

盆地内部砂岩型铀矿找矿技术的设计与探讨



封志兵^{1,2)}, 聂逢君²⁾, 宁媛丽³⁾, 江丽⁴⁾, 夏菲²⁾, 何剑锋¹⁾, 盛洲宁¹⁾

- 1) 东华理工大学江西省放射性地学大数据技术工程实验室,江西南昌,330013;
- 2) 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室,江西南昌,330013;
- 3) 核工业航测遥感中心中核集团铀资源地球物理勘查技术中心(重点实验室),河北石家庄,050002;
- 4) 东华理工大学放射性地质与勘探国防重点学科实验室,江西南昌,330013

内容提要:长期以来,盆地边缘是砂岩型铀矿找矿与勘探的主要区域。然而,近年在盆地内部也探明了多个铀矿床、矿化点,表明盆地内部同样具有良好的铀矿找矿前景。文章剖析了盆地内部砂岩型铀矿的矿床特征,并据此凝练出“大型中-酸性火成岩隆起+隆起区翼部深大断裂”的关键控铀成矿要素。结合砂岩型铀矿成矿理论,设计了一套相适应的找矿方法组合。该找矿方法组合可分为2个步骤:①勘探靶区初筛。根据区域重、磁、放射性、遥感等资料查明盆地内部基底起伏和埋深、识别岩性和划分断裂,将岩性为中-酸性火成岩且发育断裂的隆起区圈定为潜在勘探靶区。结合含矿目的层产出特征、隆起区翼部坡度和隆起区面积等因素来初筛勘探靶区;②勘探靶区优选。在初筛的勘探靶区深大断裂位置沿隆起区方向布置并实施钻探。通过对地下水“补-径-排”体系、含矿目的层供铀和聚铀能力以及氧化-还原带发育情况等的评价来优选勘探靶区,为下一步铀矿勘探工作的布置与实施提供有益指导。该方法充分利用区域地球物理数据和公开可下载的资料,可极大地降低勘探成本。着眼于关键控铀成矿要素,优选相适应的地质、地球物理等方法,可有效提高盆地内部砂岩型铀矿找矿与勘探的效率。

关键词:砂岩型铀矿;盆地内部;隆起区;地球物理方法;中-酸性火成岩

砂岩型铀矿地浸开采成本低且环境友好,已成为当今我国铀矿找矿与勘探的主要类型(陈戴生等,2006;张金带等,2016,2019)。近30年来,已在我国北方伊犁盆地、二连盆地、鄂尔多斯盆地等地相继探明了一系列大-中型砂岩型铀矿床(Yang Xiaoyong et al., 2009; 聂逢君等, 2010; 刘波等, 2017; 吴柏林等, 2017; 俞仍安等, 2020)。这些铀矿床多产出在盆地边缘的构造斜坡带上或邻近的古河道中(朱西养, 2005; 聂逢君等, 2010; Hou Baohong et al., 2017; 吕永华等, 2021)。长期以来,盆地边缘是砂岩型铀矿找矿与勘探的主要区域。时至今日,我国北方多数沉积盆地边缘已难以圈定新的勘探靶区,极大地制约了我国今后砂岩型铀矿

找矿与勘探工作的可持续发展。值得关注的是,在松辽盆地西南部发现的钱家店、宝龙山等铀矿床都产于盆地内部,而非产于盆地边缘(于文斌等,2006; 陈晓林等, 2008; Huang Shaohua et al., 2021)。另外,在二连盆地、准噶尔盆地等地的内部隆起区也钻遇到一批工业孔、矿化孔(黄少华等,2016, 2018; 秦明宽等, 2017; 刘波等, 2018)。这些实际勘探成果表明,盆地内部隆起区也具有良好的铀矿找矿前景。

与盆地边缘相比,盆地内部能够表征于地表的找矿信息甚少。将盆地边缘的砂岩型铀矿找矿方法应用于盆地内部存在诸多不适用方面。目前,国内外尚未形成一套适用于盆地内部的砂岩型铀矿找矿

注:本文为国家自然科学基金项目(编号U2067202, 41862010, 42172098),江西省自然科学基金项目(编号2020BAB213017),江西省放射性地学大数据技术工程实验室开放基金项目(编号JELRGBDT202007),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(编号NRE1809)和中国铀业有限公司-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NRE2021-02)资助的成果。收稿日期:2021-05-18;改回日期:2021-12-14;网络发表日期:2022-05-17;责任编辑:毕献武;责任编辑:潘静。

作者简介:封志兵,男,1989年生。博士,讲师,从事砂岩型铀矿成矿作用与探测技术研究工作。E-mail: zbfengj@163.com。
通讯作者:聂逢君,男,1962年生。博士(后),教授,从事砂岩型铀矿成矿作用研究工作。E-mail: niefj@263.net。

引用本文:封志兵,聂逢君,宁媛丽,江丽,夏菲,何剑锋,盛洲宁. 2022. 盆地内部砂岩型铀矿找矿技术的设计与探讨. 地质学报, 96(6): 2217~2229, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022042.

Feng Zhibing, Nie Fengjun, Ning Yuanli, Jiang Li, Xia Fei, He Jianfeng, Sheng Zhouning. 2022. Discussion and design of exploration technology for sandstone-type uranium deposits in the interior of the sedimentary basins. Acta Geologica Sinica, 96(6): 2217~2229.

方法。本文以盆地内部隆起区地质体为对象,着眼于关键控铀成矿要素,优选相适应的地质、地球物理等方法,形成一套系统的找矿方法组合。研究成果可为盆地内部砂岩型铀矿找矿与勘探提供有益借鉴。

1 盆地内部砂岩型铀矿成矿

1.1 盆地边缘铀成矿

根据传统的砂岩型铀矿成矿理论,位于盆地边缘的富铀岩体长期裸露于地表而遭受风化剥蚀,富铀岩体中的铀被氧化而溶于大气降水,形成含铀-氧流体(聂逢君等, 2010; Xue Chunji et al., 2010)。含铀-氧流体在重力驱动作用下渗入到地层中,进而发生层间氧化、潜水氧化作用(黄世杰, 1994; 孙泽轩等, 2006)。同时,含铀-氧流体在地层中运移时可能进一步萃取地层中的铀。氧化态的铀(U^{6+})在氧化-还原过渡带被有机质还原(焦养泉等, 2015)。因还原态的铀(U^{4+})不易溶于水而沉淀,故发生铀的聚集成矿(Goldhaber et al., 1978; Cai Chunfang et al., 2007; 黄净白等, 2007; 吴柏林等, 2017)。目前,已探明的大多数砂岩型铀矿位于盆地边缘。例如,伊犁盆地南缘、吐哈盆地西南缘和鄂尔多斯盆地北缘探明的砂岩型铀矿位于构造斜坡带,二连盆地探明的砂岩型铀矿位于巴音宝力格隆起边缘的古河道中(朱西养, 2005; 刘波等, 2016, 2017; Bonnelli et al., 2017; 聂逢君等, 2018)。研究表明,砂岩型铀矿多在盆地边缘探明的主要原因在于:① 盆地边缘产出大面积富铀岩体。富铀岩体长期经受风化剥蚀,淋滤出的铀为成矿提供丰富的铀源(聂逢君等, 2010);② 盆地边缘构造斜坡带存在地势差,为含铀-氧流体向地层中渗入提供驱动力(冯世荣, 1997);③ 盆地边缘多堆积粗粒砂体,良好的孔渗性是含铀-氧流体运移的有利通道(焦养泉等, 2015);④ 盆地边缘上覆沉积层埋深较浅,铀矿的勘探和采治成本相对低廉。

1.2 盆地内部典型铀矿与成矿模式

近年来,勘探部门在盆地内部开展了砂岩型铀矿的找矿探索。如前文述及,已在松辽盆地西南部宝龙山构造天窗区和盆地北部大庆长垣南端、准噶尔盆地东部大庆沟隆起区、二连盆地苏尼特隆起区等的翼部成功探明了一批铀矿床和铀矿化点(于文斌等, 2006; Jin Ruoshi et al., 2016; 秦明宽等, 2017; 刘波等, 2018; 张超等, 2021)。

松辽盆地西南部钱家店、宝龙山、大林等铀矿床、矿化点围绕盆地内部宝龙山构造天窗集中产出

(于文斌等, 2006; 蔡建芳等, 2018)。其基底岩性主要为晚古生代浅变质岩、花岗岩,中生代富铀酸性火山岩、花岗岩(罗毅等, 2012)。因含矿目的层及邻近层位的碎屑物主要来自盆地南缘和盆地内部局部隆起,因此这些沉积地层本身也富含铀(于文斌等, 2006; 蔡建芳等, 2018)。在晚白垩世末期构造反转作用驱使下,区内形成局部隆起,历经长期的风化剥蚀而形成宝龙山构造天窗(于文斌等, 2006; 高玉友等, 2008; 图 1a)。期间,被剥蚀的隆起区晚白垩世沉积地层可为铀成矿提供一定量的铀源(于文斌等, 2006)。矿集区以广泛发育深切基底的区域、局部断裂为典型特征,甚至铀矿钻孔中揭露大量辉绿岩脉(聂逢君等, 2017; 颜新林, 2018)。目前,学者对该矿集区断裂与铀成矿之间的关系的认识主要有:① 作为地下水的排泄区,构建有利于铀成矿的补-径-排体系(高玉友, 2008);② 作为深部烃类流体的输运通道,为铀成矿提供烃类还原介质(罗毅等, 2012);③ 作为深部热流体的输运通道,热流体叠加改造早期形成的铀矿(聂逢君等, 2010, 2017)。

