铀矿床矿体与隆起的空间关系(a)和超氧化砂体剖面图(b, c)(吕永华等, 2021)
Fig. 4 The spatial relationship between uplift and ore bodies (a) and section of superoxidized sand bodies (b, c) in the Hadatu uranium deposit of Erlian Basin (Lǚ et al., 2021)

它们的规模和隆升幅度通常较大, 且多存在剥蚀构造天窗。以二连盆地哈达图铀矿为例, 区内多个隆起的上覆沉积盖层因被构造抬升而形成剥蚀构造天窗, 铀矿化多产出在剥蚀构造天窗的附近(吴曲波等, 2021)。

2.2 隆起的形成演化与铀矿化

中国砂岩型铀矿主要产出在北方沉积盆地, 但它们因所处位置不同导致所经历的构造演化也有所区别(程银行等, 2020)。中生代天山的构造隆升对其北部的伊犁盆地、吐哈盆地产生明显挤压作用(宋昊等, 2016), 在构造应力场作用下, 盆地边缘因被掀斜而形成相对稳定的构造斜坡带(王勇等, 2006)。然而, 由于盆地边缘基底结构和发展的非均衡性, 伊犁盆地南缘构造斜坡带在西部构造稳定区形成纵弯背斜, 在东段活跃区形成不对称盆式向斜和鞍状背斜构造, 在中段过渡区形成对冲构造型、背冲构造型和冲断层-褶皱型为主的构造样式(陈奋雄等, 2016a); 吐哈盆地艾丁湖构造斜坡带中下侏罗统地层中发育穹隆背-向斜、断展背斜(权建平等, 2006)。

由于晚白垩世末—古新世太平洋板块向西俯冲, 中国北方东部沉积盆地普遍发生构造反转(朱

日祥等, 2011)。松辽盆地西南部局部区域形成的反转背斜遭受剥蚀, 形成地势较高的宝龙山剥蚀构造天窗(于文斌等, 2008)。但笔者解释矿区地震资料发现, 矿床邻近的架玛吐、协代等花岗岩凸起在晚白垩世末—古新世之前就已经形成, 在太平洋板块向西俯冲影响下而发生进一步抬升。二连盆地本身具有“多凸多凹”的构造格局, 加之受晚白垩世末—古新世太平洋板块向西俯冲的影响, 盆地经历了一次近EW向的挤压, 形成一系列压性、压扭性反转构造, 导致盆地中部大部分地区缺失上白垩统和古新统(刘武生等, 2018)。地震资料表明, 二连盆地中部铀矿集区的隆起是该时期反转构造作用的结果(吴曲波等, 2021)。鄂尔多斯盆地西南部环县—泾川地区在白垩系沉积之后发生掀斜, 李家河背斜形成并抬升找矿目的层(贺锋等, 2022)。准噶尔盆地在侏罗系头屯河组沉积初期构造环境由早期的弱伸展转为受盆地边界断裂控制的压扭构造, 致使盆地西北缘、帐北、石英滩三个泉等地区的地层发生构造抬升, 其中盆地东部的帐篷沟背斜也在此时形成(宋继叶, 2014)。

上述与砂岩型铀矿空间相关的盆地边缘构造斜坡带和盆地内部隆起的形成与所在盆地经历的区

域构造事件有关,西北地区与喜马拉雅造山运动有关,而东北地区与西太平洋板块俯冲有关。砂岩型铀矿成矿受区域构造活动的控制,隆起是区域构造运动作用下盆地演化伴生的产物,也可以是铀成矿的重要控制因素之一。

3 隆起对于砂岩型铀矿的地质意义

3.1 控制地下水补-径-排体系

砂岩型铀矿也被称为水成铀矿,铀的聚集成矿是含铀-氧流体持续汇聚到氧化-还原过渡带并发生铀沉淀和积累的结果(黄世杰, 1994)。盆地边缘构造斜坡带之所以长期作为砂岩型铀矿找矿的首选区域,除盆地边缘有丰富的铀源供给之外,构造斜坡带的地势差驱动盆地边缘含铀-氧流体汇入沉积地层。隆起的形成可以改变找矿目的层原有的水动力条件。倘若局部隆起被大幅抬升,上覆地层经剥蚀而形成构造天窗,可以作为地下水的补给和排泄区。二连盆地巴-赛-齐古河谷中部塔木钦凸起在赛汉期末经历的构造反转使得赛汉高毕地区形成剥蚀天窗,为赛汉高毕、巴彦乌拉和哈达图等多个铀矿床的形成补给含铀-氧流体(图 5; 刘波等, 2018)。伊犁盆地南缘库捷尔泰、乌库尔其等背斜造成侏罗系被大幅抬升,形成的构造天窗为铀成矿补给含铀-氧流体(陈奋雄等, 2016b)。准噶尔盆地东部帐篷沟背斜也发生大幅抬升,形成的构造天窗同样被认为是含铀-氧流体的补给区(秦明宽等, 2017)。有关松辽盆地南部铀矿集区宝龙山构造天窗与地下水

的补-径-排关系,早期有学者认为宝龙山构造天窗为钱家店、宝龙山等铀矿床的形成补给含铀-氧流体(于文斌等, 2006)。但经进一步勘探发现,越靠近宝龙山构造天窗区还原-灰色砂岩更加发育,现今普遍认为宝龙山构造天窗是地下水的排泄区(蔡建芳等, 2018)。与此同时,形成构造天窗的隆起也会影响地下水的径流方向,垂向上在地势差影响下构造天窗补给的地下水流向低地势区域;平面上还可能改变来自盆地边缘或其它区域地下水的运移路径。与之相比,未形成剥蚀构造天窗的隆起因上覆地层并未遭受严重剥蚀,不能为隆起区域补给或排泄地下水,但同样可以控制地下水的运移路径。吐哈盆地十红滩背斜并未形成构造剥蚀天窗,但地层产状因之发生局部“变异”,来自盆地边缘含铀-氧流体的径流方向在隆起附近发生改变,进而影响铀聚集区域的选择(Wu et al., 2009)。鄂尔多斯盆地东北缘东胜微隆起同样在一定程度上控制地下水的运移路径和铀聚集区域的选择,尤为典型的是,大营铀矿床的矿体呈弧形沿构造斜坡带外侧分布(俞初安等, 2023)。

3.2 控制层间氧化作用

砂体的后生氧化是砂岩型铀矿成矿的前提,也是砂岩型铀矿找矿追踪矿体的重要指示。盆地构造样式在一定程度上控制氧化带的空间分布。二连盆地哈达图铀矿床、松辽盆地南部大林铀矿床的氧化砂体十分发育,薄层灰色含矿砂体夹持在厚层黄色-氧化砂体中(图 4b, c)。哈达图铀矿床附近

