

聂凤军, 李强峰, 王佳新, 等. 中蒙边境及邻区铀矿床产出环境、地质特征、形成作用和找矿标志[J]. 中国地质, 2014, 41(4): 1037-1058.
Nie Fengjun, Li Qiangfeng, Wang Jiabin, et al. Geological setting, features, origin and exploration criteria of uranium deposits occurring within the China-Mongolia border region and its neighboring areas[J]. Geology in China, 2014, 41(4): 1037-1058(in Chinese with English abstract).

中蒙边境及邻区铀矿床产出环境、地质特征、 形成作用和找矿标志

聂凤军¹ 李强峰^{1,2} 王佳新^{1,3} 蒋 喆^{1,2} 张晓康^{1,4} 吴科锐^{1,4} 丁成武¹ 曹 毅¹

(1. 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 10037; 2. 石家庄经济学院, 河北 石家庄 050031; 3. 中国地质大学(北京), 北京 100083; 4. 北京科技大学, 北京 100083)

摘要:中蒙边境及邻区位于西伯利亚板块、塔里木板块和华北克拉通的结合部位, 是全球范围内重要的铀多金属成矿带之一。受多期次构造岩浆活动影响, 该区前侏罗纪变质岩块体和中生代火山-沉积岩分布广泛, 深大断裂纵横交错, 各类铀矿床(矿化区)星罗棋布。根据围岩类型、结构构造及成矿过程可将该区铀矿床划分为 6 种类型: (1)火山岩型; (2)砂岩型; (3)岩脉型; (4)褐煤型; (5)交代岩型; (6)磷灰盐型。其中火山岩型和砂岩型铀矿床具有重要经济意义。

区域矿产地质研究表明, 中蒙边境产出的大部分铀矿床(矿化区)与前侏罗纪变质岩块体具有密切时空分布关系。前侏罗纪变质岩块体可划分为 2 部分: (1)前寒武纪高级变质岩; (2)中生代中、低级变质岩。铀的亲石元素特性致使其在壳-幔物质发生分异时富集于地壳的硅铝层。鉴于在地壳长期演化历史中, 古老变质岩已具备有较高的铀含量, 那么它们在显生宙构造-岩浆活动中就为铀的富集成矿提供有利的物质条件。显生宙构造运动的形式除了断裂活化外, 也包括陆相沉积盆地的上隆和下陷。铀在地壳硅铝层中的富集是通过 2 种方式实现的: (1)陆壳的深熔和岩浆的分异作用; (2)富铀岩体(层)的风化剥蚀和再沉积活动。研究表明, 铀的富集过程十分缓慢, 其中火山岩型铀矿床的形成作用就是长英质岩浆活动的组成部分。

火山型铀矿床主要出现在中蒙边境最东端蒙古国境内, 它们是中蒙古-额尔古纳地块伸展构造环境(裂陷槽为大量高钾长英质火山岩所充填)中构造-岩浆作用及相关流体活动的产物。长英质火山杂岩体内产出的若干处大型铀矿床(区)和铅-锌-银-铀矿床即是很好的佐证。一般来讲, 具有强烈分异特点的富碱性火山岩及相关铀矿床大都在侏罗纪-白垩纪构造-岩浆作用对前侏罗纪岩体(层)发生强烈叠加改造部位产出, 其形成作用可能与晚侏罗世-早白垩世构造-岩浆活动有关。同位素年代学(铀矿床铀-铅同位素测年)研究表明, 铀矿体的形成时间为 153~136 Ma, 该时间段与其所在的多尔诺德组安山-玄武岩和流纹岩的形成时间基本一致, 同时, 与俄罗斯远东地区斯特尔特苏维卡(Streltsovsk)超大型铀矿床的形成时代(136~134 Ma)相吻合。矿区范围内富钾流纹岩铀含量较高(300×10^{-6} 左右), 暗示了这套火山岩可能为铀矿床的矿源层。另外, 流纹岩中熔融包裹体铀含量($14 \sim 25 \times 10^{-6}$)进一步印证了上述推论的可靠性。与富钾长英质岩浆作用有关的热液活动对早期含铀岩体(层)的叠加改造可导致铀的进一步富集, 进而形成大规模和高品位铀矿体。大量黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和白铁矿等硫化物的存在暗示了成矿作用是在还原条件下形成的。大多数砂岩型铀矿床分布在中新生代断陷盆地内, 这些盆地一般为各类沉积岩(物)所充填, 其中河流相、三角洲相和浅海沉积相(物)为铀矿床的容矿围岩。在所有上述沉积岩(物)中, 辫状河流相沉积岩(物)是最重要的含矿层位。砂岩型铀矿床大都是断陷和凹陷带构造运动最后阶段构造-沉积联合作用的

收稿日期: 2014-06-05; 改回日期: 2014-07-14

基金项目: 国家重点自然科学基金项目(41030421)和国家 973 项目(2013CB429805)联合资助。

作者简介: 聂凤军, 男, 1956 年生, 研究员, 博士生导师, 从事金属矿床地球化学研究; E-mail: nfj@mx.cei.gov.cn。

产物。盆地周缘前侏罗纪富铀岩体(层)的风化剥蚀,为砂岩型铀矿床的形成提供了丰富的物质来源。早期构造运动(176~156 Ma)为古潜水面氧化提供了有利条件并且形成了低品位铀矿化区。在晚白垩世(96 Ma)到渐新世(35 Ma)时期,古陆块体抬升与沉降活动期间为氧化作用的发生创造了有利条件,并且为主要砂岩型铀矿床的形成奠定了基础。

中蒙边境火山型和砂岩型铀矿床独特的地质、地球化学特征受到国内外地质学家的广泛关注。对于这些矿床的地质环境,地质和地球化学特征以及其容矿围岩的系统研究将极大地提高人们对于铀矿床成矿作用的理解。与此同时,对这些铀矿床的成因类型和勘查标志的研究也将在中蒙边境及其邻区开展隐伏铀矿床的综合评价中发挥重要作用。

关键词:火山岩型铀矿床;砂岩型铀矿床;叠加成矿作用;前侏罗系变质岩体;时空分布规律;中蒙边境地区
中图分类号:P619.14 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)04-1037-22

1 问题提出

与锡、铁、铜和钨等金属元素一样,铀也是地壳中一种常见的金属元素。海水、沉积岩和花岗岩中铀的平均含量分别为 0.003×10^{-6} 、 $(2 \sim 3) \times 10^{-6}$ 和 $(3 \sim 5) \times 10^{-6}$ 。大陆地壳铀的平均含量为 2.8×10^{-6} ^[1-4]。尽管铀是一种常见的金属元素,但是具有开采价值的铀矿石其铀富集程度是地壳丰度值的357倍(表1),究竟是什么样的地质营力能够导致铀的高度富集,是矿床地质学家历来十分关注的科学问题^[1-2]。根据国际原子能署有关部门制定的标准,极低品位和低品位铀矿石铀的含量分别为 100×10^{-6} 和 1000×10^{-6} ,高品位和极高品位矿石铀的含量分别为 $20\,000 \times 10^{-6}$ 和 $200\,000 \times 10^{-6}$ 。根据国际原子能署公布的数据,全世界已确定铀资源量为533万t,未发现铀资源量为1 043万t^[3-4],目前全世界共有440座商用核反应堆,发电能力为

3 750亿W,其消耗的铀金属量为63 875 t。有专家预测,到2035年前,全世界核能发电能力为5 400亿W到7 460亿W,铀的消耗量为97 465 t到13 6385 t^[3]。核能发电厂数量和发电量大幅度增加是导致铀找矿勘查和矿山开发工作一直“高烧”不退的主导因素。根据国际原子能署的数据,2010年全球铀矿找矿勘查费用为20亿美元,比2008年增加了22%。根据目前全球铀资源消耗量,现在已经探明铀资源量可保障供给190年^[3-4]。在已探获的铀资源量(533万t)中,澳大利亚、哈萨克斯坦和俄罗斯铀资源量分别为166万t、63万t和49万t,分别占世界铀资源总量的31%、12%和9%,加拿大、尼日利亚和南非分别为47万t、42万t和28万t,分别占世界总量的9%、8%和5%^[3-4](图1~2)另外,世界上产出规模最大的5处铀矿床分别是:(1)加拿大的麦克阿瑟河(McArthur River)铀矿床,该矿床是世界上矿石品位最高的铀矿床,铀的平均品位大于10%,年产量为7654 t,占全球铀产量的14%;(2)澳大利亚兰吉尔(Ranger)铀矿床,年产量为3 216 t,占全世界年产量的6%;(3)纳米比亚的罗欣(Rossing)铀矿床,为世界上产出规模最大的露天开采铀矿山,年产量为4150 t,占世界年产量的6.9%;(4)俄罗斯的喀拉诺卡门斯克(Kranokamensk,又称红山)铀矿床开采历史长达40年,铀的累计产量为11.7万t,2010年的年产量为2920 t;(5)尼日尔的苏梅尔(Somair)矿床,2012年的年产量为3000 t,矿山设计开采寿命为13年^[3-7]。相比之下,无论在铀矿床数量上,还是在产出规模和矿石品位上,中国和蒙古国均不及上述铀资源大国,其铀资源量分别为16.6万t和5.6万t,分别占世界总量的3%和1%^[2-4,8]。世界主要铀矿资源国已探

表1 地壳中各类岩(矿)石样品铀含量

Table 1 Uranium content of various rocks occurring in the earth crust

岩(矿)石类型	铀含量/ 10^{-6}	铀含量/wt%	备注
极高品位矿石	200000	20	加拿大部分矿山
高品位矿石	20000	2	
低品位矿石	1000	0.1	
极低品位矿石	100	0.01	纳米比亚部分矿山
花岗岩	3~5		
沉积岩	2~3		
古大陆地壳	2.8		
海水	0.003		