准噶尔盆地东部大庆沟铀矿产于帐篷沟背斜翼部的中侏罗统西山窑组煤系地层中。在临近铀矿体的低地势处发育深切基底的断裂(秦明宽等, 2017)。研究表明,大庆沟铀矿的形成历经 2 个阶段,即中侏罗世西山窑期沉积预富集、后期大庆沟背斜隆升背景下花岗岩基底和上覆地层因被剥蚀而淋滤出的铀引发的叠加富集成矿(秦明宽等, 2017; 图 1b)。期间,花岗岩基底和上覆沉积地层都为大庆沟铀矿的形成提供铀源。二连盆地已探明的系列砂岩型铀矿产于靠近巴音宝力格隆起的区域,但近年勘探部门在盆地内部苏尼特隆起附近钻遇到多个工业孔,其含矿砂岩为冲积扇扇根部位的混杂砾岩、含砾泥岩。另外,盆地边缘的局部隆起可能会改变原有水动力格局而影响铀成矿。刘波等(2018)指出二连盆地西部巴-赛-齐古河道中塔木钦突起改变了含铀-氧流体的流向,在一定程度上控制着巴彦乌拉、赛汉高毕等铀矿床的形成。

综上所述,盆地内部砂岩型铀矿成矿模式可归纳为:在构造挤压应力作用下,盆地内部形成局部隆起。高地势的隆起区和上覆地层遭受风化剥蚀,为隆起区翼部提供物源和铀源。大气降水淋滤隆起区岩石中的铀而形成含铀-氧流体。在流向低地势的地层中时,萃取沉积地层中的铀并发生层间、潜水氧化作用,铀在氧化-还原过渡带位置聚集成矿。

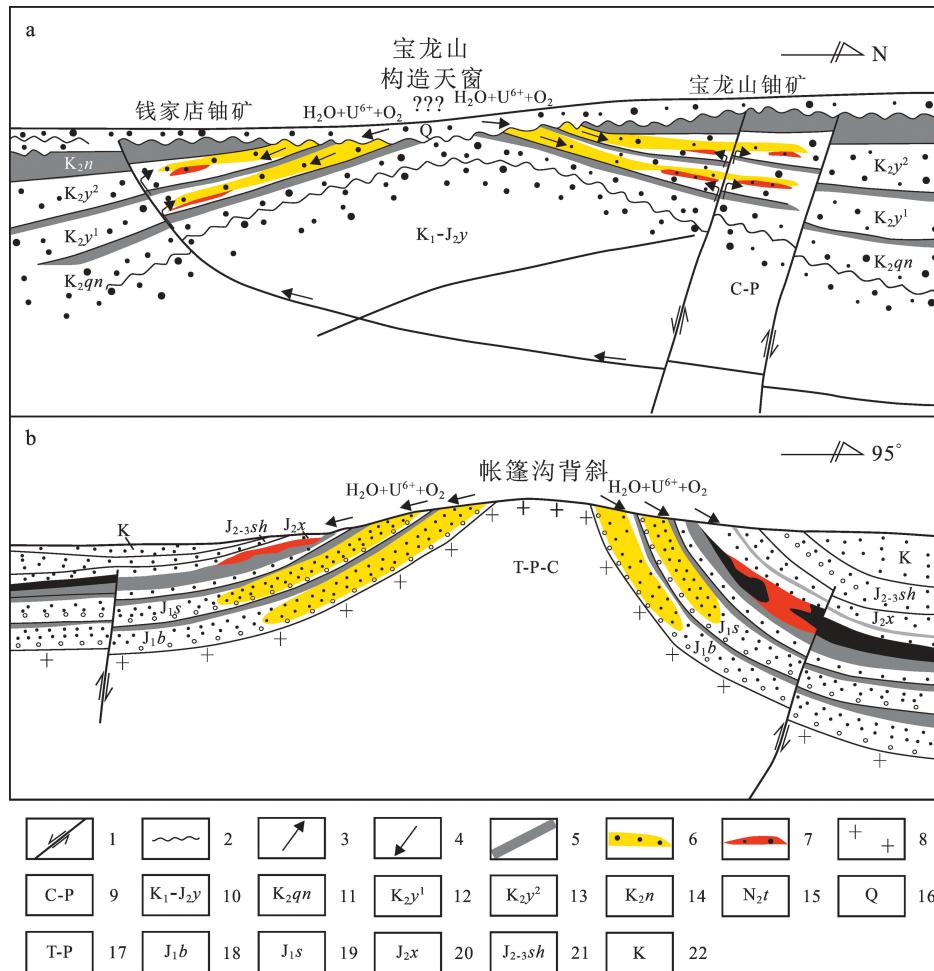


图1 盆地内部砂岩型铀矿成矿模式

Fig. 1 Metallogenic models for sandstone-type uranium deposit in the margin and interior of the sedimentary basins
(a)—松辽盆地西南部钱家店—架玛吐地区砂岩型铀矿成矿模式(据高玉友等, 2008);(b)—准噶尔东部大庆沟砂岩型铀矿成矿模式(修改自秦明宽等, 2017);1—断裂;2—不整合面;3—还原流体流向;4—含铀-氧流体流向;5—泥岩隔水层;6—层间氧化带;7—铀矿体;8—花岗岩;9—石炭系—二叠系;10—下白垩统—上侏罗统义县组;11—上白垩统青山口组;12—上白垩统姚家组下段;13—上白垩统姚家组上段;14—上白垩统嫩江组;15—上新统泰康组;16—第四系;17—二叠系—三叠系;18—中—下侏罗统八道湾组;19—中—下侏罗统水西沟群;20—中侏罗统西山窑组;21—中—上侏罗统石树沟组;22—白垩系

(a)—Metallogenic model for sandstone-type uranium deposit of the Qianjiadian-Jiamatu area in the southwest of the Songliao basin (after Gao Yuyou et al., 2008); (b)—metallogenic model for sandstone-type uranium deposit of the Daqinggou area in the east of the Junggar basin (modified after Qin Mingkuan et al., 2017); 1—faults; 2—unconformity; 3—flow direction of hydrocarbon; 4—flow direction of U-O-bearing fluid; 5—mudstone; 6—interlayer oxidation zone; 7—uranium ore body; 8—granite; 9—Carboniferous-Permian; 10—the Yixian Formation of Lower Cretaceous-Upper Jurassic; 11—the Qingshankou Formation of Upper Cretaceous; 12—the lower member of Yaojia Formation of Upper Cretaceous; 13—the upper member of Yaojia Formation of Upper Cretaceous; 14—the Nenjiang Formation of Upper Cretaceous; 15—the Taikang Formation of Pliocene; 16—Quaternary; 17—Permian-Triassic; 18—the Badaowan Formation of Middle-Lower Jurassic; 19—the Shuixigou Group of Middle-Lower Jurassic; 20—the Xishanyao Formation of Middle Jurassic; 21—the Shishugou Formation of Middle-Upper Jurassic; 22—Cretaceous

1.3 盆地内部关键控铀成矿要素

与盆地边缘对比可知, 盆地内部隆起区也具备类似于盆地边缘有利铀成矿的条件。首先, 盆地内部隆起与邻近区域存在地势差, 可为含铀-氧流体向地层中渗入提供驱动力。其次, 盆地内部隆起区在历史时期也可能经历风化剥蚀, 为铀成矿提供物源、铀源。

隆起包括与邻近区域存在地势差的地表隆起(图2a)和被沉积地层所覆盖的隐伏隆起(图2b)。其中, 因地表隆起与邻近区域存在地势差, 地势高的地质体(沉积地层、基底岩石)易遭受风化剥蚀, 促发铀的聚集成矿; 隐伏隆起被后期沉积地层所覆盖, 与邻近区域少有或无地势差。因其在历史时期也曾暴露于地表, 发生过铀的淋滤和迁移, 其促发的铀成矿

作用发生在上覆地层堆积之前。有研究表明,各类型岩石的平均铀含量存在一定差异,自高到低依次为:花岗岩、火山岩、(超)基性岩和变质岩(吴慧山,1998)。因此,中-酸性火成岩,尤其是花岗岩是铀成矿所需的首选铀源。伊犁盆地南部的察布查尔山、二连盆地西部的巴音宝力格隆起的富铀岩体大面积出露地表,分别为伊犁盆地南缘构造斜坡带、二连盆地巴-赛-齐古河道内系列铀矿床的集中产出提供丰富的铀源(朱西养,2005; 秦明宽等,2009; Bonnelli et al., 2017)。事实证明,隆起区面积越大,可遭受风化的富铀岩体的面积则越大,对邻近区域可能的铀供给量也越大,故越有利于铀成矿(吴仁贵等,2018)。另外,在构造活动驱使下,盆地内部局部隆

升的同时,往往伴随着深大断裂的发育。同样,在盆地边缘探明的铀矿床及附近也多有断裂发育(陈戴生等,2014)。尽管学者们对断裂与铀成矿关系的认识尚不统一,但都认同铀矿区断裂的广泛发育对铀成矿是有利的。

为切实提高找矿方法的实用性,还需考虑盆地内部隆起区可能存在的不利于铀成矿的因素:① 盆地内部隆起区遭受剥蚀的范围和时长往往小于盆地边缘,隆起区翼部接受隆起区铀的供给可能有限;② 历史时期盆地内部多是汇水中心,含矿目的层的埋藏深度可能较大;③ 盆地内部多发育湖相泥岩,发育具有较大规模的辫状河相、辫状河三角洲相沉积砂体的可能性相对小。然而,形成砂岩型铀矿的铀