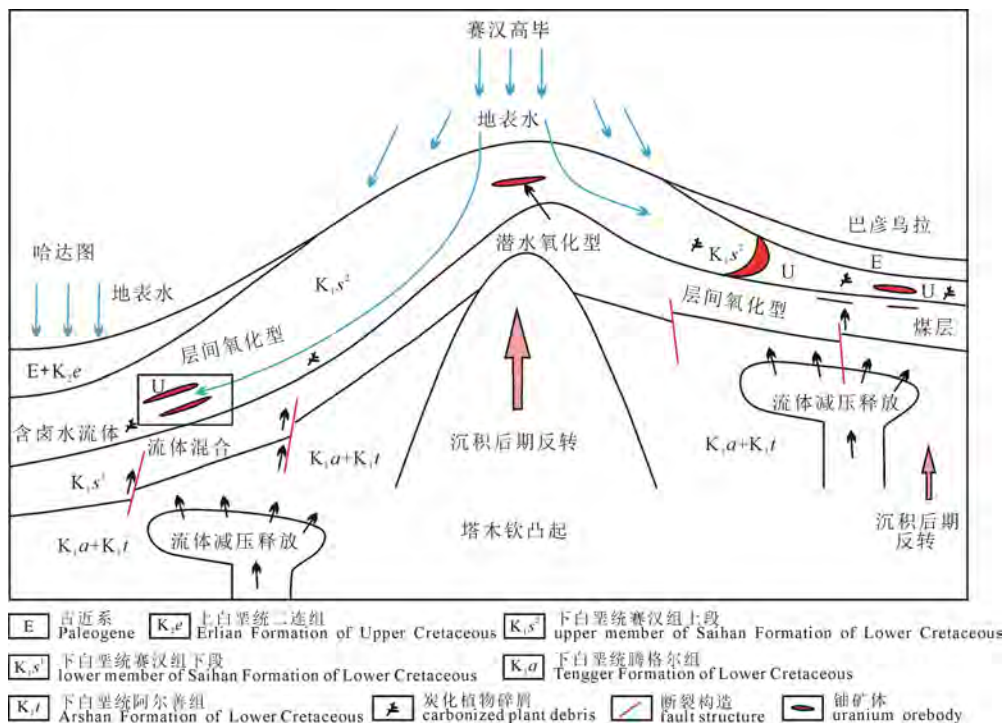


图 5 二连盆地塔木钦凸起对成矿流体运移的控制(刘波等, 2018)
Fig. 5 Constraints of Tamuqin uplift on migration model of uranium-forming fluids in Erlian Basin (LIU et al., 2018)

存在苏尼特隆起、东方红凸起、赛乌苏凸起以及塔木钦凸起等多个隆升幅度大的隆起, 且形成了构造天窗(图 4a; 吴曲波等, 2021)。大林铀矿床与之相似, 其附近不仅存在宝龙山构造天窗, 还发育架玛吐凸起、协代凸起等局部隆起。新近铀矿勘探成果表明, 协代花岗岩凸起周边发育的氧化带前锋线产出工业铀矿带。多个大幅度隆升的隆起在形成构造天窗促进含铀-氧流体的大量渗入而营造超氧化局面的同时, 铀元素可以迁移和富集至隆起夹持区的地势低洼处(图 4), 而并非仅局限在隆起的翼部。除此之外, 隆起的隆升幅度和面积也会制约氧化前锋线的发育位置。伊犁盆地南缘构造斜坡带自西向东抬升幅度增大, 东部乌库尔其背斜附近发育的氧化前锋线要比西部库捷尔泰背斜隆起更往盆地内部推进, 其原因在于大幅度抬升使得流体重力势能增大, 含铀-氧流体补给运移距离也随之增加。

3.3 控制沉积相带发育

隆起抬升可以发生在找矿目的层形成之前, 也可以发生在找矿目的层形成之后。倘若隆起的形成时间早于找矿目的层, 将影响找矿目的层附近岩性和岩相的发育。例如, 卢天军等(2022)研究发现松辽盆地南部铀矿集区在 112~100 Ma 的泉头期就已经形成古隆起, 晚白垩世姚家期的河流受到古隆起的约束, 发生曲流河向辫状河的逆向转变, 形成大规

模有利于铀成矿的山间辫状河砂体(图 6)。二连盆地巴-赛-齐古河谷内存在大量局部隆起, 局部隆起制约沉积相带的分布。靠近局部隆起的区域通常侧向堆积河道边滩微相, 而更远区域则发育滞留沉积微相沉积, 铀矿化往往产出在河道亚相沉积微相变异的位置(刘持恒等, 2020)。

3.4 伴生断裂促进物质输运

在挤压构造应力场作用下, 地层在因发生褶皱而形成隆起的同时, 常伴生深切基底的断裂。大量研究表明, 断裂的存在能够对铀成矿起到积极作用, 尤其是隆起周边发育的断裂对铀成矿的控制更加明显。

断裂沟通深部地层, 可以为铀成矿提供还原介质、热能及可能的相关矿物。松辽盆地南部铀矿集区宝龙山构造天窗附近断裂交错发育, 区内钱家店和宝龙山铀矿床的矿体产出在断裂-辉绿岩附近。来自岩石学和矿物学的研究成果加以证实了矿区找矿目的层曾有热流体活动(聂逢君等, 2021)。目前学者普遍认可的是, 深部热流体促进铀元素再活化和迁移, 深部油气增加地层还原容量而促进铀的聚集成矿。二连盆地哈达图铀矿区基底受 NE 向断裂构造控制, 基底之上的沉积盖层发育北北西和北东向 2 组断裂构造(李子颖等, 2022)。已有研究表明, 哈达图铀矿床的形成也存在深部热流体和油气的参与(赵兴齐等, 2018; 聂逢君等, 2021; 李子颖等, 2022)。