注:根据文献[3-4]资料编制。

①按每获取1000克铀的成本为130美元标准计算。

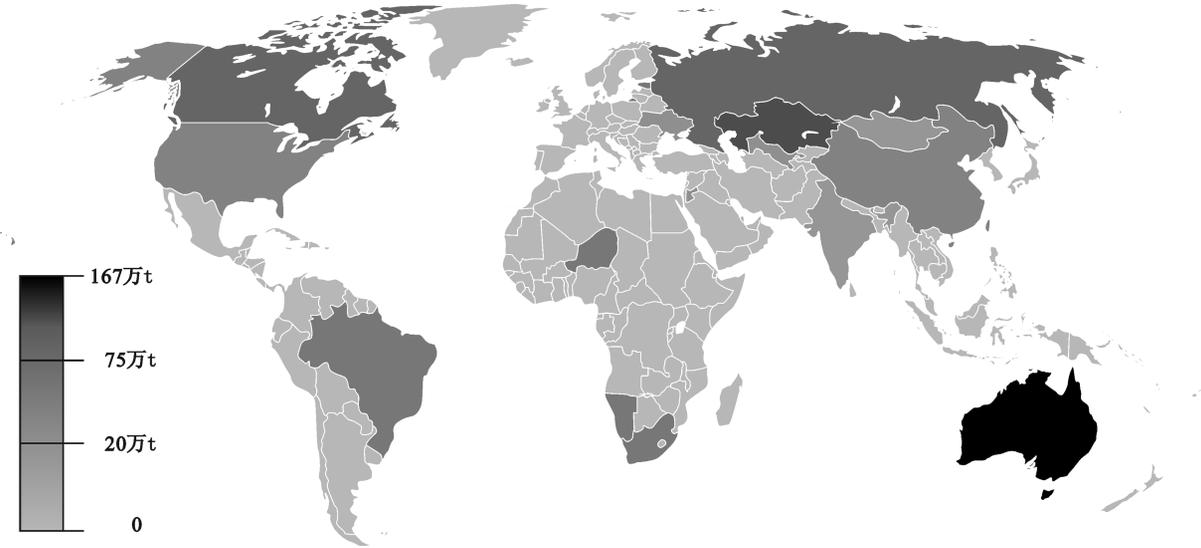


图1 全球铀资源分布简图

Fig.1 Sketch map showing the distribution of the global uranium resources

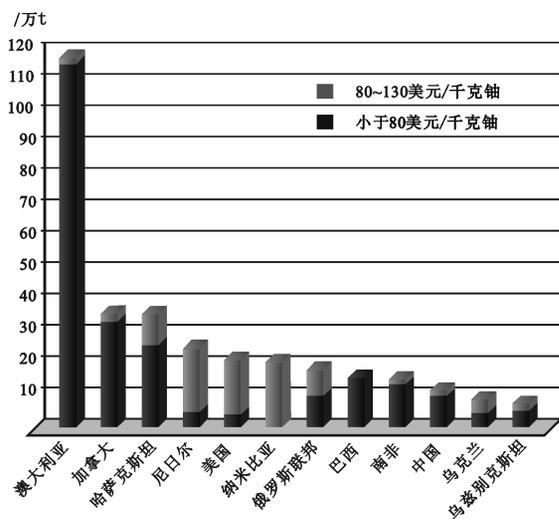


图2 世界各国已探明铀资源量分布图

Fig.2 Sketch map showing the distribution of defined uranium resource of the major uranium-enriched countries in the world

明铀资源量见图2。

中蒙边境及邻区地处中国内蒙古、新疆和甘肃与蒙古国交接地带,东西长2000 km,南北宽200~350 km,面积为70万 km²。从大地构造位置上看,该区地处华北克拉通与西伯利亚板块之间的古生代构造-岩浆岩带内。区内古生代和中生代地层出露

广泛,深大断裂纵横交错,岩浆岩十分发育,含铀火山岩-深成岩杂岩体以及中、新生代沉积盆地星罗棋布,是中亚巨型成矿带的重要组成部分,也是全球范围内最重要的铀多金属成矿带之一,该地区铀矿床的成矿理论研究和找矿勘查工作不仅可以提升我们对中亚造山带地球动力学演化机理研究的水平,而且对于寻找隐伏大型铀矿床和推动国民经济和社会发展均具有重要理论和现实意义^[2,8-10]。

2 地质环境

研究区系统的地质调查和铀矿找矿勘查工作始于20世纪50年代中期,迄今为止,中小比例尺(1:100万和1:50万)区域地质调查和物化探测量工作已基本完成,同时,关键地段1:20万和1:5万区域矿产地质调查和评价也取得了重要进展。通过上述工作,中、蒙、俄3国地质工作者先后在中蒙边境两侧发现各类铀矿床(点)千余处。代表性矿床有中国境内的宅火壕、纳岭沟、阿卜亥、大营、苏崩、努和廷、赛罕高毕—巴彦乌拉、塔木苏和测老庙;蒙古国境内的铀矿床主要有珠维持敖包(Zoovch Ovoo)、多尔诺德(Dornod)、古尔万布拉格(Gurvanbulag)、杜兰乌尔(Dulaan Uul)、海尔罕(Khairkhan)、哈拉特(Kharaat)、乌尔兹特(Ulziit)、尼梅尔(Nemer)和古

尔万赛罕(Gurvansaikhan)。在前述所有铀矿床中,多尔诺德和古尔万布拉格矿床以产出规模大、品位高和易采选为特征,两处矿床已探明铀资源量分别占蒙古全部铀资源量的20.7%和11.58%^[2,11-12](表2)。

2.1 区域地质

中蒙边境及邻区地处华北、塔里木、哈萨克斯坦和西伯利亚板块的汇聚地带,属中亚—蒙古造山带的核心部位。研究区主要由一系列南凸的弧形构造形迹和岩浆岩带组成,其中蒙古主线性构造(MML)位于蒙古中部,并且将整个蒙古划分为南、北两部分,分别为加里东期和海西期造山带^[9-10,13-16]。需要提及的是,蒙古南部和北部造山带分别由17处和27处构造—地层单元(地体?)所构成,其构造属性分别属克拉通块体、岛弧带、增生地楔、蛇绿岩带和弧后(前)盆地^[17]。考虑到本文所要讨论的铀矿床(点)大都分布在南蒙古海西期造山带与中国境内华北克拉通北缘及背部的古生代造山带内,因此,这里仅对中蒙边境及邻区的成矿地质环境进行概要论述。

研究区范围内除了广泛分布有古生界和中新生界火山—沉积岩外,局部地段出露有中、新元古界变质岩,其中由斜长角闪岩、片麻岩、混合岩、大理

岩和石英岩所组成的变质岩块体大多呈弧岛状或条带状产出,并且为各类古生界火山—沉积岩所挟持、包裹,属古生代构造—地层单元中的中间地体。奥陶系分布范围有限,主要出露在研究区西部和西北部,呈弧岛状或条带状产出,岩石组合为玄武岩、安山岩、凝灰岩、片岩、板岩、千枚岩和石英岩。志留系大都分布在研究区中部和中东部,岩石组合为安山岩、英安岩、流纹岩、板岩、硬砂岩和灰岩。与前述奥陶系和志留系相比,泥盆系以地层分布范围广、出露厚度大、层序较齐全和岩性组合复杂为特点,代表性岩石类型有英安岩、流纹岩、粉砂岩、泥岩、板岩和生物灰岩。需要指出的是,无论是志留系和泥盆系中酸性火山岩,还是它们的泥页岩和碳酸盐及其有关的角岩和矽卡岩均可构成铜—锌、金、锌和银多金属矿床的容矿围岩^[9,13-16]。石炭系火山—沉积岩分布范围仅次于泥盆系,代表性岩石类型有安山岩、英安岩和流纹岩以及板岩、砂岩和灰岩。二叠系出露范围有限,主要出现在研究区的中东部和东部,岩石类型有英安岩、流纹岩、火山角砾岩、砂岩、板岩、凝灰岩和生物碎屑灰岩。受地壳隆升和剥蚀作用影响,研究区范围内很难观察到三叠系露头。侏罗系和白垩系以分布范围广、厚度变化大

表2 中蒙边境蒙古国一侧主要铀矿床(区)资源量和品位一览

Table 2 Tonnage and ore grade of major uranium mineralized districts occurring in Mongolian territory of the Sino-Mongolian border

矿床(区)名称	矿床(区)名称	储量/t	平均品位/(wt%)	所占比例/%
珠维持敖包	Zoovch Ovoo	5.46	0.023	40
多尔诺德	Dornod	2.80	0.154	20.7
古尔万布拉格	Gurvanbulag	1.60	0.170	11.58
杜兰乌尔	Dulaan Uul	0.9888	0.017	7.32
海尔罕	Khairkhan	0.8406	0.071	6.23
哈拉特	Kharaat	0.7288	0.026	5.39
乌尔兹特	Ulziit	0.2611	0.036	1.93
尼梅尔	Nemer	0.2528	0.146	1.87
古尔万赛罕	Gurvansaikhan	0.2479	0.034	1.84
玛尔岱郭勒	Mardaingol	0.1104	0.16	0.82
乌兰	Ulaan	0.027	0.145	0.2
纳尔斯	Nars	0.10	0.04	0.74
总量		13.5		

注:*根据世界核协会(WNA)和国际原子能署^[2,4,6]资料编制。蒙古国已探明的铀的储量为5.57万t,其余的7.93万t为有可能转化为具有经济价值的铀储量。

和岩性组合复杂为特点,代表性岩石类型有各类熔岩、凝灰岩、砂岩、粉砂岩和泥岩,其中白垩系粉砂岩和砂岩是铀矿床(点)的重要容矿围岩。

研究区内不同规模和各种走向断裂构造极为发育,其中一系列近东西向、北东向和北西向深大断裂不仅是古板块(体)的碰撞、对接和俯冲带,同时也是岩浆和含矿流体上升运移的通道,断裂带两侧星罗棋布的金属矿床(点)和各类超镁铁质火成岩即是很好的证据。另外,研究区内不同规模和各种类型的侵入岩十分发育,除了局部地段见有镁铁质到超镁铁质侵入岩株(墙或脉)外,大部分地区产出有加里东期、海西期、印支期和燕山期花岗岩基、岩株和岩脉群,主要岩石类型有二长岩、闪长岩、花岗闪长岩、花岗岩、正长岩、碱性花岗岩、煌斑岩和碳酸岩。在所有上述侵入岩体内,海西期钙碱性二长岩和花岗闪长岩与铀、铜(金)和铜(钼)矿床(点)具有密切时空分布关系,而印支期碱性花岗岩和正长岩则是稀有(土)金属矿床的成矿主岩。需要指出的是,尽管海西期煌斑岩脉和燕山期碳酸盐脉分布范围十分有限,但是它们分别与多金属矿床(点)和稀土金属矿床(点)具有密切成因联系,其本身就是矿体的组成部分。

2.2 时空分布

有数据表明:中蒙边境蒙古国一侧的铀矿床(点)主要分布在既蒙古—普里阿尔贡(Mongol-Priargun)地区、戈壁—塔木察(Gobi-Tamtsag)地区、肯特—达斡尔(Khentei-Daur)地区和北蒙古(North Mongolian)地区^[2,9,18-19]4个区域(图3)。

2.2.1 蒙古—普里阿尔贡铀矿集区

该区位于蒙古国东北部,铀矿床(点)主要在中蒙古—额尔古纳前寒武纪地块的中生代裂陷盆地内产出,与晚侏罗世—早白垩世火山—次火山岩或沉积岩(物)具有密切时空分布关系。含铀火山—沉积岩带的长度和宽度分别为1200 km和70~250 km,不同产出规模和各种形态的含铀沉积盆地星罗棋布,并且产出有一系列砂岩型铀矿床。代表性中生代含铀沉积盆地有乔伊尔(Choir)、古尔万赛罕(Gurvansaikhan)、海尔罕(Khairkhan)、奥森诺尔(Oshiin-nuur)、塔万苏维特(Tavansuveet)和温都尔希尔(Undurshil)。个别沉积盆地中也产出有褐煤型铀矿化带。代表性砂岩型铀矿床有乔伊尔

(Choir)盆地中的哈拉特铀矿床。代表性火山岩型铀矿集区有马尔岱(Mardai)、马尔岱郭勒(Mardaingol)和古尔万布拉格(Gurvanbulag),代表性单一铀矿床有马尔岱(Mardai)、图尔根(Turgen)和乌戈塔木(Ugtam),哈铀银—铅—锌矿床有巴彦东(Bayandun)、穆哈尔(Muhar)、查夫(Tsav)和乌兰(Ulaan);含铀萤石矿床有巴伦苏(Baruun)、胡布拉格(Hubbulag)和呼鲁伊(Khooloy);含铀钼矿床为阿尔布拉格(Arbulag)和阿达尔陶勒盖(Avdar Tolgoy);含铀钨矿床有础伦—胡尔特(Chuulun-Khuriete);含铀金矿床有乌尔利诺宾(Urlinobin)。