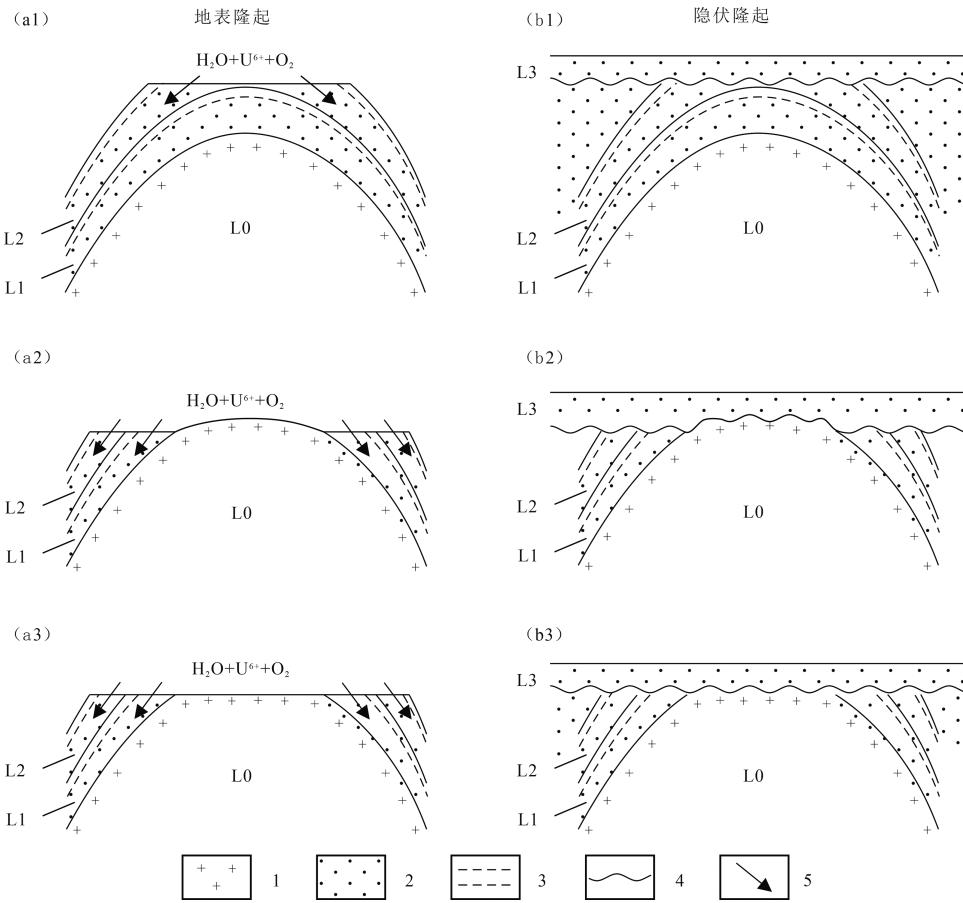


图 2 沉积盆地内部隆起样式

Fig. 2 Styles of uplift in the interior of the sedimentary basins

(a1)—地表隆起:沉积地层被剥蚀;(a2)—地表隆起:沉积地层和局部花岗岩被剥蚀;(a3)—地表隆起:沉积地层和花岗岩被剥蚀;(b1)—隐伏隆起:历史时期沉积地层剥蚀;(b2)—隐伏隆起:历史时期沉积地层和局部花岗岩被剥蚀;(b3)—隐伏隆起:历史时期沉积地层和花岗岩被剥蚀;1—花岗岩;2—砂岩;3—泥岩;4—不整合接触;5—含铀-氧流体流向;L0—花岗岩基底;L1, L2—沉积地层;L3—披覆地层
 (a1)—Surface uplift: sedimentary strata were denuded;(a2)—surface uplift: sedimentary strata and granites were partially denuded;(a3)—surface uplift: sedimentary strata and granites were denuded;(b1)—concealed uplift: sedimentary strata were denuded over the historical period;(b2)—concealed uplift: sedimentary strata and local granites were denuded over the historical period;(b3)—concealed uplift: sedimentary strata and granites were denuded over the historical period;1—granite;2—sandstone;3—mudstone;4—unconformity;5—flow direction of U-O-bearing fluid;L0—granite basement;L1, L2—sedimentary strata;L3—overlying strata

源可以来自于蚀源区,也可以来自含矿目的层及上覆沉积层本身(焦养泉等,2015)。在隆起区岩石可能存在铀源供给不足的情况下,沉积地层自身萃取铀供给铀成矿显得尤为重要。因我国北方沉积盆地曾经历复杂的构造演化历史,盆地内部多发生构造反转而形成局部隆起(封志兵等,2013;焦养泉等,2015; Feng Zhibing et al., 2017; 刘武生等, 2018; Cheng Yinhang et al., 2020),隆起区含矿目的层因被抬升而减小埋藏深度。沉积盆地在形成演化过程中,盆地内部不同区域并非均衡发展,盆地内部也可能发育有利于铀成矿的辫状河、辫状河三角洲沉积的砂体。

基于上述讨论,将“大型中-酸火成岩隆起+隆起区翼部深大断裂”作为盆地内部关键控铀成矿要素。另外,地下水补-径-排体系、含矿目的层及邻近层位沉积特征、沉积相及其自身含铀量等也需要得到足够关注。

2 盆地内部砂岩型铀矿找矿思路

在盆地边缘开展砂岩型铀矿找矿与勘探工作,需要重点关注蚀源区所处位置、历史时期蚀源区及附近至矿流体的流向和沉积地层的发育情况,其大致流程为:①根据航空放射性测量资料、地面岩石铀含量和铀的浸出率等来查找盆地边缘的富铀岩体。根据富铀岩体的面积和铀的浸出率大致评估该区域铀成矿潜力,确定潜在勘探靶区;②根据潜在勘探靶区历史时期和现今至矿流体的流向等,结合现有地质和地球物理资料,大致圈定勘探靶区;③在勘探靶区实施大量钻探工作,结合地球物理测井,达到勘探铀矿和计算铀资源量的目的。

以“大型中-酸火成岩隆起+隆起区翼部深大断裂”的关键控铀成矿要素为准则,设计盆地内部砂岩型铀矿找矿方法。在盆地内部查找隆起区相当于在盆地边缘查找蚀源区,是盆地内部砂岩型铀矿找矿的第一步。在盆地边缘铀矿勘探中,需要重点关注地下水“补-径-排”体系、含矿目的层的聚铀能力以及氧化-还原带的发育情况等要素(聂逢君等,2010;陈戴生等,2014)。其中,含矿目的层的抬升剥蚀及其与上覆地层存在的沉积间断是含铀-氧流体的渗入区,结构疏松且联通性好的砂岩有利地下水的径流,相对低地势位置断裂的存在可作为地下水的排泄区,据此开展地下水“补-径-排”体系评价。放射性测井数据可直观地展示是否发生铀聚集;在盆地内部隆起区供铀能力可能有限的情况下,含矿目的层黄色-氧化砂岩铀的浸出和灰色-还原砂岩的

还原能力需要得到足够重视,据此开展含矿目的层供铀和聚铀能力评价;倘若隆起区曾有含铀-氧流体渗入到低地势地层的事件发生,地层中从补给区(隆起区)到排泄区(断裂)氧化砂岩占比会降低,而灰色-还原砂岩占比会增加,可据此评价含矿目的层氧化-还原带发育情况。

根据上述讨论,设计盆地内部砂岩型铀矿找矿与勘探的大致流程为:①勘探靶区初筛。查明盆地基底起伏和埋深、识别岩性和断裂。将岩性为中-酸火成岩且发育断裂的隆起区圈定为潜在勘探靶区,并结合隆起区出露面积和翼部坡度、附近含矿目的层发育情况来初筛勘探靶区。②勘探靶区优选。在初筛的勘探靶区深大断裂位置沿隆起区方向布置并实施钻探。通过综合分析钻孔岩芯、地球物理测井等资料来优选勘探靶区。③铀矿勘探。根据上述工作成果,结合砂岩型铀矿成矿理论,部署并实施钻探工作(图3)。因步骤3的工作内容与盆地边缘的步骤3基本一致,本文重点讨论步骤1和2的详细实施过程。需要强调的是,铀是一种活泼且易聚易散的元素(吴柏林等,2017)。砂岩型铀矿的成矿条件多变,需根据当地实际地质条件优选相适应的方法组合。

3 盆地内部勘探靶区初筛

3.1 盆地内部隆起区产出特征的解析

3.1.1 盆地内部关键控铀成矿要素的物、遥资料解译

航空放射性测量、遥感技术是硬岩型铀矿找矿的常用手段,主要用于查找富铀岩体、识别矿物蚀变和划分区域断裂等(袁桂琴等,2011)。这些方法多是获取浅地表的地质信息,但盆地内部大部区域覆盖厚层沉积层,限制了深部成矿信息的获取。因地表隆起与邻近区域存在高程差,有利于遥感技术的识别;地表隆起区基底富铀岩体往往裸露于地表或位于近地表,也可利用航空放射性测量数据查明。然而,对于被沉积地层所覆盖的隐伏隆起,则需考虑运用一些具有深部探测优势的方法。对于较大区域的深部探测,重磁勘探方法是首选。

重磁勘探方法是查明深部基底起伏和划分断裂的常用方法(王亮等,2009;李成立等,2011)。近年来,区域重磁数据在查明砂岩型铀矿找矿与勘探中也愈加得到重视(封志兵等,2014,2021;马小雷等,2016;郭阳阳,2019;刘燕戎等,2021)。封志兵等(2014)提出已探明的砂岩型铀矿多位于我国

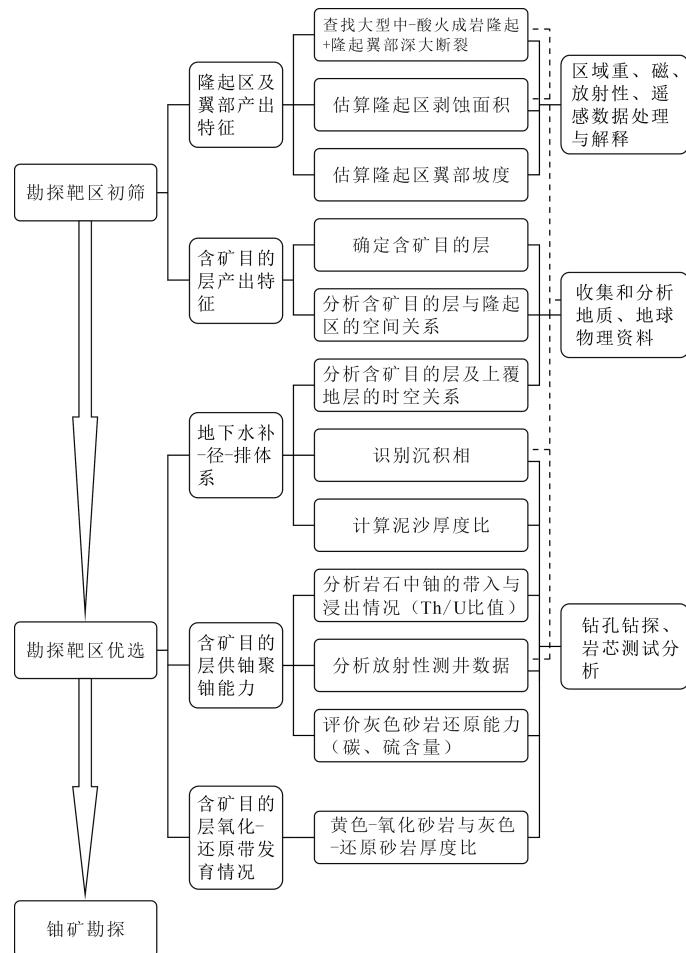


图 3 盆地内部砂岩型铀矿找矿技术设计思路

Fig. 3 Design ideas on exploration technology for sandstone-type uranium deposit in the interior of the sedimentary basins