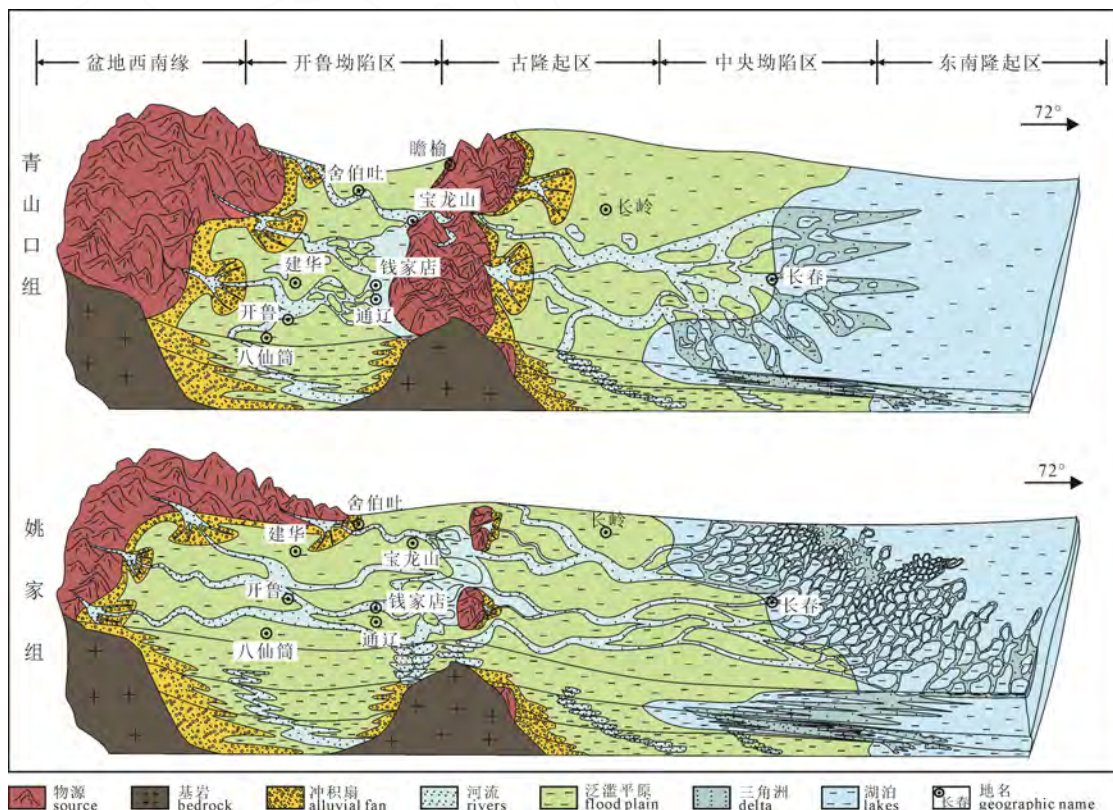


图 6 松辽盆地南部隆起对铀矿区沉积的控制(卢天军等, 2022)

Fig. 6 Constraints of uplift on sedimentation in the uranium deposit area for the southern Songliao Basin (LU et al., 2022)

隆起附近的局部断裂还会影响地下水的补-径-排体系,例如伊犁盆地南缘蒙古尔铀矿区含铀-氧流体在扎吉斯坦河断裂和控盆断裂之间流通(陈奋雄等, 2016a), 洪海沟断裂作为阻水断裂控制含铀-氧流体持续向洪海沟铀矿区汇聚(陈奋雄等, 2016b, c)。吐哈盆地十红滩铀矿床北矿带的发育明显受控于十红滩断裂(图 1b), 该断裂不仅抬升找矿目的层使其遭受隆升剥蚀而促进含铀-氧流体的渗入, 还加速地下水的径流速度而促进南矿带层间氧化带的发育(权建平等, 2006)。

3.5 为成矿供给铀

理论上, 供给砂岩型铀矿成矿的铀源可以来自盆地边缘蚀源区、沉积地层自身以及深部地层。盆地边缘构造斜坡带隆起的抬升形成地表水补给窗, 在盆地边缘丰富铀源的加持下, 容易形成高品位的铀矿床。伊犁盆地南缘构造斜坡带洪海沟地区存在侏罗系“地下露头”, 即侏罗系与第四系直接接触, 在找矿目的层侏罗统西山窑组上段形成的补给窗为含铀-氧流体的渗入提供有利条件(陈奋雄等, 2016a)。

盆地边缘蚀源区的铀可能难以长距离运移到盆地内部。在这种情况下, 沉积地层自身的铀对砂岩型铀矿成矿显得尤为重要。盆地内部形成的隆起大幅抬升上覆地层, 上覆地层因被剥蚀而形成构造天窗。含铀-氧流体在渗入到找矿目的层的过程中会将地层中的铀氧化, 被萃取出的铀随流体进一步运移到氧化-还原过渡带而聚集成矿。例如, 准噶尔盆地东部帐篷沟背斜自侏罗纪末期以来多次经历隆升(秦明宽等, 2017), 含铀-氧流体在渗入过程中可以萃取地层中的铀, 导致铀的多次叠加富集。

3.6 抬升找矿目的层

沉积盆地内部区域往往是沉积中心, 也有沉积盆地边缘的构造斜坡带不甚发育, 找矿目的层埋深较大。在这种情况下, 即便曾发生过铀的聚集, 也难以达到开采利用价值。隆起翼部找矿目的层的埋深相对周边小, 产出的铀矿石更容易达到现行规范要求的品位和单位面积铀含量, 进而提高铀矿开采经济价值和拓展铀矿找矿空间。以松辽盆地南部大林铀矿床为例, 该铀矿床的矿体呈多层产出, 其产状与地层产状一致。在宝龙山构造天窗抬升的影响下, 与构造天窗的相对位置由近及远埋深逐渐增大。大林铀矿床最上层的矿体埋深 376~446 m, 矿体规模小且铀矿石的品位低(略大于 0.01%)。倘若大林地区未邻近宝龙山构造天窗, 该层矿体可能难以达到最低地浸开采要求。

4 找矿启示

4.1 隆起铀成矿作用的探讨

由于成矿构造环境的差异, 我国北方不同区域砂岩型铀矿找矿目的层、埋深以及矿体形态都存在明显区别, 但隆起都对它们起到明显的空间定位作用。已探明的砂岩型铀矿往往产出在盆地边缘构造斜坡带/盆地内部隆起的翼部或周边(表 1)。其原因在于, 隆起为铀成矿起到控制地下水流向、氧化带发育以及伴生断裂控矿等作用。然而, 位于盆地内部与盆地边缘构造斜坡带上的隆起对砂岩型铀矿成矿的控制有所区别。