2.2.2 戈壁—塔木察铀矿化集区

位于蒙古南部与中国内蒙古相毗邻地区,北东—南西向长度为1400 km,宽度为60~180 km,主要由塔木察(Tamtsag)、赛因山达(Sainshand)、宗巴彦(Zunbayan)、温都希尔(Undurshil)白垩纪含铀沉积岩盆地所构成,其中代表性矿床为赛因山达盆地中的纳尔斯(Nars)矿床。

2.2.3 肯特—达斡尔铀矿集区

位于蒙古国中北部地区的杭盖和肯特山区。长度和宽度分别为700 km和250 km,铀的矿化类型大体可以划分为2类:(1)与稀土元素共生,在中生代浅色花岗岩体破碎带内呈脉状产出,代表性矿床为杰安旗齐瓦兰(Janchivlan)铀—钍和稀土元素矿床;(2)在新生代沉积盆地中呈细脉、网脉和浸染状产出,构成似层状和透镜状砂岩型铀矿体,代表性矿床为杭盖北部的楚鲁特(Chuluut)矿床。

2.2.4 北蒙古(The North Mongolian)铀矿化集中区

地处蒙古国北部蒙俄边境一带,东西长1500 km,南北宽450 km,各种类型铀矿床均有产出,主要与新元古界和古生界构造—岩浆岩带具有密切时空分布关系^[2,9,18-19]。

尽管迄今为止,在中蒙边境中国一侧尚未找到产出规模较大的火山岩型铀矿床,但是该区中生代含铀沉积盆地星罗棋布,并且产出有特大型和特大型砂岩型铀矿床。在所有这些盆地中,鄂尔多斯、二连盆地和巴彦戈壁盆地以矿床产出数量多、资源储量大和矿石品位相对高位特征,代表性矿床有鄂尔多斯盆地中的皂火庙、纳岭沟、乌力圭庙和银东铀矿床,其中皂火庙矿床是在中国找到的首处特大型铀矿床;二连盆地代表性矿床有努和廷超大

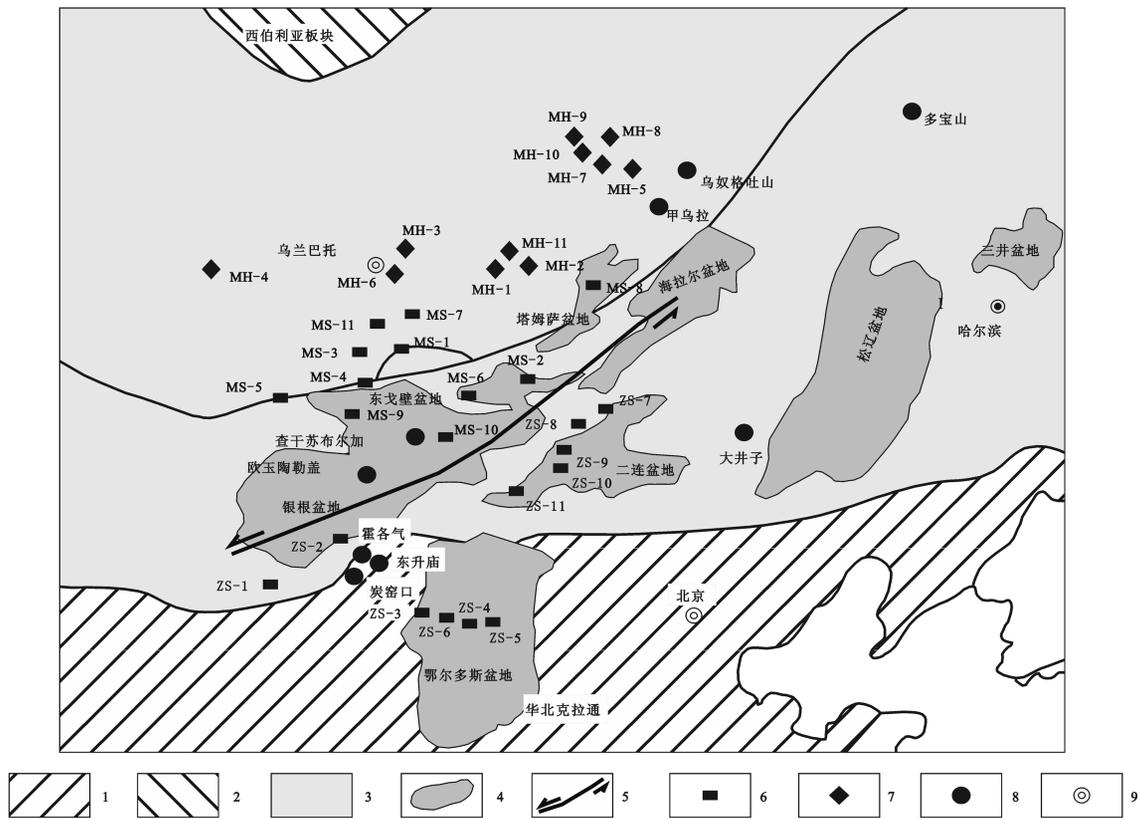


图3 中蒙边境火山岩型和砂岩型铀矿集区和代表性铀矿床分布简图(据文献[2,9,11]改编)
 1—前寒武纪华北克拉通;2—前寒武纪西伯利亚板块;3—古生代兴安造山带;4—中生代含铀沉积盆地;5—深大断裂;6—砂岩型铀矿床及编号;7—火山岩型铀矿床及编号;8—其他金属矿床;9—国家首都
 砂岩型铀矿床(我国境内):ZS-1—塔木苏;ZS-2—测老庙;ZS-3—大营;ZS-4—纳岭沟;ZS-5—皂火壕;ZS-6—阿卜亥;ZS-7—巴彦乌拉;ZS-8—赛汉高毕;;ZS-9—苏崩;;ZS-10—努和廷;;ZS-11—查干。砂岩型铀矿床(蒙古国境内):MS-1—乔伊尔(含哈拉特铀矿床)含铀沉积盆地(矿集区);MS-2—东戈壁含铀沉积盆地;MS-3—古尔万赛罕含铀沉积盆地;MS-4—海拉尔含铀沉积盆地;MS-5—奥森诺尔矿床;MS-6—赛音山达矿床;MS-7—包伦多尔矿床;MS-8—乔巴山含铀沉积盆地;MS-9—温都希尔铀矿床;MS-10—宗巴彦铀矿床;MS-11—塔万苏维特矿床。火山岩型铀矿床(蒙古国境内):MH-1—巴特诺洛夫;MH-2—博尔科矿区;MH-3—中部矿区;MH-4—额尔登特(城镇);MH-5—恩格尔山德矿床;MH-6—吉安齐瓦兰矿床;MH-7—额尔德斯(城镇);MH-8—马尔岱矿床;MH-9—图尔根矿床;MH-10—乌格塔姆矿床

Fig. 3 Sketch geological map of Sino-Mongolian border region showing the distribution of sandstone type and volcanic type uranium deposits and related concentrated areas(modified after references[2,9,11])
 1—North China craton; 2—Siberian plate; 3—Higgan-Mongolian orogenic belt; 4—Mesozoic-Cenozoic uranium-bearing sedimentary basin; 5—Deep-rooted faults or fault zones; 6—Sandstone type uranium deposits and its serial number; 7—Volcanic type deposit and its serial number; 8—Other major metal deposits; 9—National capital city
 Sandstone type U deposits in Chinese territory: ZS-1-Tanmusu; ZS-2-Celaomiao; ZS-3-daying; ZS-4-Nalinggou; ZS-5-Zaohuomhao; ZS-6-Abuhai; ZS-7-Bayanwula; ZS-8-Saihangaobi; ZS-9-Supang; ZS-10-Nuheting; ZS-11-Chagan; Sandstone type U deposits in Mongolian territory: MS-1-Choir U-bearing sedimentary basin including Kharaat U deposit; MS-2-Eastern U-bearing sedimentary basin; MS-3-Gurvansaikhan deposit; MS-4 -Khairhan U-bearing sedimentary basin; MS-5-Oshiin U deposit; MS-6-Sainshand U deposit; MS-7-Borundur U deposit; MS-8-Choibalsan U-bearing Sedimentary basin; MS-9-Undurshil U deposit; MS-10-Zunbayan U deposit; MS-11- Tavansuveet U deposit. Volcanic type U deposit in Chinese territory: ZH-1-Ha Hinggan-Ergun U mineralized area; Volcanic type U deposit in Mongolian territory: MH-1-Batnorov U deposit; MH-2-Berkh U mineralized area; MH-3-Central U mineralized area; MH-4-Erdenet (town or village); MH-5-Engershand U deposit; MH-6-Janchivlan U deposit (related to granite massif); MH-7-Erdes (town or village); MH-8-Mardai U deposit; MH-9-Turgen U deposit; MH-10-Ugtam U deposits

型沉积岩型铀和赛汗高毕—巴彦乌拉山大型古河谷型砂岩型铀矿床;巴彦戈壁盆地代表性矿床有塔木素、本巴图、恩格尔乌苏、乌力吉和银根铀矿床。上述沉积岩型铀矿床大都出现在不同构造-地层单元的交

界面上,其附近和底部常常产出有前侏罗纪铀含量高花岗岩类侵入岩或火山-沉积岩,并且受中生代断裂构造所控制。一般来讲,此类矿床大都出于半干旱-干旱地区附近,含铀火成岩遭受到强烈的风化

剥蚀作用。受风化剥蚀作用影响,含铀碎屑沿河流被带到盆地的特定部位。强烈的蒸发作用以及由此产生的氧化-还原效应致使大量钒钾铀矿和钙钒铀矿堆积,进而形成石膏、钒酸酯、含石膏的钙铀云母和钒钾铀矿为矿物组合的铀矿体。伴生的矿物有方解石(钙质结砾岩)、石膏、白云石、岩盐以及含褐铁矿胶结物的细砂岩和粘土^[8,11-12]。

2.3 铀矿床及其类型

2.3.1 铀及铀矿床

有数据表明,地壳中铀的丰度值为 2×10^{-6} ,其在自然界中主要呈+4价和+6价出现,其中具有+6价态的铀活动性较高,并且可以溶于水。相比之下,+4价态的铀不溶于水,活动性较差。尽管+4价态铀很少能够取代 Ca^{2+} 进入磷灰石和萤石的矿物格架,并且很难与某些矿物中的Zr、W、Nb和Ta等这样的+5价阳离子发生置换,但是可以取代其他+4价金属元素进入许多矿物的晶格,因此,自然界产出的许多矿物均含有微量和痕量铀^[1,20-21]。另外,在自然界中,铀的同位素分别为 ^{238}U (99.28%)、 ^{235}U (0.71%)和 ^{234}U (0.0054%),其中 ^{235}U 可以发生裂变,并且被广泛应用于核反应堆。自然界最常见的含铀矿物为沥青铀矿,其他含铀矿物还有橙黄铀矿(铀含量为68%)、深黄铀矿(铀含量为72%)、硅钙铀矿(铀含量为40%)、硅镁铀矿(铀含量为55%)、钙铀云母(铀含量为48%)、砷硅铀矿(铀含量为46%)、钒钾铀矿(铀含量为53%)、钙钒铀矿和钒铅钡铀矿;水硅铀矿(铀含量为72%)、钛铀矿(铀含量为33%)和铁钛铀矿(铀含量为3%),在所有上述含铀矿物中,前9种矿物通常为称为黄矿,后3种矿物被称为黑矿^[1]。