布格重力异常场的中值区,反映了自中—新生代以来区域构造演化对铀成矿的控制作用;并以松辽盆地西南部为例,宝龙山构造天窗位于布格重力异常高值区,地下断裂、岩石组分变化使布格重力异常等值线产生同形扭曲或错断现象,进而阐明区域重力场资料能够识别基底岩性、查明基底埋深以及断裂展布等控铀成矿要素。马小雷等(2016)、郭阳阳(2019)分别对鄂尔多斯盆地西南部、二连盆地马尼特坳陷的重磁数据进行处理和解译,揭示了铀矿点的分布与重磁场的时空关系,并划分了铀矿区的断裂和构造单元。刘燕戌等(2021)利用松辽盆地西部区域重磁资料分析了断裂、背斜、岩浆岩等找矿标志,并圈定找矿远景区。

对区域重、磁、放射性和遥感数据进行数据处理和解译,可以查明盆地内部基底起伏和埋深、识别岩性和划分断裂分布等(袁桂琴等, 2011; 封忠兵等, 2014; 刘燕戌等, 2021)。其中,对区域重磁数据处理和解释的基本方法有:在盆地内部不同类型岩石

物性(密度、磁性)参数的约束下,对重磁数据进行位场分离处理,以获得区域重力异常数据、局部重力异常数据、区域磁异常数据、局部磁力异常数据并成图。经过解析延拓、不同方向的水平一阶导数等转换技术计算后的数据生成基础平面图件。对分离出的重力异常场数据进行反演,以获得盆地基底起伏形态和埋深等资料。将不同类型岩石的密度和磁性与所得的基础平面图件进行对比分析来识别基底岩性。一般情况下,密度大、磁性弱的为变质岩;密度小、磁性强的为花岗岩;密度大、磁性强的为(超)基性岩。对重力数据进行归一化总水平导数垂向导数计算并成图,根据极大值连线、极大值连线的错段初步划分可能存在的断裂;利用化极磁力异常垂向一阶导数和垂向一阶导数的正、负值的分布来进一步确定断裂。在此基础上,结合重磁基础平面图件来最终确定断裂。结合已有地质-地球物理资料,详细查明中-酸性火成岩隆起及附近断裂的空间展布,划分研究区的断裂构造体系。根据盆地内部关键控铀

成矿因素“大型中-酸火成岩隆起+隆起翼部深大断裂”来圈定潜在勘探靶区。

3.1.2 盆地内部隆起区翼部坡度的估算

研究表明, 坡度在 3%~5% 时, 对铀成矿有利 (Берриман, 1995)。隆起区翼部坡度大小决定表生成矿流体的水力坡度。水力坡度大, 地下水径流强度大, 有利于铀的活化迁移, 但不利于铀的沉淀富集; 水力坡度小, 地下水径流强度低, 不利于成矿流体向深部迁移(冯世荣, 1997)。因含矿目的层的坡度往往与基底隆起坡度相近, 故隆起坡度是勘探靶区初筛的权衡因素之一。具体估算方法如下:

将隆起区视为锥形体, 并假定隆起区顶部为相对平坦地形。根据重力数据反演得到的盆地基底起伏形态和埋深结果, 读取盆地内部基底隆起区的顶点埋深 h_1 和基底底部埋深 h_2 , 计算二者的高差 Δh , 计算公式见(1)式。读取二者之间的距离, 即母线 l_1 。在此基础上, 计算隆起区的坡度 i , 计算公式见(2)式(图 4)。

图 4 盆地内部隆起区坡度估算示意图

Fig. 4 Sketch diagram of slope calculation of upwelling area in interior of the basin

$$\Delta h = h_1 - h_2 \quad (1)$$

$$i = (\Delta h / l_1) \times 100\% \quad (2)$$

3.1.3 盆地内部隆起区剥蚀面积的估算

前已述及, 隆起区面积大小在一定程度上决定了其对邻近区域供铀能力(吴仁贵等, 2018)。因此, 隆起区剥蚀面积是勘探靶区初筛的权衡因素之一。具体估算方法如下:

同样将隆起区视为锥形体, 并假定隆起区顶部为相对平坦地形。测得隆起区顶部的半径 r , 估算隆起区顶部的面积为 $S = \pi r^2$ 。一般情况下, 隆起区顶部面积越大, 隆起区地层剥蚀面积也越大。

3.2 含矿目的层产出特征的解析

3.2.1 含矿目的层的确定

造山运动促发各产铀盆地铀成矿作用的发生(邓军等, 2005; 赵凤民, 2005; 王勇等, 2006; 焦养泉等, 2015; 刘武生等, 2018; Cheng Yinhang et al., 2020)。然而, 由于我国北方各产铀盆地所经历的构造事件不同, 致使含矿目的层具有明显分区性。位于我国西北、东北地区的产铀盆地的含矿目的层分别为侏罗系、白垩系地层, 而位于我国中北部的产铀盆地的含矿目的层则兼顾侏罗系和白垩系地层(程银行等, 2020; 刘波等, 2020; 朱强等, 2020)。目前, 我国绝大多数沉积盆地已开展了一定的铀矿找矿与勘探工作, 确定了含矿目的层(表 1)。对于少数尚未确定含矿目的层的沉积盆地, 因相邻的沉积盆地所经历构造演化历史相近, 其含矿目的层与邻近的沉积盆地基本一致。尽管这些产铀盆地的含矿目的层是由盆地边缘铀矿勘探确定的, 但由于驱使盆地内部隆起的形成与引起盆地边缘抬升的构造事件基本一致, 二者的含矿目的层也基本一致。

表 1 我国北方主要产铀盆地含矿目的层信息(据朱西养, 2005; Feng Zhibing et al., 2017; 刘波等, 2020)

Table 1 Ore-bearing target strata information of typical sandstone-hosted uranium deposits in North China
(after Zhu Xiyang, 2005; Feng Zhibing et al., 2017; Liu Bo et al., 2020)

分区	所属盆地	矿床/矿化点	目的层形成时代	主要含矿目的层	沉积相
西北区	伊犁盆地	蒙其古尔 洪海沟	中侏罗世 早侏罗世	西山窑组、三工河组 西山窑组、三工河组	辫状河三角洲 辫状河三角洲
	吐哈盆地	十红滩	中侏罗世	西山窑组	辫状河、辫状河三角洲
中北区	巴音戈壁盆地	塔木素	早白垩世	巴音戈壁组	扇三角洲
	鄂尔多斯盆地	东胜	晚侏罗世	直罗组	辫状河
		大营 塔然高勒	晚侏罗世 早白垩世	直罗组 洛河组	辫状河三角洲 风成沉积
东北区	二连盆地	巴彦乌拉 哈达图 赛罕高毕	早白垩世 早白垩世 早白垩世	赛汉组 赛汉组 赛汉组	辫状河、扇三角洲 辫状河 辫状河、扇三角洲
		钱家店 宝龙山 西部斜坡、大庆长垣	早、晚白垩世 晚白垩世 晚白垩世	泉头组、姚家组 姚家组 四方台组	辫状河 辫状河 曲流河

3.2.2 含矿目的层与隆起区的空间关系

收集盆地内部各隆起区及附近的地层资料,确定含矿目的层在各隆起区及附近的顶底埋深情况。与其邻近隆起区的埋深对比,倘若含矿目的层的底部埋深高于隆起区顶部埋深,则隆起区不能为含矿目的层提供物源、铀源,认为该区成矿潜力小。反之,则认为具有一定的成矿潜力。

4 勘探靶区优选

在初筛的勘探靶区深大断裂位置沿隆起区方向布置并实施钻探若干,获取岩芯并进行地质编录,开展地球物理测井及地质解译工作。通过综合分析以下要素来优选勘探靶区。另外,还需要特别注意油田、煤炭等勘探部门钻孔(包括地球物理测井)、地震等资料的收集和综合应用。

4.1 地下水“补-径-排”体系评价

含矿目的层与上覆地层的接触关系会影响地下水的渗入,进而影响铀的聚集成矿(封志兵等,2013)。已探明的砂岩型铀矿的含矿目的层往往与上覆地层不整合接触,且存在剥蚀现象。沉积间断的存在有利于含铀-氧流体渗入到含矿目的层中,发生潜水氧化作用,形成铀的富集(聂逢君等,2010;焦养泉等,2015)。砂岩型铀矿的聚集成矿是一个缓慢渐进的过程(吴柏林等,2017)。沉积间断持续的时间越长,含铀-氧流体有更充足时间聚集成矿。

分析收集的地震、钻孔等资料,以了解盆地内部隆起翼部地层发育情况,尤其是含矿目的层与其上覆地层的相互关系。倘若含矿目的层与上覆地层存在长时间沉积间断,则有利于铀成矿;反之,则不利于铀成矿。鉴于隐伏隆起在后期被沉积地层披覆而使铀的聚集中止,需要了解披覆地层与被抬升地层最上段的形成时间间隔,即地层 L2 和地层 L3 形成时间的间隔(图 2)。同样,二者间隔时间越长,越有利于铀成矿。

4.1.2 沉积相识别

根据钻孔岩芯的地质编录和测井曲线解译结果,结合沉积学原理,确定含矿目的层的沉积相并分析沉积相序的垂向变化。目前,已探明的砂岩型铀矿多赋存在辫状河、辫状河三角洲相地层中(陈戴生等,2006; Zhang Xin et al., 2018; 朱强等,2019; 表 1)。这是因为上述 2 类沉积地层的砂体联通性较好,有利于至矿流体在地层中的流动。与之相比,曲流河相沉积的砂体规模不大且联通性较差,不利