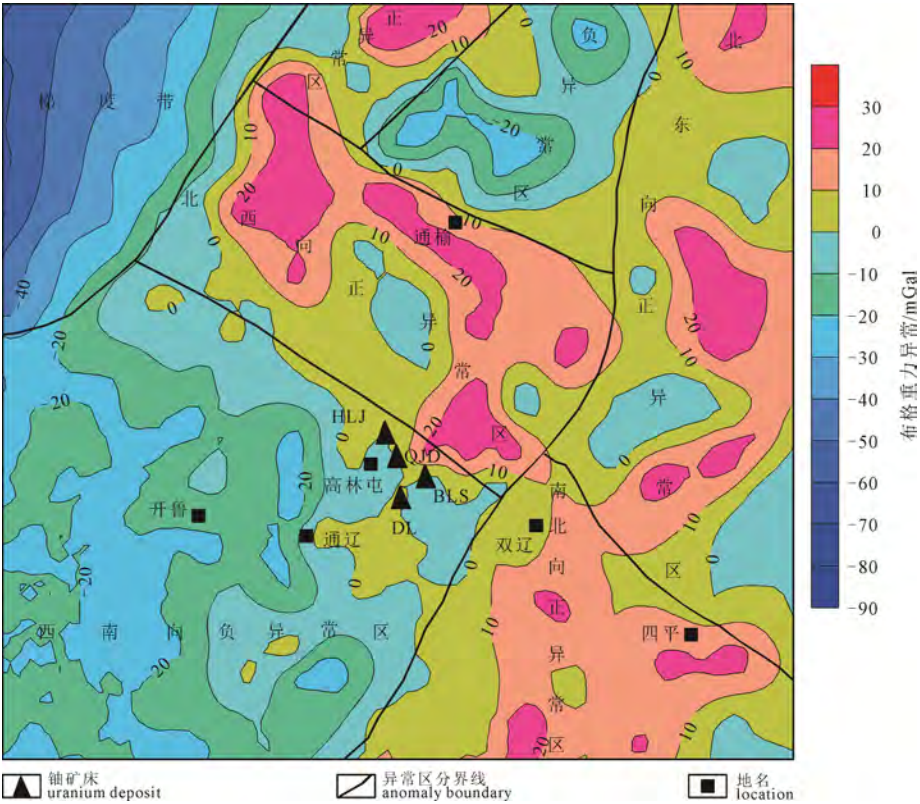
盆地内部形成的隆起通常与盆地基底拼合、演化有关, 如二连盆地、松辽盆地南部。隆起形成在基底拼合时期, 制约后期找矿目的层沉积(微)相的空间展布; 而在铀成矿期隆起发生进一步大幅抬升, 营造地下水补-径-排体系并伴生断裂等(图 5)。然而, 位于盆地边缘构造斜坡带上的隆起往往是构造应力场作用下盆地边缘发生构造抬升时构造斜坡带非均衡发展的结果。它常发育在找矿目的层形成之后, 但对早期局部地质“变异”也存在继承性, 故在隆起附近也可能发生沉积相变。盆地边缘构造斜坡带有来自蚀源区丰富的铀源供给, 而盆地内部隆起附近铀成矿可能主要来自沉积地层自身。从铀源条件来看, 位于盆地边缘构造斜坡带上的隆起成矿潜力优于盆地内部隆起成矿。如果盆地边缘构造斜坡带坡度较大, 地下水径流通畅, 氧化带十分发育, 远离盆地边缘构造斜坡带的局部隆起区域也具有较好的铀成矿潜力, 例如二连盆地巴-赛-齐古河谷的巴彦乌拉、苏崩铀矿床等。找矿实践表明, 相对于沉积盆地而言, 砂岩型铀矿的矿床范围不大, 兼顾铀元素易聚易散的特点, 盆地边缘构造斜坡带上的微隆起以及基底上覆地层的褶皱也值得关注。中国北方沉积盆地中新生代以来经历复杂的构造活动, 盆地内部多发生构造反转而形成隆起。盆地内部隆起对砂岩型铀矿成矿的控制值得重视(封志兵等, 2022), 这些隆起有望拓展铀矿找矿空间, 保障我国今后铀矿找矿工作的可持续发展。

4.2 对找矿勘查的启示

目前, 砂岩型铀矿找矿主要是通过大量实施勘探工作来完成, 相对经济、高效的地面勘查方法找矿效果尚不能满足实际生产需求。前已述及, 隆起对砂岩型铀矿成矿起到明显控制作用, 甚至定位砂岩型铀矿, 有必要将隆起作为关键控铀成矿要素。隆起多是盆地基底隆升形成的背斜或褶皱, 因此查明盆地基底起伏是查找隐伏隆起的关键。基底岩石

表 1 北方主要产铀盆地铀矿床综合信息一览表
Table 1 Information of uranium deposits in major uranium-producing basins in North China

盆地	典型矿床	隆起	隆起类型	矿体形状	找矿目的层	埋深/m
松辽盆地	钱家店	宝龙山构造天窗	盆地内部隆起	板状、 透镜状	姚家组 青山口组	240~350
	宝龙山				300~350	
	大林	姚家组			376~718	
	海力锦	架玛吐隆起			570~680	
鄂尔多斯盆地	大营	伊盟隆起	盆地边缘构造 斜坡带隆起	板状、卷状	315~630	
	纳岭沟			315~630		
	塔然高勒			500		
	皂火壕			板状	直罗组	60~220
	呼斯梁				<350	
	双龙	渭北隆起	盆地内部隆起	200~500		
	黄陵	350~500				
二连盆地	巴彦乌拉	塔木钦凸起	盆地内部隆起	板状、卷状	<150	
	赛汉高毕			赛汉组	57~108	
	乔尔古	多个隆起夹持		板状	<600	
	哈达图			230~549		
伊犁盆地	洪海沟	库捷尔太微凸	盆地边缘构造 斜坡带隆起	板状	西山窑组	>600
	库捷尔泰			>400		
	乌库尔其	乌库尔其微凸		卷状	水西沟群	>400
	扎吉斯坦				>400	
	蒙古古尔				三工河组 西山窑组	509~802



HLJ—海力锦矿床; QJD—钱家店矿床; BLS—宝龙山矿床; DL—大林矿床。
HLJ—Hailijin deposit; QJD—Qianjiadian deposit; BLS—Baolongshan deposit; DL—Dalin deposit.
图 7 松辽盆地西南部铀矿床分布与布格重力异常关系图(修改自程纪星等, 2001)
Fig. 7 Relationship between the distribution of uranium deposits and bouguer anomalies in the southwestern part of Songliao basin (modified from CHENG et al., 2001)