2.3.2 矿床分类

根据容矿围岩岩石学特征和控矿构造特点,人们将数以万计的铀矿床(点)划分为若干个大类和十几种亚类。迪尔^[1,5-7,22-23]的铀矿床分类方案首先将铀矿床划分为岩浆型、构造型和沉积岩型,在此基础上又将它们进一步划分为几十个亚类。其分类方案简述如下:

岩浆岩型铀矿床包括6个亚类,分别为:侵入岩为主岩铀矿床(1.1);与伟晶岩有关铀矿床(1.2);变质交代岩型铀矿床(1.3);矽卡岩型铀矿床(1.4);中到酸性火山岩为主岩铀矿床(1.5);与火山角砾岩有关的铀-铜矿床(1.6)。

与构造有关的铀矿床包括3个亚类;分别是与不整合面有关的铀矿床(2.1)和脉状矿床(2.2)和角砾岩杂岩体(2.3)为主岩矿床;其中前者又可以进一步划分为2个类型,分别为类脉状铀-金-镍矿床(2.1.1)和银-铋-钴-镍-铀矿床(5元素矿床)(2.1.2),而脉状矿床(2.2)同样可以划分为多元素金属矿床(铀-铅-锌-铜)(2.2.1)和单一铀-钛-钼矿床(2.2.2)。

沉积岩型铀矿床可以进一步划分为8个亚类:地表矿床(3.1);砂岩型矿床(3.2);此类矿床可以进一步划分为3个亚类,它们分别是前卷式矿床(3.2.1);板状矿床(3.2.2);和构造-岩性矿床(3.2.3);灰岩为主岩矿床(3.3);石英砾岩型矿床(古砂矿床)(3.4);黑色页岩型矿床(3.5);磷酸盐型矿床(3.6);褐煤型矿床(3.7);有机质放射性重晶石矿床(3.8)。

2.4 中蒙边境铀矿床类型

迄今为止,沿中蒙边境两侧找到的铀矿床类型共有六大类,分别是:(1)与晚侏罗世和早白垩世富碱性英安岩和流纹岩以及中酸性侵入岩脉群具有密切时空分布关系的火山岩型矿床;(2)中生代沉积盆地以及古河道内产出的砂岩型矿床;(3)中生代浅色花岗岩地块断裂带内产出的岩脉型矿床;(4)下白垩统褐煤层裂隙带内产出的褐煤型矿床;(5)碱性花岗岩和正长岩岩体钠长石化蚀变带中产出的蚀变岩型含稀土元素铀矿床;(6)白垩纪古大陆碎屑沉积岩(物)中产出的以含铀磷灰石为主要组分的磷灰盐型矿床^[2,12]。有数据表明,在目前经济和技术条件下,可以开发利用的矿床只有火山岩型和砂岩型铀矿床^[2]。

2.4.1 火山岩型铀矿床

主要指那些在流纹质和英安质火山岩以及火山碎屑岩中产出的脉状,网脉状和板状铀矿体,矿体产出形态和规模取决于火山带中断裂和剪切带的空间分布形态和复杂程度,另外,浅成-超浅成富碱中酸性侵入岩脉(群)为铀矿床的形成提供了热力、动力和部分物质来源,特别是在热液流体对循环过程中起到了“发动机”作用。在含矿火山口附近,铀通常与钼、氟、汞和硒伴生。铀矿体中铀的品位与铀-钛矿物含量具有明显的正相关关系,暗示了成矿作用与火山活动存在有密切成因联系。世界上产出规模最大的火山型铀矿床是俄罗斯的特斯特尔特苏维卡(Streltsovka)铀矿床,矿石矿物主

要为沥青铀矿、铀石、黄铁矿、方铅矿、辉钼矿、钛铀矿和萤石。火山岩型铀矿床的形成时代为 (142 ± 7) Ma^[2,32, 34-35]。澳大利亚、意大利、墨西哥、蒙古和俄罗斯均是火山岩型铀矿床产出数量较多的国家。另外,中国东南沿海中生代火山-沉积岩盆地内也产出有一定数量的火山岩型铀矿床。

2.4.2 砂岩型铀矿床

主要指那些在中新生代沉积岩(物)盆地中产出规模大、矿石品位较低和易于提取回收的铀矿床。澳大利亚、美国、哈萨克斯坦、纳米比亚和蒙古均是此类矿床产出数量较多的国家。中国鄂尔多斯盆地、二连盆地和巴彦戈壁盆地砂岩型铀矿床找矿勘查也获重要突破。此类矿床大都出现在不同构造-地层单元界面上,与含铀矿物伴生的矿物有方解石(钙质胶结砾岩)、石膏、白云石和岩盐以及含褐铁矿胶结物的细砂岩和粘土。一般来讲,此类矿床的附近大都产出有前侏罗纪含铀花岗岩类侵入岩或火山沉积岩,其分布范围和产出形态受中生代构造形迹所控制。在半干旱-干旱环境中,含铀火成岩遭受到强烈的风化剥蚀作用。受风化剥蚀作用影响,含铀碎屑沿古河谷被带到盆地的特定部位。强烈的蒸发作用以及由此产生的氧化-还原效应导致钒钾铀矿和钙钒铀矿发生沉淀堆积,进而形成以石膏、钒酸酯、含石膏钙铀云母和钒钾铀矿为组合的铀矿体。另外,研究结果表明,钙质胶结砾岩可以有效地捕获含铀矿物,进而形成铀矿体。在德国纽伦堡三叠纪砂岩铀矿区,地质学家还发现存在有含铀石膏层,钙质砾岩和硅结砾岩,除前述钙钒铀矿和钒钾铀矿外,还在砂岩型铀矿体中找到钒铅钼铀矿(钒酸钼)。在美国德克萨斯州部分砂岩型铀矿区,铀矿体赋存在盆状盐丘的顶部。富含硫化氢流体与砂岩中石膏层的水-岩反应,特别是当含铀氧化地下水与碳氢化合物发生混合作用时,可产生大量含铀矿物,并且导致铀矿体的形成^[1,5-6,20,24-25]。

3 代表性铀矿床(区)

3.1 中蒙边境中国一侧铀矿床(区)

中蒙边境中东段中国一侧中生代沉积盆地星罗棋布,分布面积大都在几万到数十万平方千米,其中个别盆地产出有大型到超大型砂岩型铀矿床。例如鄂尔多斯盆地内产出的皂火壕、纳岭沟、

阿卜亥和大营铀矿床;二连盆地内产出的巴彦乌拉、赛罕高毕、苏崩和努和廷铀矿床;巴彦戈壁(银根)盆地中的塔木苏和测老庙铀矿床。三个主要含铀沉积盆地基本地质特征简述如下。

3.1.1 鄂尔多斯含铀沉积盆地

该盆地为一处典型的叠加盆地,即中生代和古生代盆地相互叠合。主要由一条南北翘起,东翼宽长、西翼短陡的不对称向斜所构成,分布面积为25万km²。盆地的基底为华北克拉通变质岩和火山-沉积岩,盖层以中生界为沉积主体,发育山麓相、河流相、湖相碎屑岩,局部见有新生界湖相和风积相碎屑岩。野外地质调查结果表明,铀矿化带(体)大多沿盆地边缘分布或者在盆地内部油气田之间分布,主要含矿层位为中侏罗统直罗组沉积岩,这套地层呈单斜状产出,向南西缓倾斜,倾角为1°~5°,埋深100~600 m,厚度50~200 m。地层对比结果显示,中侏罗统直罗组大体可以划分为上、下2个岩性段:上部岩性段段为杂色中细砂岩和泥岩,厚度20~80 m。下部岩性段可进一步划分为上部和下部2个亚段,其中下亚段主要是含矿灰色砂岩,上亚段为次要含矿灰绿色、灰色砂岩、泥岩;含铀砂体岩石地球化学分带明显,主要存在有氧化带、氧化还原过渡带和还原带,其基本地质特征简述如下:

(1)氧化带:在地表为褐黄色,钻孔中为浅灰绿色、浅灰蓝色,前锋线长度大于100 km;(2)氧化-还原带:该带的前锋线呈近东西到北西向展布,为复杂的蛇曲状,宽度为5~20 km;(3)氧化-还原过渡带:该带代表性岩石呈灰色、浅灰色,富含有机质和结核状黄铁矿;(4)还原带:该带代表性岩石呈灰色,富含有机质,可见结晶状黄铁矿。铀矿化主要沿砂岩层间氧化还原带的前锋线分布,铀矿体多呈板状和透镜状,局部地段为卷状,铀含量变化范围为1~6 kg/m²,平均值4 kg/m²左右,局部地段可达20 kg/m²以上,具有规模大、品位高的特点。含铀辫状河相砂体河流冲刷面清晰,呈整合或假整合覆盖于中侏罗统煤系地层之上。考虑到上侏罗统和上白垩统之间部分地层缺失,并且出现有数个沉积间断面,由此推测,当时的气候条件可能是由潮湿转变为干旱,进而为铀沉淀富集和成矿提供了有利条件。已经发现的矿床有皂火壕特大型铀矿床、纳岭沟大型铀矿床、登壕-罕台庙大型铀矿床和银东中

型铀矿床^[11,26]。如前所述,鄂尔多斯盆地内产出的砂岩型铀矿床,特别是东胜一带产出的矿床与中蒙边境蒙古国一侧产出的砂岩型铀矿床存在有明显差别。前人通过对鄂尔多斯铀矿床,特别是对东胜铀矿化集中区各个矿床的研究,建立了古层间氧化-还原带成矿模式,即层间预富集层-层间渗入流体成矿-再次改造富集-还原性流体保护。具有经济价值的铀矿床(体)是多其构造-流体作用对矿源层多期次改造作用的结果^[27-29]。

鄂尔多斯盆地内产出的砂岩型铀矿床,特别是东胜一带产出的矿床与伊犁盆地和吐哈盆地中的铀矿床存在明显差别。前人通过对鄂尔多斯铀矿床,特别是对东胜铀矿化集中区各个矿床的研究,建立了古层间氧化-还原带成矿模式,即层间预富集层-层间渗入流体成矿-再次改造富集-还原性流体保护。具有经济价值的铀矿床(体)是多期构造-流体作用对矿源层多期次改造作用的结果^[27-29]。