于铀成矿。截至目前,已探明的(超)大型铀矿床的含矿砂体具有厚度较大且空间展布稳定的特点。因此,需要结合收集的钻孔和地震资料,大致判断含矿目的层和赋矿砂体的空间展布情况。

4.1.3 泥砂厚度比计算

根据砂岩型铀矿成矿理论,砂岩型铀矿的形成需要有较稳定的泥-砂-泥互层结构(陈戴生等,2006)。泥岩作为顶、底板控制至矿流体在含矿目的层中运移(陈戴生等,2006)。因此,在对含矿目的层岩芯开展地质编录时,需要识别泥岩、砂岩并测量其厚度,计算泥砂厚度比。根据实际勘探经验,含矿目的层泥砂厚度比在 0.5~0.7 之间时最有利于铀成矿。

4.2 含矿目的层供铀和聚铀能力评价

4.2.1 岩石中铀的带入与浸出分析

岩石在遭受风化剥蚀时,其中的铀因被氧化而溶于大气降水并被浸出,但岩石中的钍在氧化、还原态都不易溶于大气降水(郭福生等,1997)。因此,可以通过测量砂岩中钍(Th)、铀(U)元素含量,并计算二者的比值来判断砂岩中铀的带入和浸出。砂岩在未发生铀的带入和浸出时, Th/U 比值约为 4(郭福生等,1997)。铀的带入会使 Th/U 比值减小,而铀的浸出会使 Th/U 比值增大。

(1)采取含矿目的层灰色-还原砂岩样品若干件,测量样品的 Th 和 U 元素的含量并计算 Th/U 比值,再求平均值。在灰色砂岩中, Th/U 比值越小,表明铀的带入量越大,越有利于铀成矿。

(2)采取含矿目的层黄色-氧化砂岩样品若干件,测量样品的 Th 和 U 元素的含量并计算 Th/U 比值,再求平均值。在黄色-氧化砂岩中, Th/U 比值越大,表明铀的浸出量越大,越有利于铀成矿。

4.2.2 放射性测井数据分析

放射性测井曲线可以直接指示钻孔位置是否存在放射性异常,反映初筛的勘探靶区是否曾发生过铀的聚集(王卫国等,2010; 张成勇等,2010)。对放射性测井数据进行分析,倘若含矿目的层砂岩中出现高于本底值 2 倍及以上且厚度大于 0.5 m 的放射性异常,则可视为该区曾发生过铀的聚集(黄笑,2017)。放射性异常段厚度越大、异常值越高,说明发生的铀聚集作用越强烈。倘若铀异常仅出现在泥岩中,可能是泥岩在沉积期发生铀的预富集导致。

4.2.3 灰色砂岩还原能力评价

有机质作为还原介质,在砂岩型铀矿成矿中扮演着重要角色(吴柏林等,2014; 刘武生等,2017; 朱强等,2018)。多数高品位铀矿石富含有机质(刘

正邦等,2013;黄少华等,2016)。伊犁盆地南缘系列铀矿床的铀赋存在煤系地层中,含矿砂岩中富含有机炭屑(陈戴生等,1997)。二连盆地哈达图铀矿床的含矿砂岩颜色呈深灰色、灰黑色,同样富含有机炭屑,且在钻取的高品位岩芯中可观察到油气的痕迹。因此,有必要测得灰色砂岩中的碳、硫含量,评价其还原能力。灰色砂岩中有机质含量越高,表明其还原能力越强,越有利于铀成矿。

4.3 目的层氧化-还原带发育情况评价

含铀-氧流体在含矿目的层中迁移并与岩石发生水-岩反应,形成一定厚度的氧化砂岩(Xue Chunji et al., 2010)。氧化砂岩所占比例过高,说明钻探位置可能处于氧化带位置,需要对含铀-氧流体可能的流向进一步探索;还原砂岩所占比例过高,说明钻探位置可能处于还原带位置,需要结合基底形态和地层产状对含铀-氧流体可能的流向的反方向进一步探索。因此,在实际工作中,有必要识别黄色-氧化砂岩和灰色-还原砂岩并测量其厚度,计算二者厚度的比值。根据实际勘探经验,黄色-氧化砂岩与灰色-还原砂岩厚度比约为2时对铀成矿较有利。对比隆起区到断裂带的钻孔中黄色-氧化砂岩与灰色-还原砂岩厚度比值变化趋势。倘若自隆起区到断裂带灰色砂岩厚度所占比值增大,则说明该范围内可能存在含铀-氧流体的渗入。

5 结论

(1)盆地内部隆起区具有良好的砂岩型铀矿找矿前景。应重点关注盆地内部大型中-酸性火成岩隆起区,尤其是隆起区翼部有深大断裂发育的部位。

(2)盆地内部砂岩型铀矿找矿与勘探的大致流程为:①查明盆地基底起伏和埋深、识别岩性和划分断裂。将岩性为中-酸性火成岩且发育断裂的隆起区圈定为潜在勘探靶区,并结合隆起区出露面积、翼部坡度及附近地层发育情况来初筛勘探靶区。②在初筛的勘探靶区深大断裂位置沿隆起区方向布置并实施钻探。通过综合分析钻孔岩芯、地球物理测井等资料来优选勘探靶区。③在优选的勘探靶区部署并实施钻探工作。

(3)区域重磁资料在查明盆地内部基底埋深和岩性、划分断裂等方面具有优势且经济、实用,应在盆地内部砂岩型铀矿找矿与勘探中得到广泛推广应用。

(4)因盆地内部多被沉积地层所覆盖,增加了砂岩型铀矿找矿与勘探的难度。应重视地球物理等方法的应用以及对油气、煤炭等勘探部门钻孔(包括地

球物理测井)、地震等资料的收集和综合应用。

References

- Bonnetti C, Cuney M, Bourlange S, Deloule E, Poujol M, Liu Xiaodong, Peng Yunbiao, Yang Jianxin. 2017. Primary uranium sources for sedimentary-hosted uranium deposits in NE China: insight from basement igneous rocks of the Erlian basin. *Mineralium Deposita*, 52: 297~315.
- Cai Chunfang, Li Hongtao, Qin Mingkuan, Luo Xiaorong, Wang Feiyu, Ou Guangxi. 2007. Biogenic and petroleum-related ore-forming processes in Dongsheng uranium deposit, NW China. *Ore Geology Reviews*, 32: 262~274.
- Cai Jianfang, Yan Zhaobin, Zhang Liangliang, Feng Zhibing, Huang Xiao, Nie Fengjun, Xai Fei. 2018. Relationship between grey sandstone and uranium mineralization in Yaojia Formation of upper Cretaceous in Tongliao, Inner Mongolia. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 41(4): 328~335 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daisheng, Wang Ruiying, Li Shengxiang. 1997. Metallogenetic model of the sandstone-type uranium deposits in interlayer oxidation zone of Yili basin. *Uranium Geology*, 13(6): 327~335 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daisheng, Li Shengxiang, Cai Yuqi. 2006. Overview of the researches on sedimentary environment for sandstone-type uranium deposits in the Meso-Cenozoic basins of China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 24(2): 223~228 (in Chinese with English abstract).
- Chen Daisheng, Li Xiaocui. 2014. Analysis of the relationship between paleohydrodynamic condition and uranium mineralization in the continental basin. *Uranium Geology*, 30(4): 219~222+251 (in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaolin, Fang Xiheng, Gou Qinyin, Xia Yuliang, Pang Yaqing, Sun Ye. 2008. Re-discussion on uranium metallogenesis in Qianjiadian sag, Songliao basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 82(4): 553~561 (in Chinese with English abstract).
- Cheng Yinhang, Wang Shaoyi, Zhang Tianfu, Teng Xueming, Ao Cong, Jin Ruoshi, Li Hongliang. 2020. Regional sandstone-type uranium mineralization rooted in Oligo-Miocene tectonic inversion in the Songliao basin, NE China. *Gondwana Research*, (88): 88~105.
- Cheng Yinhang, Zhang Tianfu, Zeng Wei, Hu Peng, Liu Xing, Yang Jun, Qu Kai, Wang Shaoyi, Cheng Xianyu, Ao Cong, Jin Ruoshi, Miao Peisen. 2020. Driving forces for sandstone-type uranium super-enrichment in Meso-Cenozoic basins, North China. *Geotectonica et Metallogenesis*, 44(4): 590~606 (in Chinese with English abstract).
- Deng Jun, Wang Qingfei, Gao Bangfei, Huang Dinghua, Yang Liqiang, Xu Hao, Zhou Yinghua. 2005. Evolution of Ordos basin and its distribution of various energy resources. *Geoscience*, 19(4): 538~545 (in Chinese with English abstract).
- Feng Shirong. 1997. Significance of hydraulic gradient to the regional prediction for sandstone-type uranium deposits in interlayer oxidation zone. *Uranium Geology*, 13(6): 351~355 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Gu Shefeng, Jiang Li. 2013. Mineralizing conditions and metallogenetic model of uranium in west slope of Songliao basin. *Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing*, 32(4): 590~606 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, Jiang Li, Zeng Jiangang, Yan Zhaobin, Li Hongxing. 2014. Correlation of gravity field characteristics with sandstone-type uranium deposit and its geological significance. *Geoscience*, 28(4): 841~849 (in Chinese with English abstract).
- Feng Zhibing, Nie Fengjun, Deng Juzhi, Zhang Hujun, Liu Baohua. 2017. Spatio-temporal collocation and genetic