通常与上覆沉积层存在明显物性差异,为地球物理方法的有效应用提供契机。重磁勘探方法是查明隐伏基底起伏和划分断裂的常用方法。根据区域布格重力异常场数据将松辽盆地南部铀矿集区划分为7个次级构造单元,布格重力场等值线同形扭曲或错断对应深部断裂、岩石组分变化,已探明铀矿床产出在布格重力场数值过渡和等值线发生同形扭曲的位置(图7;封志兵等,2014)。鄂尔多斯盆地国家湾及周边环状重力异常区对应李家河隆起,国家湾铀矿床位于环状重力异常由高值向低值的过渡位置(张伟盟等,2022)。赵宁博等(2017)研究伊犁盆地南缘航磁特征与砂岩型铀矿的关系发现,局部隆起或中酸性岩体侵入会在磁场形态上形成正圆形的正异常,且由于沉积盖层多为弱磁,磁场多为中-低频的磁异常。对于出露地表的构造天窗,富铀岩体可能出露于地表或位于近地表,可利用航空放射性测量资料查明;构造天窗区与翼部地层矿物组合可能有所区别,可利用遥感技术识别这些表征在浅地表的差异。综上所述,充分发挥地球物理攻深找盲的优势,有望大幅提高砂岩型铀矿找矿效率。

5 结论

(1)砂岩型铀矿普遍产出在盆地边缘构造斜坡带/盆地内部隆起翼部或周边。隆起的形成与存在控制砂岩型铀矿成矿有关的地下水补-径-排和沉积相带发育、形成地势差以及伴生断裂沟通深部流体等。

(2)在找矿实践中应将隆起作为关键控矿要素。其中,盆地内部找矿应重点关注被大幅抬升的隆起,而盆地边缘构造斜坡带上需重视微隆起以及基底上覆地层的褶皱。

(3)鉴于砂岩型铀矿与隆起的密切空间关系,有必要精细刻画盆地边缘构造斜坡带和盆地内部的基底起伏以及断裂空间分布,将为砂岩型铀矿找矿靶区的优选提供重要参考。

Acknowledgements:

This study was supported by China National Nuclear Corporation-State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment (East China University of Technology) Joint Innovation Fund Project (Nos. 2023NRE-LH-08 and NRE2021-02), National Natural Science Foundation of China (Nos. U2244205, U2067202 and 42172098), and China Nuclear Geology (Nos. 202311-5 and 202212-8).

参考文献:

包洪平,何登发,王前平,等,2022.鄂尔多斯盆地四大古隆起演化及其油气控藏意义的差异[J].古地理论,24(5): 951-969.

- 蔡建芳,严兆彬,张亮亮,等,2018.内蒙古通辽地区上白垩统姚家组灰色砂体成因及其与铀成矿关系[J].东华理工大学学报(自然科学版),41(4): 328-335.
- 陈奋雄,聂逢君,张成勇,2016a.伊犁盆地南缘中生代构造样式与铀成矿关系[J].地质与勘探,52(3): 480-488.
- 陈奋雄,聂逢君,张成勇,等,2016b.伊犁盆地洪海沟地区西山窑组上段层间氧化带分布特征及其主控因素分析[J].地质科技情报,35(3): 105-111.
- 陈奋雄,聂逢君,张成勇,等,2016c.伊犁盆地南缘洪海沟矿床富大矿体地质特征与成因机制研究[J].地质学报,90(12): 3324-3336.
- 陈正乐,鲁克改,王果,等,2010.准噶尔盆地南缘新生代构造特征及其与砂岩型铀成矿作用初析[J].岩石学报,26(2): 457-470.
- 程纪星,姜义生,2001.浅谈松辽盆地西南部砂岩型铀矿的勘查方向[J].铀矿地质,17(6): 359-364.
- 程银行,张天福,曾威,等,2020.中国北方中生代盆地砂岩型铀超常富集的驱动力[J].大地构造与成矿学,44(4): 590-606.
- 封志兵,聂冰锋,聂逢君,等,2021b.地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展[J].物探与化探,45(5): 1179-1188.
- 封志兵,聂逢君,江丽,等,2014.重力场特征与砂岩型铀矿的关系及地质意义[J].现代地质,28(4): 841-849.
- 封志兵,聂逢君,宁媛丽,等,2022.盆地内部砂岩型铀矿找矿技术的设计与探讨[J].地质学报,96(6): 2217-2229.
- 封志兵,聂逢君,夏菲,等,2021a.砂岩型铀矿的矿体形态特征及其成因探讨[J].铀矿地质,37(6): 981-990.
- 古抗衡,陈祖伊,2010.正向构造对层间氧化带砂岩型铀成矿和定位的控制[J].铀矿地质,26(6): 361-364.
- 韩效忠,吴兆剑,林中湘,等,2023.准噶尔盆地东部构造抬升剥蚀对铀成矿的控制[J].煤炭学报,48(9): 3471-3482.
- 何登发,李德生,童晓光,等,2008.多期叠加盆地古隆起控油规律[J].石油学报,29(4): 475-488.
- 贺锋,刘鑫扬,刘卫红,等,2022.鄂尔多斯盆地西南缘砂岩型铀矿“源—汇”系统研究[J].铀矿地质,38(4): 671-682.
- 黄净白,黄世杰,2005.中国铀资源区域成矿特征[J].铀矿地质,21(3): 129-138.
- 黄少华,李继木,刘章月,等,2022.钱家店凹陷HLJ铀矿带姚家组下段铀的赋存状态及成矿时代[J].铀矿地质,38(4): 631-642.
- 黄世杰,1994.层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据[J].铀矿地质,10(1): 6-13.
- 焦养泉,吴立群,彭云彪,等,2015.中国北方古亚洲构造域中沉积型铀矿形成发育的沉积-构造背景综合分析[J].地学前缘,22(1): 189-205.
- 焦养泉,吴立群,荣辉,等,2022.沉积、成岩与铀成矿:中国砂岩型铀矿研究的创新发现与认知挑战[J].地球科学,47(10): 3580-3602.
- 康世虎,杨建新,刘武生,等,2017.二连盆地中部古河谷砂岩型铀成矿特征及潜力分析[J].铀矿地质,33(4): 206-214.
- 李胜祥,韩效忠,蔡煜琦,等,2006.天山造山带山间盆地砂岩型铀成矿模式及找矿方向探讨[J].矿床地质,25(S1): 241-244.
- 李子颖,刘武生,李伟涛,等,2022.内蒙古二连盆地哈达图砂岩铀矿渗出铀成矿作用[J].中国地质,49(4): 1009-1047.
- 刘波,苗爱生,彭云彪,等,2020.兴蒙地区中-新生代盆地铀成