3.1.2 二连含铀沉积盆地

该盆地叠加在兴蒙古生带中部构造-岩浆岩带之上,白垩纪沉积盆地,分布面积13万km²,燕山期拉张断陷和喜山期抬升剥蚀构造作用是导致该盆地形成的主要原因。盆地的盖层为断陷湖盆沉积和拗陷沉积岩(物),其中:下白垩统断陷湖相盆地是寻找石油天然气的目标层位,也是盆地沉积岩(物)的主体。下白垩统巴彦花群地层由阿尔善组、赛汉组和腾格尔组所构成,这套地层的分布范围和产出形态主要受盆地内部凹陷和凸起控制,厚度一般大于1000 m,最厚处可达4000 m。早白垩世之后,该区处于整体抬升状态,受其影响,断陷湖盆地迅速夭折衰亡,断陷盆地沉积岩逐渐为古河谷型沉积岩所取代,与此同时,气候条件也潮湿向干旱转变,下白垩统巴彦花群赛汉组、上白垩统二连组、古近系脑木根组和伊尔丁曼哈组以及新近系通古尔组和宝格达组即是在上述地质环境中产出的一套河流相沉积岩(物),其总厚度为300 m左右,最厚处可达800 m。一般来讲,含矿古河谷带呈北东向延伸,长度大于200 km,宽度1~20 km,含矿层为辫状河流相砂岩,埋深80~200 m,厚度100~200 m。矿体呈卷状和板状产出,铀的平均含量为1~4 kg/m²,平均值约2 kg/m²,局部可达6 kg/m²以上,具有埋藏浅和易浸出的特点。已发现的矿床有努和廷超大型

铀矿床和赛汉高毕-巴彦乌拉大型铀矿以及一系列矿床(点)^[11-12]。

前人研究结果表明,二连盆地是在前侏罗纪微陆块基础上发展起来的一个断拗沉积盆地,盆地由一系列彼此孤立的小凹陷所组成。铀矿床类型主要为潜水-层间氧化带砂岩型铀矿床,盆地铀矿床的成矿作用可划分为以下3个阶段^[30]:(1)挤压隆升剥蚀阶段,二叠纪后,研究区全面进入陆内伸展构造运动阶段:中生代早期印支运动产生一系列北西向和北东向挤压隆起,并且发生强烈风化剥蚀作用;(2)拉张断陷沉积阶段:中生代中晚期,受东部古太平洋板块和北部鄂霍茨克洋板片与欧亚大陆相互作用影响,研究区产出有一系列北西和北东向展布的拉张断陷盆地,并且为陆相含煤碎屑岩所充填;(3)抬升萎缩阶段:新生代时期,喜马拉雅运动致使研究区发生明显抬升,形成北东和北北东向展布,并行排列的隆升和沉降带,其中后者接受了陆相红色碎屑岩沉积,局部见有玄武岩。前人研究认为,受不等规模和不同时代构造叠加作用致使研究区所在地域抬升和沉降具有明显不均一特征,受其影响,二连盆地各个地段无论在含矿沉积岩分布范围和产出厚度,还是在水动力系统连通性和氧化-还原条件方面均存在有明显差异,因此,尽管矿床类型主要为潜水-层间氧化带砂岩型铀矿床,但是盆地各个地段矿床的几何形态和产出规模变化较大。

3.1.3 巴音戈壁含铀沉积盆地

该盆地是叠加在海西期构造-岩浆带上的中生代盆地,主要由3处拗陷和1处隆起所构成,3处拗陷是该盆地西北部的苏红图拗陷、南部的尚丹拗陷和东部的查干德勒苏拗陷,隆起为该盆地中部的宗沙隆起,分布面积为5.4万km²。含铀沉积盆地主要为下白垩统巴音戈壁组沉积岩所充填,盆地边缘岩(体)层出露较好,整套地层大体可以划分为3个岩性段:下部岩性段为红-杂色砾岩、砂砾岩和极少量动植物碎屑;中部岩性段为灰色、黑色泥岩、碳酸盐岩、油页岩夹砂砾岩,并且富含大量生物化石;上部岩性段为杂色泥岩夹砂岩,含少量被子植物化石,是巴音戈壁盆地最重要的含铀地层单元,厚度100~3000 m。另外,在宗沙隆起的南北两侧均发育有一套火山岩夹碎屑岩地层,被命名为苏红图组,这套地层呈近东西向展布,出露厚度大于600 m,向

北、东和西3个方向岩层厚度逐渐变薄,岩性以中基性熔岩为主,并且夹有少量火山碎屑岩。除该盆地塔木素一带工作程度相对较高外,盆地其余地段工作程度均很低。找矿勘查结果表明,下白垩统巴音戈壁组属重要含矿层位,其上段为盆地入口部位形成多个由若干“指状”砂泥岩互层构成的扇型三角洲,其周边为铀含量很高蚀源区。铀矿体上叠加有不同颜色的多层氧化带褐红色,一般来讲,铀矿化带多沿砂岩体的氧化界面分布,部分地段出现厚大富矿体。铀矿体的埋深变化范围为187~646 m,厚度为0.5~9 m,铀含量为0.051%~0.707%,部分高品位矿体埋藏相对较深。已经发现的矿床有塔木素大型铀矿床。另外,本巴图、恩格尔乌苏、乌力吉、银根和迈马乌苏等找矿有利地区的找矿勘查工作也正在如火如荼进行之中,实现本区铀矿找矿突破指日可待^[11-12]。

前人研究结果表明,巴音戈壁盆地是走滑拉分构造背景下形成的含铀沉积盆地、铀矿床(体),特别是塔木素一带铀矿床(体)的形成作用大体可以划分为早期沉积-成岩作用阶段和晚期后生氧化作用阶段^[31]。(1)早期沉积-成岩作用阶段:含铀基底岩体(层)(早侏罗世)的风化剥蚀导致早期含铀地层或“矿胚”的形成。另外,受压实和固结成岩作用影响,成矿组分(铀)再次发生分配和富集,特别是那些渗透性较好的砂质岩层,铀在成岩过程中被带出,进而在富含还原性组分的泥质岩石发生富集,并且形成泥岩型铀矿化体。(2)晚期后生氧化作用阶段:含铀泥质岩层早期(红色)氧化作用和晚期(黄色)氧化作用均可能造成铀的再次富集,并且形成具有工业价值的矿体^[31]。

3.2 中蒙边境蒙古国一侧的铀矿床(区)

如前所述,中蒙边境东段的的马尔岱(Mardai)(又称多尔诺德-Dornod)火山岩型铀矿化集中区位于蒙古国东北部的东方省,西距蒙古首都乌兰巴托市600 km,南距乔巴山(Choibalsan)市90 km,是蒙古最重要的铀矿化集中区(图4)。迄今为止,人们在该区范围内已发现火山岩型铀矿床(点)几十处,其中代表性的铀矿床有多尔诺德(Dornod)、古尔万布拉格(Gurvanbulag)、马尔岱郭勒(Mardaingol)和尼梅尔(Nemer)。已探明的可采铀储量为5万t,品位0.16%。上述四处铀矿床的储量占蒙古国铀可采

总量的90%以上。除了单一铀矿床之外,矿化集中区范围内还产出有含铀银-铅-锌矿床、萤石矿床、金矿床、钼矿床和钨矿床。代表性含铀银-铅-锌矿床有巴彦东(Bayandon)、穆哈尔(Muhar)、查干(Tsav)和乌兰(Ulaan),含铀萤石矿床和金矿床分别为巴润苏(Bsruun-su)、胡布拉格(Hubblag),胡鲁伊(Khooloy)和乌尔李诺宾(Urlinobin),代表性含铀钼矿床为阿尔布拉格(Arbulag)和阿尔达瓦—陶勒郭伊(Avdar-Tolgoy),含铀的钨矿床为础伦—呼芮特(Chuulun-Khuriete)^[2,32]。

1989年到1995年间,俄-蒙合资矿业公司对多尔诺德、古尔万布拉格和马尔岱郭勒铀矿床进行过露天和井下开采,铀矿石的年产量为200万t左右。1989年、1992年和1995年铀的金属产量分别为94 t、105 t和20 t。受诸多因素影响,铀矿山的开采活动止于1995年。在1989年到1995年间的7年间,人们从马尔岱矿化集中区共生产铀金属量535 t,为蒙古经济和发展做出了应有贡献^[18-19,32-33]。

前人研究结果表明,马尔岱矿化集中区地处中蒙古—额尔古纳前侏罗纪古陆块的中东部,其主体是一处发育在前侏罗纪变质岩块体上的中生代火山-沉积岩盆地。铀矿床(点)大都在中生代火山-浅成侵入岩的杂岩体内产出,产出规模和几何形态明显受中生代各种断裂破碎带控制。矿化集中区出露的地层自下而上大体可以划分为前侏罗纪结晶基底和上侏罗统到下白垩统火山-沉积岩盖层。前者主要由元古宇和古生界片麻岩、绿片岩、混合岩、片岩、大理岩和斜长角闪岩所构成。前寒武纪和古生代花岗岩类侵入岩分布广泛,并且侵入到前侏罗纪变质岩块体之内。中生界火山-沉积岩层从下向上大体可以划分为3个岩性段:(1)下部岩性段,主要岩性组合为玄武岩、粗面流纹岩、英安岩和流纹岩以及与其岩性相对应的火山碎屑岩,局部地段见有含生物化石碎片和有机物的粗砂岩、粉砂岩和砂岩,岩层厚度400 m左右;(2)中部岩性段,主要由流纹岩、流纹质凝灰岩、玻璃状霏细岩、火山角砾岩和集块岩,岩层厚度为500 m左右;(3)上部岩性段,主要岩石类型有流纹岩、粗面流纹岩和粗面安山岩,岩层厚度大于1000 m。铀矿化大都呈浸染状、网脉状和脉状在碱性火山岩和钙碱性火山-沉积地层中产出,并且构成各种几何形态和不等产出规

模的板状、透镜状和脉状矿体^[2,32,34-35]。

如前所述,中蒙边境蒙古国一侧除了产出有火山岩型铀矿床外,中生代含铀沉积岩盆地更是星罗棋布,代表性盆地有乔伊尔(Choir)、东和中戈壁(Eastern Gobi and Mid-Gobi)、古尔万赛罕(Gurvansaikhan)、奥森诺尔(Oshiinn-Nuur)、塔万苏维特(Tavansuveet)、温都尔希尔(Undurshil)、乌尔兹特(Ulziit)、赛音山达(Sainshand)和宗巴彦(Zuunbayan),其中乔伊尔盆地中产出的哈拉特(Kharaa)矿床以产出规模大和品位高为特点^[2,12,26,32]。

考虑到多尔诺德、古尔万布拉格、马尔岱郭勒火山岩型铀矿床以及乔伊尔含铀盆地和哈拉特砂岩型铀矿床为本区最为重要的铀矿床和含铀盆地,其基本地质特征简述如下:

3.2.1 多尔诺德矿床

该矿床地处马尔岱矿化集中区的中部,人们在20 km²范围内先后发现和圈定有12个矿段,每个矿段大都由2个或2个以上的矿体所构成,代表性矿段分别为2、3、4、5、7、8、9、10、11和12号,其中7号矿段位于整个矿床的中部,由9个矿体所构成,以产出规模大和品位高为特征。铀矿化主要在马尔岱含铀火山-沉积岩地层下部岩性段呈网脉状、脉状和浸染状产出,并且构成板状和透镜状矿体。铀矿体的容矿围岩为枕状安山质熔岩夹陆相和湖泊相沉积岩。矿体的长度和宽度变化范围为500~800 m和260~450 m。已探明的铀矿石量为1.4万t,占整个矿床资源量的49%,矿石铀的平均含量为0.23%。2、3和9号矿段位于该矿床的北部和东部,其中2号