- relationship of oil, gas, coal and uranium and its significance for uranium prospecting: a case from Mesozoic-Cenozoic U-bearing basins, North China. *Russian Geology and Geophysics*, 58(5): 611~623.
- Feng Zhibing, Nie Bingfeng, Nie Fengjun, Jiang Li, Xia Fei, Li Mangen, Yan Zhaobin, He Jianfeng, Cheng Ruodan. 2021. Application progress of geophysical methods in exploration of sandstone-type uranium deposit. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 45(5): 1179~1188 (in Chinese with English abstract).
- Gao Yuyou, Yu Baoli, Yu Wenbin, Li Zhanchun, Zhang Qingxin, Miao Anzhong. 2008. Analysis on uranium metallogenic conditions and ore-controlling factors of Qianjiadian-Jiamatu area, southwest of Songliao basin. *World Nuclear Geoscience*, 25(3): 150~156 (in Chinese with English abstract).
- Goldhaber M B, Reynolds R L, Rye R O. 1978. Origin of a South Texas roll-type uranium deposit: II. sulfide petrology and sulfur isotope studies. *Economic Geology*, 73: 1690~1705.
- Guo Fusheng, Gu Junru. 1997. The difference between spectral characteristic parameter Th/U and Th/U and the revised formula for calculating paleo-uranium abundance. *Uranium Geology*, 13(6): 356~374 (in Chinese with English abstract).
- Guo Yangyang. 2019. Study on gravity field and structural features of Wunite depression in Erlian basin. Master's thesis of Xi'an Shiyou University (in Chinese with English abstract).
- Hou Baohong, Keeling J, Li Ziying. 2017. Paleovalley-related uranium deposits in Australia and China: a review of geological and exploration models and methods. *Ore Geology Reviews*, 88: 201~234.
- Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Liu Zhangyue, Xu Qiang, Guo Qiang. 2016. Impact of diagenesis and hydrocarbon charging on sandstone uranium mineralization: an example of Toutunhe Formation in Liuhuaggou area, southern Junggar basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 34(2): 250~259 (in Chinese with English abstract).
- Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Xu Qiang, He Zhongbo, Liu Zhangyue, David S. 2018. Superimposed uranium metallogenesis between deep hydrocarbon fluid and supergene oxidation fluid in the northwestern margin of Junggar basin. *Acta Geologica Sinica*, 92(7): 1493~1506 (in Chinese with English abstract).
- Huang Shaohua, Qin Mingkuan, Liu Zhangyue, Deng Fuli, Huang Xiao, Guo Qiang, Jia Licheng. 2021. Characteristics and genesis of organic matter within the lower Member of Yaojia Formation and its implications for tabular-type uranium deposits in the southwest of Songliao basin. *Geology of Ore Deposits*, 63(6): 474~496.
- Huang Jingbai, Li Shengxiang. 2007. Metallogenetic characteristics, model and exploration prospect for the paleo-interlayer-oxidation type sandstone-hosted uranium deposits in China. *Uranium Geology*, 23(1): 7~16 (in Chinese with English abstract).
- Huang Shijie. 1994. Formation conditions and prospecting criteria for sandstone-type uranium deposit of interlayered oxidation type. *Uranium Geology*, 10(1): 6~13 (in Chinese with English abstract).
- Huang Xiao. 2017. Study on the relationship between drill logging characteristics and uranium mineralization in sandstone-type uranium deposit. Master's thesis of East China University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Jiao Yangquan, Wu Liqun, Peng Yunbiao, Rong Hui, Ji Dongmin, Miao Aisheng, Li Hongliang. 2015. Sedimentary-tectonic setting of the deposition-type uranium deposits forming in the Paleo-Asian tectonic domain, North China. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 189~205 (in Chinese with English abstract).
- Jin Ruoshi, Miao Peisen, Sima Xianzhang, Li Jianguo, Zhao Hualei, Zhao Fengqing, Feng Xiaoxi, Chen Yin, Chen Lulu, Zhao Lijun, Zhu Qiang. 2016. Structure styles of Mesozoic-Cenozoic U-bearing rock series in northern China. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 90(6): 2104~2116.
- Li Chengli, Cui Ruihua, Liu Yizhong. 2011. Comprehensive geophysical prediction method of basement lithology—example of Binbei area, Songliao basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(2): 491~498.
- Liu Bo, Yang Jianxin, Qin Yanwei, Qiao Peng, Zhang Feng. 2016. Study of structure and formation in uranium-bearing paleo-valley and typical metallogenic models in eastern part of Erlian basin. *Geology and Exploration*, 52(6): 1037~1047 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Yang Jianxin, Peng Yunbiao, Kang Shihu, Qiao Peng, Lu Chao, Zhang Feng. 2017. Study of structure and formation in uranium-bearing paleo-valley and typical metallogenic models in eastern part of Erlian basin. *Mineral Deposits*, 36(1): 126~142 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Peng Yunbiao, Kang Shihu, Qin Yanwei. 2018. Depositional characteristics and uranium metallogenic fluid dynamics of uranium bearing paleo-valley of the Saihan Formation in Basaiqi, Erlian basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 37(2): 316~325 (in Chinese with English abstract).
- Liu Bo, Miao Aisheng, Peng Yunbiao, Zhang Pengfei, Li Peng, Shen Kefeng, Shi Zhiqiang. 2020. Research advances in uranium metallogenic characteristics, mechanism and dynamic background in the Mesozoic-Cenozoic basins of the Xingmeng area, North China. *Acta Geologica Sinica*, 94(12): 3689~3711 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Zhao Xinqi, Shi Qingping, Zhang Zinan. 2017. Research on relationship of oil-gas and sandstone-type uranium mineralization of northern China. *Geology in China*, 44(2): 279~287 (in Chinese with English abstract).
- Liu Wusheng, Zhao Xinqi, Kang Shihu, Shi Qingping, Zhang Zinan. 2018. Inversion structure and its relationship with sandstone-type uranium metallization in Erlian basin. *Uranium Geology*, 34(2): 81~89 (in Chinese with English abstract).
- Liu Yanxu, Lu Wenfen, Yang Donghong. 2021. The prediction of uranium deposit based on gravity and magnetic data: exemplified by western Songliao basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 42(1): 63~73 (in Chinese with English abstract).
- Liu Zhengbang, Jiao Yangquan, Xue Chunji, Miao Aisheng, Gu Hao, Wu Yaping, Rong Hui, Ding Ye. 2013. The correlation between sandstone uranium ore-body and the coal bed in Jurassic system, Dongsheng, Inner Mongolia. *Earth Science Frontiers*, 20(1): 146~153 (in Chinese with English abstract).
- Luo Yi, He Zhongbo, Ma Hanfeng, Sun Xiang. 2012. Metallogenetic characteristics of Qianjiadian sandstone-type uranium deposit in Songliao basin. *Mineral Deposits*, 32(2): 391~400 (in Chinese with English abstract).
- Lü Yonghua, Feng Zhibing, Kang Shihu, Li Mangen, Gou Lieyuan. 2021. Petrologic features and its uranium metallogenic significance of the paleo-channel sandbodies in the upper part of Saihan Formation, the mid-eastern Ulanqab depression of Erlian basin. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 44(1): 9~17 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xiaolei, Yuan Bingqiang, Xu Wenqiang, Song Lijun, Zhou Daochen. 2016. The relationship between features of gravity and magnetic field and sandstone-type uranium deposits in the south of Ordos basin. *Geology and Exploration*, 52(4): 647~656 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Chen Anping. 2010. Paleo-channel Sandstone-type Uranium Deposit in Erlian Basin. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Nie Fengjun, Yan Zhaobin, Xia Fei, Li Mangen, Lu Yayun, Cai Jianfang, Guo Funeng, Ning Jun. 2017. Hot fluid flows in the sandstone-type uranium deposit in the Kailu basin, Northeast China. *Geological Bulletin of China*, 36(10): 1850~1866 (in Chinese with English abstract).
- Nie Fengjun, Zhang Chengyong, Jiang Meizhu, Yan Zhaobin,