- 矿特征、机理及其动力学背景研究进展[J]. 地质学报, 94(12): 3689-3711.
- 刘波, 彭云彪, 康世虎, 等, 2018. 二连盆地巴赛齐赛汉组含铀古河谷沉积特征及铀成矿流体动力学[J]. 矿物岩石地球化学通报, 37(2): 316-325.
- 刘持恒, 刘武生, 史清平, 等, 2020. 二连盆地古地貌特征及其对砂岩型铀矿的制约[J]. 铀矿地质, 36(5): 346-353.
- 刘武生, 赵兴齐, 康世虎, 等, 2018. 二连盆地反转构造与砂岩型铀矿成矿作用[J]. 铀矿地质, 34(2): 81-89.
- 卢天军, 刘鑫, 姜山, 等, 2022. 松辽盆地南部晚白垩世沉积演化与铀成矿作用研究[J]. 铀矿地质, 38(4): 607-617.
- 鲁克改, 王国荣, 孙潇, 2019. 塔里木盆地北缘断褶带层间氧化带发育样式及砂岩铀矿找矿潜力[J]. 地质力学学报, 25(1): 115-124.
- 吕永华, 康世虎, 刘武生, 等, 2021. 二连盆地哈达图铀矿床关键控矿要素与成矿模式研究[J]. 铀矿地质, 37(4): 584-592.
- 马永生, 蔡勋育, 李国雄, 2005. 四川盆地普光大型气藏基本特征及成藏富集规律[J]. 地质学报, 79(6): 858-865.
- 聂逢君, 林双幸, 严兆彬, 等, 2010. 尼日尔特吉达地区砂岩中铀的热流体成矿作用[J]. 地球学报, 31(6): 819-831.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 等, 2021. 砂岩型铀矿的“双阶段双模式”成矿作用[J]. 地球学报, 42(6): 823-848.
- 彭云彪, 刘波, 秦彦伟, 等, 2018. 二连盆地川井拗陷构造演化对砂岩型铀矿成矿作用的约束[J]. 地质与勘探, 54(5): 917-928.
- 乔海明, 宋哲, 刘治国, 2016. 吐哈盆地十红滩层间氧化带砂岩型铀矿床的控矿构造及控矿机理探讨[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 39(3): 217-222.
- 秦明宽, 何中波, 刘章月, 等, 2017. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究[J]. 地质论评, 63(5): 1255-1269.
- 权建平, 徐高中, 李卫红, 等, 2006. 构造对吐哈盆地西南部十红滩砂岩型铀矿成矿控制作用的研究[J]. 世界核地质科学, 23(1): 5-11.
- 宋昊, 倪师军, 侯明才, 等, 2016. 新疆伊犁盆地砂岩型铀矿床层间氧化带中粘土矿物特征及与铀矿化关系研究[J]. 地质学报, 90(12): 3352-3366.
- 宋继叶, 2014. 准噶尔盆地基底特征与砂岩型铀矿成矿作用[D]. 北京: 核工业北京地质研究院.
- 王勇, 陈正乐, 刘健, 等, 2006. 伊犁盆地南部新构造特征及其对砂岩型铀矿的控制作用[J]. 大地构造与成矿学, 30(4): 486-494.
- 吴曲波, 陈聪, 杨龙泉, 等, 2021. 二连盆地中部古河道砂岩型铀矿综合地球物理响应特征研究[J]. 地质学报, 95(8): 2521-2536.
- 于文斌, 董清水, 周连永, 等, 2008. 松辽盆地南部断裂反转构造对砂岩型铀矿成矿的作用[J]. 铀矿地质, 24(4): 195-200.
- 于文斌, 董清水, 邹吉斌, 等, 2006. 松辽盆地东南缘地浸砂岩型铀矿成矿条件分析[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 30(4): 543-548, 562.
- 俞初安, 金若时, 李彤, 等, 2023. 鄂尔多斯盆地砂岩型铀矿成矿地质条件和关键控矿要素分析[J]. 地球学报, 44(4): 689-706.
- 张金带, 李子颖, 苏学斌, 等, 2019. 核能矿产资源发展战略研究[J]. 中国工程科学, 21(1): 113-118.
- 张金带, 徐高中, 林锦荣, 等, 2010. 中国北方 6 种新的砂岩型铀矿对铀资源潜力的提示[J]. 中国地质, 37(5): 1434-1449.
- 张伟盟, 彭莉红, 程莎莎, 等, 2022. 基于重力资料的国家湾砂岩型铀矿床成矿地质条件研究[J]. 铀矿地质, 38(5): 979-986.
- 张云, 张天福, 程先钰, 等, 2022. 鄂尔多斯盆地东北部侏罗纪含铀岩系三维地质结构与铀成矿规律浅析[J]. 中国地质, 49(1): 66-80.
- 赵宁博, 付锦, 刘涛, 2017. 伊犁盆地南缘砂岩型铀矿航磁特征分析及信息增强[J]. 地球物理学进展, 32(2): 553-558.
- 赵兴齐, 秦明宽, 范洪海, 等, 2019. 内蒙古二连盆地中部古河道型铀矿床中烃类流体特征与铀成矿关系[J]. 地球学报, 40(3): 405-416.
- 朱日祥, 陈凌, 吴福元, 等, 2011. 华北克拉通破坏的时间、范围与机制[J]. 中国科学: 地球科学, 41(5): 583-592.

References:

- BAO Hongping, HE Dengfa, WANG Qianping, et al., 2022. Four main paleouplifts evolution in Ordos Basin and their differences in significance of oil and gas reservoir control[J]. Journal of Palaeogeography, 24(5): 951-969(in Chinese with English abstract).
- CAI Jianfang, YAN Zhaobin, ZHANG Liangliang, et al., 2018. Relationship Between Grey Sandstone and Uranium Mineralization in Yaojia Formation of Upper Cretaceous in Tongliao, Inner Mongolia[J]. Journal of East China University of Technology(Natural Science), 41(4): 328-335(in Chinese with English abstract).
- CHEN Fenxiong, NIE Fengjun, ZHANG Chengyong, 2016a. Mesozoic structural styles and their relationship with uranium deposits in the southern margin of Yili Basin[J]. Geology and Exploration, 52(3): 480-488(in Chinese with English abstract).
- CHEN Fenxiong, NIE Fengjun, ZHANG Chengyong, et al., 2016b. Distribution characteristics of interlayer oxidation zone and its main controlling factors of upper Xishanyao Formation in Honghaigou area, Yili Basin[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 35(3): 105-111(in Chinese with English abstract).
- CHEN Fenxiong, NIE Fengjun, ZHANG Chengyong, et al., 2016c. Geological characteristics and genetic mechanism of the Honghaigou Uranium Deposit in the southern margin of Yili Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 90(12): 3324-3336(in Chinese with English abstract).
- CHEN Zhengle, LU Kegai, WANG Guo, et al., 2010. Characteristics of Cenozoic structural movements in southern margin of Junggar basin and its relationship to the mineralization of sandstone-type uranium deposits[J]. Acta Petrologica Sinica, 26(2): 457-470(in Chinese with English abstract).
- CHENG Jixing, JIANG Yisheng, 2001. Preliminary discussion on exploration direction of sandstone-type uranium deposits in southwestern part of Songliao basin[J]. Uranium Geology, 17(6): 359-364(in Chinese with English abstract).
- CHENG Yinhang, WANG Shaoyi, ZHANG Tianfu, et al., 2020. Regional sandstone-type uranium mineralization rooted in Oligo-Miocene tectonic inversion in the Songliao basin, NE China[J]. Gondwana Research, 88: 88-105.
- CHENG Yinhang, ZHANG Tianfu, ZENG Wei, et al., 2020.