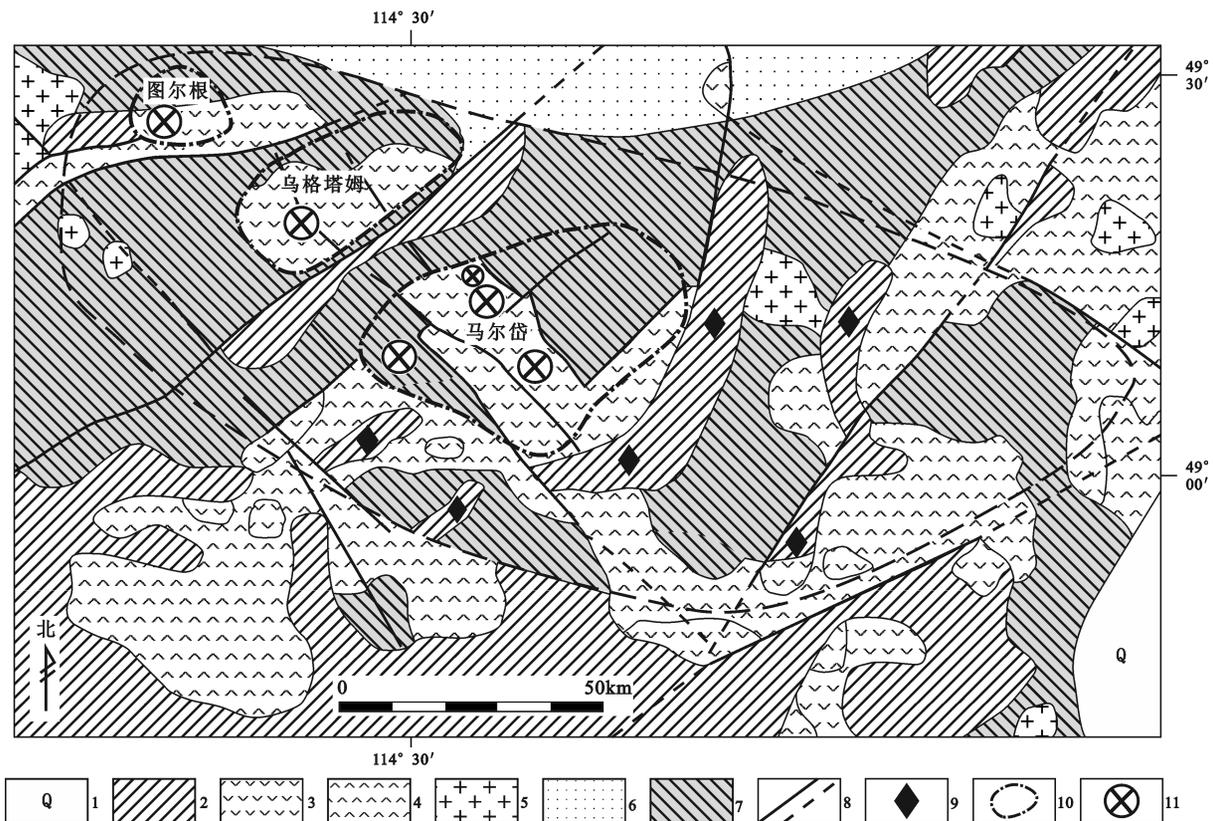


图4 中蒙边境蒙古国图尔根—马尔岱铀矿化集中区地质简图(据文献[2]改编)

1—第四系;2—早白垩世沉积盆地;3—晚侏罗世—早白垩世中酸性火山岩;4—晚侏罗世—早白垩世中基性火山岩;5—晚古生代—早中生代花岗岩和闪长岩;6—中生界砂岩和板岩;7—前寒武纪变质岩和火成岩;8—断裂;9—褐煤矿床(点);10—铀矿区;11—铀矿床(点)

Fig.4 Simplified geological map of the Turgen-Mardai uranium mineralized area occurring on Mongolian side of the Sino-Mongolian border(modified after reference [2])

1-Quaternary; 2-Early Cretaceous sedimentary basin; 3-Late Jurassic to Early Cretaceous acid-intermediate volcanics; 4-Late Jurassic to Early Cretaceous basic-intermediate volcanics; 5-Late Paleozoic to Early Mesozoic granite and diorite; 6-Middle Paleozoic sandstone and slate; 7- Precambrian metamorphic and igneous rocks; 8-Faults; 9-Lignite deposits (ore spots); 10-U mineralized area; 11-U deposits (ore spots)

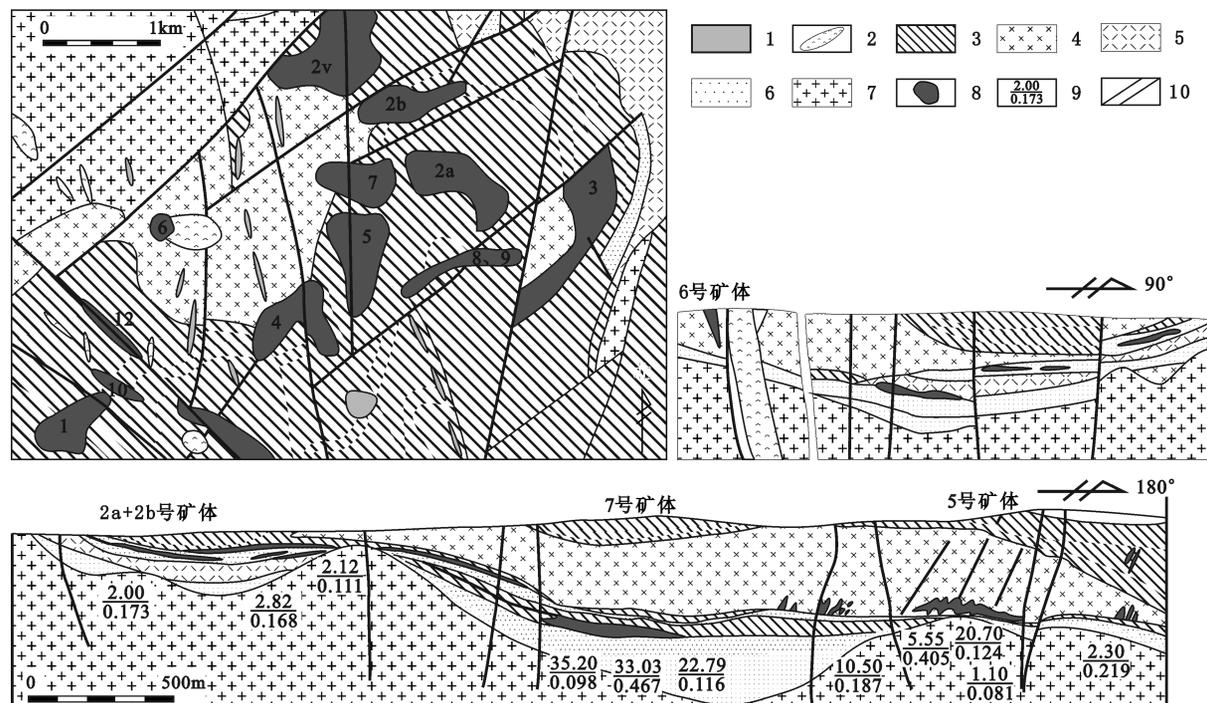


图5 中蒙边境蒙古国马尔岱铀矿床地质简图(根据文献[2]资料改编)

1—上侏罗统—下白垩统多尔诺德组安山—玄武岩脉和喷出岩;2—上侏罗统—下白垩统多尔诺德组流纹岩;3—多尔诺德组中部岩性段酸性火山岩;4—奥长流纹斑岩;5—多尔诺德组下部岩性段安山—玄武岩和火山角砾岩;6—砂岩、细砂岩、凝灰岩和砾岩;7—早古生代花岗闪长岩;8—铀矿体;9—铀矿体厚度和品位(厚度单位为m,品位为wt%);10—断层

Fig.5 Schematic geological map of the Mardai U deposit occurring on Mongolian side of the Sino-Mongolian border region (modified after reference [2])

Andesitic basalt dyke and extrusion of Upper Jurassic to Lower Cretaceous Dornod Formation; 2—Rhyolite dyke and extrusion of Upper Jurassic to Lower Cretaceous Dornod Formation; 3—Feldspathic-quartz volcanics; 4—Oligophyric rhyolite; 5—Andesitic basalt and breccias; 6—Sandstone, siltstone, tuffite, conglomerate; 7—Early Paleozoic granodiorite; 8—U orebodies; 9—Thickness (meter) and ore grade (wt%); 10—Faults

和3号矿段均由3个矿体组成。铀矿化大都呈网脉状、细脉状和浸染状在马尔岱含铀火山—沉积岩地层中部和下部岩性段流纹岩与炭质组分含量较高的沉积岩接触带产出,并且构成板状和透镜状铀矿体,2号和3号矿段已探明的铀资源量分别为8000 t和1700 t,分别占整个铀矿床资源量的26%和6%。4号、5号和8号矿段位于多尔诺德矿床的中部,相比之下,1号、6号、10号、11号和12号矿段位于多尔诺德矿床的西部和西南部。铀矿化大多在玻璃状长英质凝灰岩中呈浸染状和网脉状产出,并且构成脉状和透镜状矿体。单个矿体的长度为几米到50 m,厚度为0.5 m到20 m。4号、5号和8号矿段的矿石量占整个矿床全部资源量的28%,矿石铀含量变化范围为0.05%到1%。另外,需要指出的是,铀矿体的产出规模和几何形态受陡倾斜断裂带、角砾岩带和剪切带控制^[2,32]。

3.2.2 古尔万布拉格矿床

地处马尔岱矿化集中区的中西部,东部距多尔诺德矿床10 km。迄今为止,人们在北东—南西长度为9000 m,宽度为1500~4000 m范围内发现和圈定矿段若干处,每个矿段均由若干个矿体所组成。铀矿化大都在长英质熔结凝灰岩、流纹岩、玻屑凝灰岩和少斑流纹岩中呈浸染状和网脉状产出,并且构成透镜状和板状矿体。板状矿体可以从地表一直延伸到750 m的地壳深部,各个平行展布的矿体间隔为1540 m。矿体的横切面为几十平方米到0.5 km²。厚度为0.6~10 m,个别达30 m。铀的资源量为1.7万t,其中9000 t矿石铀的平均含量为0.2%,其余矿石的平均品位大都低于0.2%。铀矿石中碳酸盐和萤石的含量分别为0.6%和2%。需要提及的是,铀矿体的产出规模和几何形态主要受古尔万布拉格断裂及其次级断层破碎带控制,并且与浅成—