- Zhang Xin, Zhang Jin, Qiao Haiming, Zhou Wei. 2018. Relationship of depositional facies and microfacies to uranium mineralization in sandstone along the southern margin of Turpan-Hami basin. *Earth Science*, 43(10): 3584~3602.
- Qin Mingkuan, Zhao Fengmin, He Zhongbo, Sheng Kefeng, Fan Guang, Li Yuexiang, Cao Jianyin. 2009. Comparison of metallogenetic conditions for sandstone-type uranium deposit between Erlian basin of China and sedimentary basins of Mongolia. *Uranium Geology*, 25(2): 78~84 (in Chinese with English abstract).
- Qin Mingkuan, He Zhongbo, Liu Zhangyue, Guo Qiang, Song Jiye, Xu Qiang. 2017. The hydrocarbon dissipation and its effect of diagenetic and mineralization: progress, understanding and outlook. *Geological Review*, 63(5): 1255~1269 (in Chinese with English abstract).
- Sun Zexuan, Chen Hongde, Chen Yong, Wang Sili. 2006. Characteristics and metallogenetic models of phreatic interlayer oxidation zone sandstone-type uranium deposits: case study of intermontane basins in western Yunnan Province. *Minerals Deposits*, 25(2): 191~198 (in Chinese with English abstract).
- Wang Liang, Zhang Yingwen, Liu Shengguang. 2009. The application of regional gravity and magnetic data to delineating intrusive bodies and local geological structures in Guizhou Province. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 33(3): 245~249 (in Chinese with English abstract).
- Wang Weiguo, Gong Wenjie, Jiang Shan, Weng Yijun. 2010. Analysis of logging data for uranium exploration in Wunate segment, Erlian basin. *Uranium Geology*, 26(6): 365~368 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yong, Chen Zheng, Liu Jian, Zheng Enjiu, Wang Cheng, Li Shengxiang, Han Xiaozhong. 2006. Neotectonic in southern Yili basin and its control of sandstone-type uranium deposits. *Geotectonics and Metallogeny*, 30(4): 486~494.
- Wu Bailin, Wei Anjun, Hu Liang, Song Zisheng, Zhang Benhao, Wang Haitong, Wang Dan, Cun Xiaoni, Sun Li, Luo Jingjing. 2014. The hydrocarbon dissipation and its effect of diagenetic and mineralization: progress, understanding and outlook. *Geological Review*, 60(6): 1199~1211 (in Chinese with English abstract).
- Wu Bailin, Sun Bin, Cheng Xianghu, Zhang Wanling, Liu Mingyi, Hao Xin, Liu Chiyang. 2017. Study and prospect for sedimentology of uranium deposit. *Acta Sedimentologica Sinica*, 35(5): 1044~1053 (in Chinese with English abstract).
- Wu Huishan. 1998. Nuclear Exploration. Beijing: Atomic Energy Publishing House (in Chinese).
- Wu Rengui, Hu Zhiqiang, Wu Jianhua, Liu Shuai. 2018. Relationship between rich uranium geological body and source of uranium mineralization. *Journal of East China University of Technology (Natural Science Edition)*, 41(4): 358~363 (in Chinese with English abstract).
- Xue Chunji, Chi Guoxiang, Xue Wei. 2010. Interaction of two fluid systems in the formation of sandstone-hosted uranium deposits in the Ordos basin: geochemical evidence and hydrodynamic modeling. *Journal of Geochemical Exploration*, 106: 226~235.
- Yan Xinlin. 2018. Characteristics and uranium mineralization of upper Cretaceous diabase in Qianjiadian area, Songliao basin. *Journal of Northeast Petroleum University*, 42(1): 40~48 (in Chinese with English abstract).
- Yang Xiaoyong, Ling Mingxing, Sun Weidong, Luo Xiandong, Lai Xiaodong, Liu Chiyang, Miao Jianyu, Sun Wei. 2009. The genesis of sandstone-type uranium deposits in the Ordos basin, NW China: constraints provided by fluid inclusions and stable isotopes. *International Geology Review*, 51(5): 422~455.
- Yu Rengan, Zhu Qiang, Wen Sibo, Tu Jiarun, Peng Shenglong, Si Qinghong, Tang Yongxiang. 2020. Tectonic setting and provenance analysis of Zhiluo Formation sandstone of Tarangaole area in the Ordos basin. *Earth Science*, 45(3): 829~843 (in Chinese with English abstract).
- Yu Wenbin, Dong Qingshui, Zou Jibin, Feng Benzhi. 2006. Analysis of metallogenetic conditions of *in-situ* leachable sandstone-type uranium deposit in the southeastern margin of Songliao basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 30(4): 543~562 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Guiqin, Xiong Shengqing, Meng Qingmin, Zhou Xihua, Lin Pinrong, Wang Shumin, Gao Wenli, Xu Mingcai, Shi Danian, Li Qiusheng. 2011. Application research of geophysical prospecting techniques. *Acta Geologica Sinica*, 85(11): 1744~1805 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chao, Yu Reng'an, Wang Shanbo, Cheng Yinhang, Ao Chong, Teng Xueming, Feng Ping, Yu Hang, Si Dan, Gao Xuefeng. 2021. Late Cenozoic sedimentary characteristics and sedimentary facies evolution in Yuejin 2 area of northwest Qaidam. *Northwestern Geology*, 54(3): 27~38 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Chengyong, Nie Fengjun, Liu Qingcheng, Fan Xiujun. 2010. Discussion on electrical logging response of target layer for sandstone-type uranium deposits of Bayanwula area, Erlian basin. *Uranium Geology*, 26(2): 101~107+119 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai. 2016. Innovation and development of metallogenetic theory for sandstone-type uranium deposit in China. *Uranium Geology*, 32(6): 321~332 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jindai, Li Ziying, Su Xuebin, Tan Yahui, Li Shengxiang, Su Yanru, Li Jianhua, Deng Ping, Xu Lechang, Pan Ziqiang. 2019. Development strategy of nuclear energy mineral resources. *Engineering*, 21(1): 113~118 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xin, Nie Fengjun, Xia Fei, Zhang Chengyong, Feng Zhibing, Ullah R, Zhang Pengfei. 2018. Provenance constraints on the Xishanyao Formation, southern Yili basin, northwest China: evidence from petrology, geochemistry, and detrital zircon U-Pb geochronology. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55: 1020~1035.
- Zhao Fengming. 2005. Discussion on spatial orientation for exogenous uranium deposits. *Uranium Geology*, 21(3): 161~168 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Qiang, Yu Reng'an, Li Jianguo, Sima Xianzhang, Si Qinghong, Li Guangyao, Wen Sibo, Liu Xiaoxue, Wang Shanbo. 2018. Control of reducing medium on uranium deposit of sandstone in Tarangaole area, northeastern Ordos basin. *Coal Geology & Exploration*, 46(6): 11~18 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Qiang, Li Jianguo, Yu Reng'an, Sima Xianzhang, Wen Sibo, Li Guangyao, Si Qinghong. 2019. Lithologic-lithographic characteristics of the upper and lower members of the Zhiluo Formation and their differential control of uranium mineralization in the Tarangaole area, Ordos basin. *Acta Geoscientica Sinica*, 40(3): 456~468 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Qiang, Li Jianguo, Miao Peisen, Zhang Bo, Zhao Hualei, Si Qinghong, Chen Yin, Xiao Peng. 2020. Characteristics of clay minerals in the Luohe Formation in Zhenyuan area, Ordos basin, and its uranium prospecting significance. *Geotectonica et Metallogenic*, 44(4): 619~632 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Xiyang. 2005. The elements geochemistry characteristics of interlayer oxidation zone in sandstone-type uranium deposits: a case study of the uranium deposit in Yili basin and Turpan-Hami basin. Doctoral thesis of Chengdu University of Technology (in Chinese with English abstract).
- Бернман А Н. 1995. Hydrogenic Uranium Deposit. Translated by Xiong Fuqing, Sun Xitian, Di Yongqiang. Xianyang: No. 203 Research Institute of Nuclear Industry (in Chinese).

参 考 文 献

- 别列里曼 A N. 1995. 水成铀矿床. 熊福清, 孙西田, 狄永强, 译. 咸阳: 核工业二〇三研究所.