- Driving forces for sandstone-type uranium super-enrichment in Meso-Cenozoic basins, North China[J]. *Geotectonics and Metallogeny*, 44(4): 590-606(in Chinese with English abstract).
- FENG Zhibing, NIE Bingfeng, NIE Fengjun, et al., 2021b. Application progress of geophysical methods in exploration of sandstone-type uranium deposit[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(5): 1179-1188(in Chinese with English abstract).
- FENG Zhibing, NIE Fengjun, JIANG Li, et al., 2014. Correlation of gravity field characteristics with sandstone-type uranium deposit and its geological significance[J]. *Geoscience*, 28(4), 841-849(in Chinese with English abstract).
- FENG Zhibing, NIE Fengjun, NING Yuanli, et al., 2022. Discussion and design of exploration technology for sandstone-type uranium deposits in the interior of the sedimentary basins[J]. *Acta Geologica Sinica*, 96(6): 2217-2229(in Chinese with English abstract).
- FENG Zhibing, NIE Fengjun, XIA Fei, et al., 2021a. Discussion on the shapes and their genesis of ore body in sandstone-type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 37(6): 981-990(in Chinese with English abstract).
- GU Kangheng, CHEN Zuyi, 2010. The controlling role of positive structures over the metallogenesis and emplacement of inter layer oxidation sandstone type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 26(6): 361-364(in Chinese with English abstract).
- HAN Xiaozhong, WU Zhaojian, LIN Zhongxiang, et al., 2023. Control of tectonic uplift and denudation on uranium mineralization in the eastern Junggar Basin[J]. *Journal of China Coal Society*, 48(9): 3471-3482(in Chinese with English abstract).
- HE Dengfa, LI Desheng, TONG Xiaoguang, et al., 2008. Accumulation and distribution of oil and gas controlled by paleo-uplift in poly-history superimposed basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 29(4): 475-488(in Chinese with English abstract).
- HE Feng, LIU Xinyang, LIU Weihong, et al., 2022. Analysis on source to convergence systems of sandstone type uranium deposit in the southwestern margin of Ordos Basin[J]. *Uranium Geology*, 38(4): 671-682(in Chinese with English abstract).
- HUANG Jingbai, HUANG Shijie, 2005. Regional metallogenic characteristics of China's uranium resources[J]. *Uranium Geology*, 21(3): 129-138(in Chinese with English abstract).
- HUANG Shaohua, LI Jimu, LIU Zhangyue, et al., 2022. Occurrence and mineralization age of uranium ores of the Lower Member of Yaojia Formation from HLJ ore belt in Qianjiadian Sag[J]. *Uranium Geology*, 38(4): 631-642(in Chinese with English abstract).
- HUANG Shijie, 1994. Formation conditions and prospecting criteria for sandstone uranium deposit of interlayered oxidation type[J]. *Uranium Geology*, 10(1): 6-13(in Chinese with English abstract).
- JIAO Yangquan, WU Liqun, PENG Yunbiao, et al., 2015. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China[J]. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189-205(in Chinese with English abstract).
- JIAO Yangquan, WU Liqun, RONG Hui, et al., 2022. Sedimentation, diagenesis and uranium mineralization: Innovative discoveries and cognitive challenges in the study of sandstone-type uranium deposits in China[J]. *Earth Science*, 47(10): 3580-3602(in Chinese with English abstract).
- JIN Ruoshi, MIAO Peisen, SIMA Xianzhang, et al., 2016. Structure styles of Mesozoic-Cenozoic U-bearing rock series in northern China[J]. *Acta Geologica Sinica(English Edition)*, 90(6): 2104-2116.
- KANG Shihu, YANG Jianxin, LIU Wusheng, et al., 2017. Metallogenic characteristics and potential analysis of the sandstone-type uranium deposit in the paleo-valley type uranium deposit in central Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. *Uranium Geology*, 33(4): 206-214(in Chinese with English abstract).
- LI Shengxiang, HAN Zhongshi, CAI Yuqi, et al., 2006. Metallogenic model and prospecting targets for interlayer oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in intermountain basins of the Tianshan orogenic belt[J]. *Mineral Deposit Geology*, 25(S1): 241-244(in Chinese with English abstract).
- LI Ziyang, LIU Wusheng, LI Weitao, et al., 2022. Exudative metallogeny of the Hadatu sandstone-type uranium deposit in the Erlian Basin, Inner Mongolia [J]. *Geology in China*, 49(4): 1009-1047(in Chinese with English abstract).
- LIU Bo, MIAO Aisheng, PENG Yunbiao, et al., 2020. Research advances in uranium metallogenic characteristics, mechanism and dynamic background in the Mesozoic-Cenozoic basins of the Xingmeng area, North China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(12): 3689-3711(in Chinese with English abstract).
- LIU Bo, PENG Yunbiao, KANG Shihu, et al., 2018. Depositional characteristics and uranium metallogenic fluid dynamics of uranium bearing paleo-valley of the Saihan Formation in Basaiqi, Erlian Basin[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 316-325(in Chinese with English abstract).
- LIU Chiheng, LIU Wusheng, SHI Qingping, et al., 2020. The paleogeomorphology feature of Erlian Basin and its constraints on sandstone-type uranium deposits[J]. *Uranium Geology*, 36(5): 346-353(in Chinese with English abstract).
- LIU Wusheng, ZHAO Xingqi, KANG Shihu, et al., 2018. Inversion structure and its relationship with sandstone type uranium metallization in Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 34(2): 81-89(in Chinese with English abstract).
- LU Kegai, WANG Guorong, SUN Xiao, 2019. Interlayered oxidation-zone styles in fault-fold belts of the northern Tarim Basin and its controlling to the formation of sandstone-type uranium deposits[J]. *Journal of Geomechanics*, 25(1): 115-124(in Chinese with English abstract).
- LU Tianjun, LIU Xin, JIANG Shan, et al., 2022. Study on Late Cretaceous sedimentary evolution and uranium mineralization in southern Songliao Basin[J]. *Uranium Geology*, 38(4): 607-617(in Chinese with English abstract).
- LÜ Yonghua, KANG Shihu, LIU Wusheng, et al., 2021. Study on key ore-controlling factors and metallogenic model of Hadadu