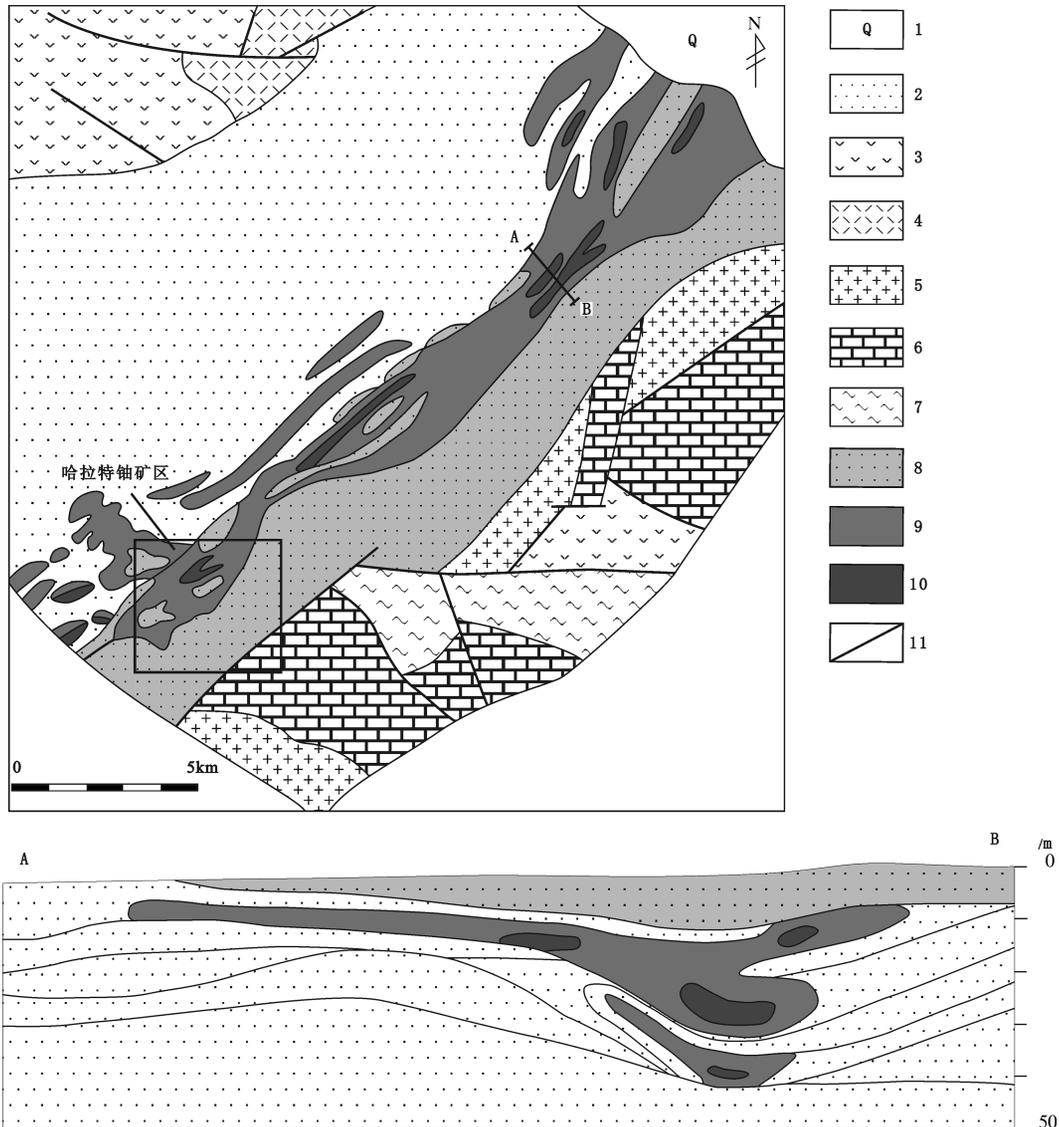


图6 中蒙边境蒙古国乔伊尔含铀白垩纪沉积盆地及哈拉特铀矿床地质简图(据文献[2]改编)

1—第四系;2—早白垩世含褐煤层砂岩和细砂岩;3—晚侏罗世到早白垩世玄武岩、玄武安山岩和安山岩;4—二叠纪长英质火山岩;5—早古生代黑云母花岗岩;6—元古宙灰岩和大理岩;7—元古宙片岩和片麻岩;8—地表氧化带;9—低品位铀矿体(铀含量为0.01%~0.05%);10—高品位铀矿体(铀含量大于0.05%);11—断层

Fig.6 Schematic geological map of the Choir Cretaceous U-bearing sedimentary basin including the Kharaat U deposit occurring on Mongolian side of the Sino-Mongolian border region(modified after reference [2])

1-Quaternary; 2-Lower Cretaceous lignite-bearing sandy and pebble sediments;3-Late Jurassic and Early Cretaceous basalt, basaltic-andesite and andesite; 4-Permian felsic volcanics; 5-Early Paleozoic biotite granite;6-Proterozoic limestone and marble; 7-Proterozoic schist and gneiss; 8-Surficial oxidation zone; 9-Uranium orebodies with low ore-grade (U:0.01%-0.05%); 10-Uranium orebodies with high ore-grade (U more than 0.05%);11-Fault

超浅成二长闪长岩、石英二长岩和二长花岗岩脉存在有密切时空分布关系^[2,32]。

3.2.3 马尔岱郭勒矿床

该矿床位于马尔岱矿化集中区中北部,东南方向距多尔诺德矿床5 km。该矿床主要由2个矿化

区,7处矿段构成,每个矿段包括2处以上的矿体。与前述马尔岱和古尔万布拉格矿床相比,该矿床各矿体以产出规模较小、分布零星和连续性差为特点。迄今为止,该矿床探明的铀资源量为1100 t,平均品位0.12%。铀矿化主要在上侏罗统一白垩统

火山-沉积岩地层内呈浸染状、细脉状和网脉状产出,并且构成板状、透镜状和脉状矿体。含矿火山-沉积岩与下伏的前侏罗世片麻岩和花岗岩类侵入岩呈不整合接触关系^[2,32]。

3.2.4 乔伊尔哈(Choir)铀沉积岩盆地

该含铀盆地位于蒙古首都乌兰巴托市东南方向250 km处。矿集区分布范围大体与乔伊尔白垩纪沉积盆地所在位置相重合。乔伊尔盆地的长度为150 m,宽度为2~8 km。铀矿化区范围内砂岩型和褐煤型铀矿床(点)星罗棋布,其中哈拉特(Kharaat)铀矿床以产出规模大和矿石品位高为特点。迄今为止,整个矿集区已探明的铀资源量为9万t,其中哈拉特矿床铀资源量为1万余t,占整个矿集区铀资源量的12%。野外区域地质调查结果表明,乔伊尔盆地主要由基底和盖层两个构造-地层单元所构成,基底岩体(层)为前寒武纪大理岩、片岩、片麻岩和角闪岩以及古生代花岗岩、伟晶岩和流纹岩。整个基底岩层(体)厚度大于1000 m。盖层呈毯状不整合覆盖在基底岩层(体)之上,主要岩石类型有早白垩世河流、湖泊和沼泽相沉积岩、含硫化物和植物碎屑泥岩、砂砾岩和褐煤层以及第四纪碎屑沉积物(图6)。整个盖层的厚度大于1500 m^[2]。

3.2.5 哈拉特砂岩型铀矿床

位于乔伊尔盆地西南部,铀矿化区呈北东-南西向展布,长度和宽度分别为20 km和0.5~2.5 km。整个铀矿床可以被划分为南和北2个矿段(图6)。

(1)南矿段

含铀沉积岩大体可以划分为上、下2个层位,铀矿化在上部层位。

含有机质黏土和砂岩层中呈浸染状产出,并且构成板状铀矿体,厚度为0.5~6m,铀含量变化范围为0.02%~0.05%。同样,铀矿化在下部层位的砂岩中呈浸染状和条带状产出,并且构成若干透镜状矿体,厚度为2~12 m,铀的含量为0.1%或更高。

(2)北矿段

铀矿化在砂岩和富含有机质的粘土层内呈浸染状和团块状产出,并且构成透镜状和条带状矿体,矿体的厚度一般小于15 m,铀含量大于0.1%或更高。含铀沉积岩(物)大体可以划分为2大类:一为灰色或浅棕色粉砂岩和粘土层,厚10~50 cm;二为未遭受到氧化作用影响的含铀黑色粘土层,其有

机质含量可达8%。迄今为止,在哈拉特铀矿床南北两个矿段内,先后发现铀矿体5处,其中南矿段3处,北矿段2处。单个矿体长度变化范围为300~600 m,宽度为50~60 m,厚度为0.5~17 m。一般来讲,高品位铀矿体大都为不规则条带状和低品位铀矿化带所包裹,长度为400~2500 m,宽度为50~300 m,厚度为1~3 m,埋藏深度为0.5~45 m。整个铀矿床铀含量变化范围为0.02%~0.07%^[2,32]。

3.3 铀矿床矿物学和热液蚀变特点

考虑到火山岩型和砂岩型铀矿床,无论在产出环境、地质特征和找矿标志方面,还是在控矿因素和形成作用等诸多方面存在明显差别,这两类矿床在矿物组合和热液蚀变类型上也不完全一样。两类铀矿床矿物学和热液蚀变特征简述如下:

(1)火山岩型铀矿床

此类矿床主要矿物组分为铀石和沥青铀矿,铀铀矿、含铀白钛石和榍石含量较少。在矿体的氧化带内产出有硅钙铀矿、 β -硅钙铀矿、板铅铀矿、铬膨润石和硒铅铀矿,其他金属矿物包括毒砂、黄铜矿、方铅矿、白铁矿、辉钼矿、黄铁矿、闪锌矿和赤铁矿,脉状矿物主要有石英、黑云母、水云母、蒙脱石和绿泥石。另外,有少量钾长石、萤石、云母、铁白云石、方解石、菱铁矿、重晶石和白钛石。局部地段具有绢云母、电气石、锆石、钛磁铁矿和铀钛矿。有关的热液蚀变类型主要有硅化、钾长石化、绢云母化、绿泥石化、碳酸盐化、蒙脱石化、水云母化、高岭石化和赤铁矿化,其中水云母化、蒙脱石化和赤铁矿化与铀矿化有明显的时空分布关系,赤铁矿化的强度与铀含量高低呈正相关关系。一般来讲,围绕铀矿化带(矿体)均会出现铀-铅-锌-银-钼地球化学异常,其产出规模为铀矿体(带)2~3倍,为人们寻找此类矿床提供了有效的找矿标志。

(2)砂岩型铀矿床

此类矿床含铀矿物主要有铀石(水硅铀矿)、钙铀云母、钽磷铀矿、磷铀矿、沥青铀矿;脉石矿物有高岭石、水云母、石英和方解石。在部分砂岩型铀矿化区,地表处褐铁矿化极为发育,蚀变带可从地表一直延伸至30 m的深部。其他代表性蚀变类型有高岭石化、水云母化、硅化和碳酸盐化,局部地段绿泥石化和绿帘石化分布广泛,并且是判别氧化带与还原带界限的重要标志性蚀变类型^[2,32]。