- 蔡建芳, 严兆彬, 张亮亮, 封志兵, 黄笑, 聂逢君, 夏菲. 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. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(4): 328~335.
- 陈戴生, 王瑞英, 李胜祥. 1997. 伊犁盆地层间氧化带砂岩型铀矿成矿模式. 铀矿地质, 13(6): 327~335.
- 陈戴生, 李胜祥, 蔡煜琦. 2006. 我国中、新生代盆地砂岩型铀矿沉积环境研究概述. 沉积学报, 24(2): 223~228.
- 陈戴生, 李晓翠. 2014. 陆相盆地古水动力条件与铀成矿关系. 铀矿地质, 30(4): 219~222+251.
- 陈晓林, 方锡珩, 郭庆银, 夏毓亮, 庞雅庆, 孙晔. 2008. 对松辽盆地钱家店凹陷铀成矿作用的重新认识. 地质学报, 82(4): 553~561.
- 程银行, 张天福, 曾威, 胡鹏, 刘行, 杨君, 曲凯, 王少轶, 程先鋐, 奥琮, 金若时, 苗培森. 2020. 中国北方中新生代盆地砂岩型铀超常富集的驱动力. 大地构造与成矿学, 44(4): 590~606.
- 邓军, 王庆飞, 高帮飞, 黄定华, 杨立强, 徐浩, 周应华. 2005. 鄂尔多斯盆地演化与多种能源矿产分布. 现代地质, 19(4): 538~545.
- 冯世荣. 1997. 水力坡度在层间氧化带砂岩型铀矿区域预测中的意义. 铀矿地质, 13(6): 351~355.
- 封志兵, 聂逢君, 严兆彬, 钟延秋, 谷社峰, 江丽. 2013. 松辽盆地西部斜坡铀成矿条件及聚铀模式. 大庆石油地质与开发, 32(4): 590~606.
- 封志兵, 聂冰锋, 聂逢君, 江丽, 夏菲, 李满根, 严兆彬, 何剑锋, 程若丹. 2021. 地球物理方法在砂岩型铀矿勘查中的应用进展. 物探与化探, 45(5): 1179~1188.
- 高玉友, 禹宝利, 于文斌, 李占春, 张庆新, 苗安中. 2008. 松辽盆地西南部钱家店—架玛吐地区姚家组铀成矿条件及控矿因素分析. 世界核地质科学, 25(3): 150~156.
- 郭福生, 竣骏如. 1997. 能谱特征参数 Th/U 与 Th/U 之差异及古铀量计算公式的修正. 铀矿地质, 13(6): 356~374.
- 郭阳阳. 2019. 二连盆地乌尼特坳陷重力场及构造特征研究. 西安石油大学硕士学位论文.
- 黄少华, 秦明宽, 刘章月, 许强, 郭强. 2016. 成岩作用与油气侵位对砂岩铀成矿的约束——以淮南硫磺沟地区头屯河组砂岩铀成矿为例. 沉积学报, 34(2): 250~259.
- 黄少华, 秦明宽, 许强, 何中波, 刘章月, David S. 2018. 准噶尔盆地西北缘深部烃类流体与表生氧化流体叠合铀成矿作用. 地质学报, 92(7): 1493~1506.
- 黄净平, 李胜祥. 2007. 试论我国古层间氧化带砂岩型铀矿床成矿特点、成矿模式及找矿前景. 铀矿地质, 23(1): 7~16.
- 黄世杰. 1994. 层间氧化带砂岩型铀矿的形成条件及找矿判据. 铀矿地质, 10(1): 6~13.
- 黄笑. 2017. 砂岩型铀矿钻孔测井相特征与铀成矿关系. 东华理工大学硕士学位论文.
- 焦养泉, 吴立群, 彭云彪, 荣辉, 季东民, 苗爱生, 里宏亮. 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. 地学前缘, 22(1): 189~205.
- 李成立, 崔瑞华, 刘益中. 2011. 盆地基底岩性的综合地球物理预测方法——以松辽盆地滨北地区基底岩性预测为例. 地球物理学报, 54(2): 491~498.
- 刘波, 杨建新, 秦彦伟, 乔鹏, 张锋. 2016. 二连盆地中东部赛汉组古河谷砂岩型铀矿控矿成因相研究. 地质与勘探, 52(6): 1037~1047.
- 刘波, 杨建新, 彭云彪, 康世虎, 乔鹏, 鲁超, 张锋. 2017. 二连盆地中东部含铀古河谷构造建造及典型矿床成矿模式研究. 矿床地质, 36(1): 126~142.
- 刘波, 彭云彪, 康世虎, 秦彦伟. 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. 矿物岩石地球化学通报, 37(2): 316~325.
- 刘波, 苗爱生, 彭云彪, 张鹏飞, 李鹏, 申科峰, 时志强. 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. 地质学报, 94(12): 3689~3711.
- 刘武生, 赵兴齐, 史清平, 张梓楠. 2017. 中国北方砂岩型铀矿成矿作用与油气关系研究. 中国地质, 44(2): 279~287.
- 刘武生, 赵兴齐, 康世虎, 史清平, 张梓楠. 2018. 二连盆地反转构造与砂岩型铀矿成矿作用. 铀矿地质, 34(2): 81~89.
- 刘燕戌, 路文芬, 杨冬红. 2021. 基于重磁资料的铀矿预测研究——以松辽盆地西部为例. 地球学报, 42(1): 63~73.
- 刘正邦, 焦养泉, 薛春纪, 苗爱生, 顾浩, 吴亚平, 荣辉, 丁叶. 2013. 内蒙古东胜地区侏罗系砂岩铀矿体与煤层某些关联性. 地学前缘, 20(1): 146~153.
- 罗毅, 何中波, 马汉峰, 孙祥. 2012. 松辽盆地钱家店砂岩型铀矿成矿地质特征. 矿床地质, 31(2): 391~400.
- 吕永华, 封志兵, 康世虎, 李满根, 苟冽源. 2021. 二连盆地乌兰察布坳陷中东部赛汉组上段古河道砂体岩石学特征及其铀成矿意义. 东华理工大学学报(自然科学版), 44(1): 9~17.
- 马小雷, 袁炳强, 许文强, 宋立军, 周道琛. 2016. 鄂尔多斯盆地南缘重磁场特征及其与砂岩型铀矿关系. 地质与勘探, 52(4): 647~656.
- 聂逢君, 陈安平. 2010. 二连盆地古河道砂岩型铀矿. 北京: 地质出版社.
- 聂逢君, 严兆彬, 夏菲, 李满根, 卢亚运, 蔡建芳, 郭福能, 宁君. 2017. 内蒙古开鲁盆地砂岩型铀矿热流体作用. 地质通报, 36(10): 1850~1866.
- 聂逢君, 张成勇, 姜美珠, 严兆彬, 张鑫, 张进, 乔海明, 周伟. 2018. 吐哈盆地西南缘地区砂岩型铀矿含矿目的层沉积相与铀矿化. 地球科学, 43(10): 3584~3602.
- 秦明宽, 赵凤民, 何中波, 申科峰, 范光, 李月湘, 曹建英. 2009. 二连盆地与蒙古沉积盆地砂岩型铀矿成矿条件对比. 铀矿地质, 25(2): 78~84.
- 秦明宽, 何中波, 刘章月, 郭强, 宋继叶, 许强. 2017. 准噶尔盆地砂岩型铀矿成矿环境与找矿方向研究. 地质论评, 63(5): 1255~1269.
- 孙泽轩, 陈洪德, 陈勇, 王四利. 2006. 潜水层间氧化带砂岩型铀矿特征与成矿模式——以滇西地区山间盆地为例. 矿床地质, 25(2): 191~198.
- 王亮, 张应文, 刘盛光. 2009. 区域重磁资料圈定贵州境内侵入岩体及局部地质构造. 物探与化探, 33(3): 245~249.
- 王卫国, 宫文杰, 姜山, 翁义军. 2010. 二连盆地乌尼特地段铀矿勘探中的测井资料分析, 铀矿地质, 26(6): 365~368.
- 王勇, 陈正乐, 刘健, 郑恩玖, 王成, 李胜祥, 韩效忠. 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. 大地构造与成矿学, 30(4): 486~494.
- 吴柏林, 魏安军, 胡亮, 宋子升, 张本浩, 王海桐, 王丹, 寸小妮, 孙莉, 罗晶晶. 2014. 油气耗散作用及其成岩成矿效应: 进展、认识与展望. 地质论评, 60(6): 1199~1211.
- 吴柏林, 孙斌, 程相虎, 张婉莹, 刘明义, 郝欣, 刘池洋. 2017. 铀矿沉积学研究与发展. 沉积学报, 35(5): 1044~1053.
- 吴慧山. 1998. 核技术勘查. 北京: 原子能出版社.
- 吴仁贵, 胡志强, 巫建华, 刘帅. 2018. 富铀地质体与成矿铀源关系探讨. 东华理工大学学报(自然科学版), 41(4): 358~363.
- 颜新林. 2018. 松辽盆地钱家店地区上白垩统辉绿岩特征及铀成矿作用. 东北石油大学学报, 42(1): 40~48.
- 俞初安, 朱强, 文思博, 涂家润, 彭胜龙, 司庆红, 唐永香. 2020. 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区直罗组砂岩源区构造背景与物源分析. 地球科学, 45(3): 829~843.
- 于文斌, 董清水, 邹吉斌, 冯本智. 2006. 松辽盆地东南缘地浸砂岩型铀矿成矿条件分析. 吉林大学学报(地球科学版), 30(4): 543~562.
- 袁桂琴, 熊盛青, 孟庆敏, 周锡华, 林品荣, 王书民, 高文利, 徐明才, 史大年, 李秋生. 2011. 地球物理勘查技术与应用研究. 地质学报, 85(11): 1744~1805.
- 张超, 俞初安, 王善博, 程银行, 奥琮, 滕雪明, 冯平, 于航, 司丹, 高雪峰. 2021. 柴西北缘跃进二号地区晚新生代沉积特征及沉积相演化. 西北地质, 54(3): 27~38.
- 张成勇, 聂逢君, 刘庆成, 凡秀君. 2010. 二连盆地巴彦乌拉地区砂

- 岩型铀矿目的层电测井曲线响应分析, 铀矿地质, 26(02): 101~107+119.
- 张金带. 2016. 我国砂岩型铀矿成矿理论的创新和发展. 铀矿地质, 32(6): 321~332.
- 张金带, 李子颖, 苏学斌, 谭亚辉, 李胜祥, 苏艳茹, 李建华, 邓平, 徐乐昌, 潘自强. 2019. 核能矿产资源发展战略研究. 中国工程科学, 21(1): 113~118.
- 赵凤民. 2005. 外生后成渗入型铀矿床的空间定位问题探讨. 铀矿地质, 21(3): 161~168.
- 朱强, 俞初安, 李建国, 司马献章, 司庆红, 李光耀, 文思博, 刘晓雪, 王善博. 2018. 鄂尔多斯盆地东北部塔然高勒地区还原介质对砂岩型铀矿的控制. 煤田地质与勘探, 46(6): 11~18.
- 朱强, 李建国, 俞初安, 司马献章, 文思博, 李光耀, 司庆红. 2019. 鄂尔多斯盆地塔然高勒地区直罗组上、下段的岩性-岩相特征及对铀成矿的差异性控制作用. 地球学报, 40(3): 456~468.
- 朱强, 李建国, 苗培森, 张博, 赵华雷, 司庆红, 陈印, 肖鹏. 2020. 鄂尔多斯盆地镇原地区洛河组黏土矿物特征及找铀意义. 大地构造与成矿学, 44(4): 619~632.
- 朱西养. 2005. 层间氧化带砂岩型铀矿元素地球化学特征——以吐哈伊犁盆地铀矿床为例. 成都理工大学博士学位论文.

Discussion and design of exploration technology for sandstone-type uranium deposits in the interior of the sedimentary basins

FENG Zhibing^{*1,2)}, NIE Fengjun^{*2)}, NING Yuanli³⁾, JIANG Li⁴⁾, XIA Fei²⁾, HE Jianfeng¹⁾, SHENG Zhouning¹⁾

1) Jiangxi Engineering Laboratory on Radioactive Geoscience and Big Data Technology, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China; 2) State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment,

East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China;

3) CNNC Key Laboratory of Uranium Resources Geophysical Exploration Technology, Airborne Survey and Remote Sensing Center of Nuclear Industry, Shijiazhuang, Hebei 050002, China;

4) Fundamental Science on Radioactive Geology and Exploration Technology Laboratory, East China University of Technology, Nanchang, Jiangxi 330013, China

* Corresponding author: zbfengjl@163.com (FENG Zhibing); niefj@263.net (NIE Fengjun)

Abstract

For a long time, the margin of the sedimentary basins played a vital role in sandstone type uranium deposit prospecting and exploration. In recent years, however, several uranium deposits and mineralization spots have been discovered in the interior of the basins, presenting a good exploration potential of uranium deposit. This paper studied the characteristics of uranium deposits in the interior of the basins and summarized the crucial uranium ore-controlling metallogenetic elements of “large igneous upwelling area and fractures in the edge of upwelling area”. Combined with the metallogenetic theory of sandstone-type uranium deposit, a set of combination of suitable prospecting methods is designed, which can be divided into two steps. Firstly, preliminary screening of exploration target area. According to regional gravity, magnetic, radioactive and remote sensing data, the relief and burial depth of the basin basement, lithology classification, and faults division was identified. The upwelling area with intermediate-acid igneous rock and developing faults was delineated as potential exploration target area. Subsequently, the exploration target was preliminarily screened with a combination of features of the ore-bearing strata, the slope and area of upwelling area. Secondly, exploration target area was optimized. In the preliminary screened exploration area, several drill holes were arranged and drilled in the area from deep and large faults to the upwelling area. By comprehensively evaluating the groundwater “recharge, runoff and drainage” system, the uranium supply, accumulation capacity and development of redox transitional zone of ore-bearing strata, favorable exploration target area could be selected, which provides useful guidance for the layout and implementation of uranium exploration work in the next step. This method makes full use of regional geophysical data and open downloadable data, which can greatly reduce the exploration cost. Focusing on the key elements of uranium-controlling mineralization and selecting appropriate geological and geophysical methods can effectively improve the efficiency of prospecting and exploration of sandstone type uranium deposits in the interior of the basin.

Key words: sandstone-type uranium deposit; interior of the basin; upwelling area; geophysical prospecting; intermediate-acid igneous rock