- Uranium Deposit in Erlian Basin[J]. *Uranium Geology*, 37(4): 584-592(in Chinese with English abstract).
- MA Yongsheng, CAI Xunyu, LI Guoxiong, 2005. Basic characteristics and concentration of the Puguang Gas Field in the Sichuan Basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 79(6): 858-865(in Chinese with English abstract).
- NIE Fengjun, LIN Shuangxing, YAN Zhaobin, et al., 2010. Hydrothermal Mineralization of Uranium in Sandstone, Tequida, Niger[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 31(6): 819-831(in Chinese with English abstract).
- NIE Fengjun, YAN Zhaobin, XIA Fei, et al., 2021. Two-stage and two-mode Uranium Mineralization for Sandstone-type Uranium Deposits[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(6): 823-848(in Chinese with English abstract).
- PENG Yunbiao, LIU Bo, QIN Yanwei, et al., 2018. Constraints of tectonic evolution on sandstone-type uranium metallogenesis in the Chuanjing Depression, Erlian Basin[J]. *Geology and Exploration*, 54(5): 917-928(in Chinese with English abstract).
- QIAO Haiming, SONG Zhe, LIU Zhiguo, 2016. The ore-controlling structures and ore-controlling mechanism of interlayer oxidation zone sandstone type uranium deposit in Shihongtan of Turpan-Hami Basin[J]. *Journal of East China University of Technology(Natural Science)*, 39(3): 217-222(in Chinese with English abstract).
- QIN Mingkuan, HE Zhongbo, LIU Zhangyue, et al., 2017. Study on metallogenic environments and prospective direction of sandstone type uranium deposits in Junggar Basin[J]. *Geological Review*, 63(5): 1255-1269(in Chinese with English abstract).
- QUAN Jianping, XU Gaozhong, LI Weihong, et al., 2006. Structural controls of Shihongtan sandstone-type uranium deposit in the southwestern Turpan-Hami Basin[J]. *World Nuclear Geoscience*, 23(1): 5-11(in Chinese with English abstract).
- SONG Hao, NI Shijun, HOU Mingcai, et al., 2016. The characteristic of clay minerals in sandstone-type uranium deposit in the Yili Basin, NW China and its relationship with uranium mineralization[J]. *Acta Geologica Sinica*, 90(12): 3352-3366(in Chinese with English abstract).
- SONG Jiye, 2014. Basement characteristics and sandstone type uranium mineralization in the Junggar Basin[D]. Beijing: Beijing Geological Research Institute of Nuclear Industry(in Chinese with English abstract).
- WANG Yong, CHEN Zhengle, LIU Jian, et al., 2006. Neotectonics in southern Yili Basin and its control of sandstone-type uranium deposits[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 30(4): 486-494(in Chinese with English abstract).
- WU Liquan, JIAO Yangquan, ROGER M, et al., 2009. Sedimentological setting of sandstone-type uranium deposits in coal measures on the southwest margin of the Turpan-Hami Basin, China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 36(2-3): 223-237.
- WU Qubo, CHEN Cong, YANG Longquan, et al., 2021. Study of integrated geophysical characteristics of paleo-valley sandstone-type uranium deposits in the middle of the Erenhot basin[J]. *Acta Geologica Sinica*, 95(8): 2521-2536(in Chinese with English abstract).
- YU Rengan, JIN Ruoshi, LI Tong, et al., 2023. Analysis of Metallogenic Condition and Key Ore-controlling Factor of Sandstone-hosted Uranium Deposits in the Ordos Basin[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 44(4): 689-706(in Chinese with English abstract).
- YU Wenbin, DONG Qingshui, ZHOU Lianrong, et al., 2008. Action of reversal fault structure on sandstone type uranium mineralization in the south of Songliao basin[J]. *Uranium Geology*, 24(4): 195-200(in Chinese with English abstract).
- YU Wenbin, DONG Qingshui, ZOU Jibin, et al., 2006. Analysis of Metallogenic Conditions of in-Situ Leachable Sandstone Type Uranium Deposit in the Southeastern Margin of Songliao Basin[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 30(4): 543-548, 562(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jindai, LI Ziying, SU Xuebin, et al., 2019. Development Strategy of Nuclear Energy Mineral Resources[J]. *Strategic Study of CAE*, 21(1): 113-118(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Jindai, XU Gaozhong, LIN Jinrong, et al., 2010. The implication of six kinds of new sandstone-type uranium deposits to uranium resources potential in North China[J]. *Geology in China*, 37(5): 1434-1449(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Weimeng, PENG Lihong, CHENG Shasha, et al., 2022. Study on the metallogenic geological conditions of Guojiawan sandstone type uranium deposit based on gravity data[J]. *Uranium Geology*, 38(5): 979-986(in Chinese with English abstract).
- ZHANG Yun, ZHANG Tianfu, CHENG Xianyu, et al., 2022. A brief analysis on the three-dimensional geological structure and uranium mineralization of Jurassic uranium-bearing rock series in the northeastern Ordos Basin[J]. *Geology of China*, 49(1): 66-80(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Ningbo, FU Jin, LIU Tao, 2017. Aeromagnetic characteristic analysis and information enhancement of sandstone-type uranium deposit in the southern margin of Yili basin[J]. *Progress in Geophysics*, 32(2): 553-558(in Chinese with English abstract).
- ZHAO Xingqi, QIN Mingkuan, FAN Honghai, et al., 2019. Relationship between uranium mineralization and hydrocarbon fluids characteristics in paleo-channel uranium deposits of central Erlian Basin, Inner Mongolia[J]. *Journal of Earth Sciences*, 40(3): 405-416(in Chinese with English abstract).
- ZHU Rixiang, CHEN Ling, WU Fuyuan, et al., 2011. Timing, scale and mechanism of the destruction of the North China Craton[J]. *Science China: Earth Science*, 41(5): 583-592(in Chinese).