4 矿床成因与找矿标志

4.1 火山岩型铀矿床

中蒙边境火山岩型铀矿床主要在蒙古国东北部马尔岱地区产出。尽管人们对此类矿床的成因尚存在有不同的意见,但是大都认为铀矿床是火山作用及相关流体活动的产物^[2,9,32,34-37]。如前所述,中蒙边境火山岩型铀矿集区的地层-构造单元主要由前侏罗纪变质火山-沉积岩及侵入岩基底和中新生代盖层所构成。前侏罗纪构造-岩浆活动可以诱发铀在火山-沉积岩地层中发生初步富集,并且在局部地段形成铀的矿源层或“矿胚”,进而完成成矿前期物质准备(ground preparation)工作。晚侏罗世—早白垩世时期,受太平洋板片对欧亚大陆俯冲和对接的影响,中蒙古—额尔古纳陆块发生大规模伸展构造作用,强烈的构造-岩浆作用及其流体活动可以直接在构造有利部位形成具有工业价值的铀矿体^[2,32]。有学者对含铀富碱性流纹岩及其所含的熔融包裹体进行过系统研究,结果表明,含矿酸性火山岩熔融包裹体一般都含有大量石英、少许钾长石、斜长石、黑云母和锆石,上述这些矿物同样镶嵌在中酸性火山岩以及流纹(石英)斑岩的基质中。钾长石 Or 含量为 91~94,斜长石 An 含量为 20~32。晚期碳酸盐和萤石一般出现在裂隙带内产出,赤铁矿则出现在蚀变岩绢云母集合体内。富碱性火山岩中出现的球粒状和珍珠状结构暗示其曾发生过脱玻璃化作用。部分富碱性火山岩样品中的铀含量可达 0.1%,并且含有钛铀矿、水硅铀矿和含铀锆石以及氟碳铈矿和菱铈矿^[35-36]。另外,含铀流纹岩和流纹质角砾岩以富硅和碱质组分(K_2O+Na_2O),而贫铁、钙、镁、锰、钛和磷为特征。 SiO_2 和(K_2O+Na_2O)含量变化范围分别为 72.87%~78.85%和 11%~13%,铁含量为 1.0%~2.2%。铈和钽含量分别为 $(49\sim 93)\times 10^{-6}$ 和 $(4.2\sim 8.2)\times 10^{-6}$,稀土元素含量为 $(205\sim 288)\times 10^{-6}$,钍、铀、钍含量变化范围分别为 $(32\sim 53)\times 10^{-6}$ 、 $(63\sim 157)\times 10^{-6}$ 、 $(257\sim 418)\times 10^{-6}$ 。含铀酸性火山岩熔融包裹体与其所寄存火山岩具有相似的元素地球化学特点。 SiO_2 和碱性组分(K_2O+Na_2O)含量变化范围分别为 72.8%~74%和 8.5%~12.0%,氟含量为 0.8%~3.5%,铀和钍含量变化范围分别为 $(13.6\sim 24.9)\times 10^{-6}$ 和 $(21\sim 49)\times 10^{-6}$,稀土元素、

钍和铀含量变化范围分别为 $(215\sim 244)\times 10^{-6}$ 、 $(233\sim 263)\times 10^{-6}$ 和 $(53\sim 76)\times 10^{-6}$ 。铈、钽和铈含量变化范围分别为 $(52\sim 76)\times 10^{-6}$ 、 $(11\sim 32)\times 10^{-6}$ 和 $(1\sim 10)\times 10^{-6}$ 。含铀富碱性火山岩及其石英熔融包裹体元素地球化学对比研究结果表明^[35-36],火山喷发作用及其相关流体活动为铀矿床的成矿作用提供了动力、物质和热力来源。需要指出的是,在岩浆流体形成铀矿床的同时,酸性火山岩作用喷发所诱发的流体与受到强烈改造的大气降水混合,并且形成混合流体。此类混合流体与早期形成的含铀火山-沉积岩和铀矿体以及富碱性侵入岩体发生水-岩反应,并且将部分成矿组分从含铀火成岩和沉积岩中淋滤出来。当含矿流体在火山-沉积岩发生流动时,强烈的水-岩反应,特别当含矿流体与含丰富碳质和植物残余物地层发生相互作用时,成矿热液体系氧化-还原条件的变动可以导致含铀矿物发生沉淀堆积,进而形成铀矿床^[35,37-39]。铀矿化集中区各类尺度的构造变动,特别是一系列陡倾斜断层破碎带、剪切带、火山角砾岩带的形成为含铀流体的上侵运移和沉淀富集创造了有利空间条件。

综上所述,中蒙边境火山岩型铀矿床的形成演化历史大体可以划分为 3 个历史阶段(图 7):(1)前侏罗纪,特别是新元古代和早古生代构造-岩浆作用导致高铀含量结晶基底的形成,晚侏罗世和早白垩世时期,古陆块体伸展构造作用诱发壳源物质发生重熔,并且形成高铀含量的火山岩和侵入岩。无论是基底岩体(层),还是盖层(体),它们的铀含量均是其他地区同类岩(体)层的数十倍,为铀矿床的形成奠定了物质基础;(2)晚侏罗世到早白垩世时期,大规模区域性伸展构造作用导致含铀中酸性岩浆沿北东向构造破碎带或环状断裂上侵运移或者喷发流动,进而形成含铀火山岩和浅成侵入岩;(3)含铀火山岩和侵入岩大多遭受到强烈水云母化和硅化,蚀变岩中铀和钍含量明显高于新鲜岩石样品。需要指出的是,铀矿化集中区广泛分布的浅成到超浅成侵入岩体不仅是铀矿床形成的“发动机”,而且也是其重要容矿围岩,岩体内部一系列密集裂隙带和隐爆角砾岩带的存在即是很好的佐证。铀矿床的形成过程大体可以划分为以下 3 个阶段:(1)晚侏罗世(136~138 Ma)晚期与侵入岩有关的铀矿化阶段;(2)早白垩世(90~110 Ma)岩浆流体与大气降水

混合并且与围岩发生水-岩反应进而形成浸染状铀矿化带;(3)古近纪混源(地幔源+地壳源)气液流体与大气降水混合,进而形成网脉状铀矿化带^[2,9,32,35,40]。

4.2 砂岩型铀矿床

中蒙边境两侧的构造-地层带单元大都由前侏罗纪基底和中生代盖层所构成,其中前者主要岩石类型有各类火山岩、沉积岩和变质岩以及各种类型

的侵入岩,后者大多为侏罗系和白垩系砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩、玄武岩、安山岩、英安岩和流纹岩以及相对应的火山碎屑岩,其中侏罗纪和白垩纪沉积岩(物)分布广泛并且构成砂岩型铀矿床的容矿围岩^[6,9,42]。

受中生代古大陆内部伸展构造作用影响,前侏罗纪块体的抬升和沉降造就了一系列产出规模大

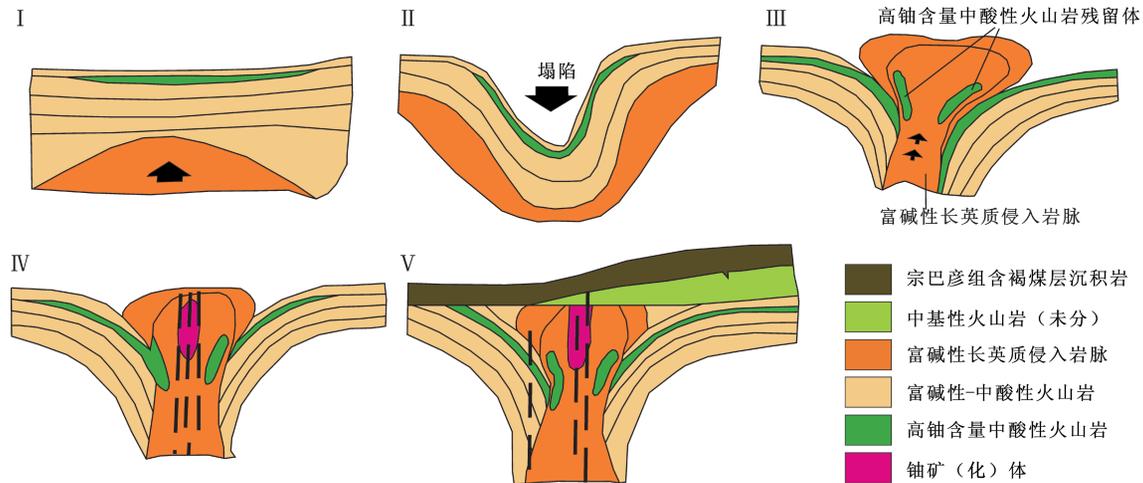


图7 中蒙边境火山岩型铀矿床成矿模式简图

中蒙边境火山岩型铀矿床的形成和演化与古陆壳的演化具有密切成因联系,这里仅以蒙古国图尔根—马尔岱地区铀矿集区为例进行阐述。该区火山岩型铀矿床的形成作用主要有以下5个阶段所构成:(1)成矿物质准备阶段:晚侏罗世到早白垩世,受古大陆内部伸展构造作用影响,中蒙边境最东段额尔古纳一带发生强烈裂陷,并且诱发大规模岩浆活动,进而在蒙古国境内的图尔根—马尔岱地区形成含铀的火山-沉积岩地层及相关铀矿床。需要指出的是,中生代火山-沉积岩地层不整合覆盖在前侏罗纪各类岩(体)层之上;(2)容矿空间准备阶段:在火山-沉积岩形成的同时,持续的和多阶段的构造作用致使含铀岩浆沿北东向断裂破碎带发生脉动式喷发,形成巨厚的中基性和中酸性火山岩,并且最终导致岩浆房塌陷,形成破火山口;(3)初始成矿阶段:随之岩浆不断喷出,岩浆房中的岩浆逐渐从中基性逐渐演化为中酸性,粘滞性和分异性特点明显的长英质岩浆沿构造有利部位侵入,并且形成一系列富碱性长英质岩脉以及火山-沉积岩穹隆边部的角砾岩带,同时,也形成一系列含铀矿脉;(4)主要成矿阶段:在各类长英质侵入岩脉形成的晚期阶段,大规模岩浆流体与大气降水和早期岩体(层)发生水-岩反应并且形成大量的含铀石英脉或构造-蚀变岩。在此之后,含矿岩体(层)和矿体发生褶皱、断裂和风化剥蚀;(5)矿床(体)保存阶段:中晚白垩世图尔根—马尔岱地区再次发生断裂沉降作用,宗巴彦组火山-沉积岩呈毯状覆盖在含铀火山-沉积岩层和早期铀矿体之上,致使其免遭风化剥蚀,起到了很好的保护作用

Fig.7 Schematic genetic model of the volcanic-type uranium deposits occurring in the Sino-Mongolian border region

The ore-forming processes of both volcanic type and sandstone type uranium deposits and mineralized areas were genetically related to the origin and evolution of the ancient continental crust, exemplified by the Turgen-Maridai volcanic type uranium mineralized area: the ore-forming processes of the uranium deposits occurring in the area consist of five stages: (1) Ore-forming materials preparation stage: Late Jurassic to Early Cretaceous period: the intensive extension tectonic event resulted in the formation of a number of rifted basins and fault zones. As parts of the regional tectonic activities, there occurred deposition of the volcano-sedimentary; (2) sequences of the pre-Jurassic geological units and intrusions overlying upper Proterozoic basement. (2) Spatial preparation stage: continual and multiphase tectonic and igneous activities resulted in the formation of a number of fault zones and mafic-intermediate and felsic-intermediate volcanics. Pulsation and finally collapse of the magma chamber led to the formation of caldera and dome complexes; (3) Early ore-forming stage: with the volcanic eruption, the magma might have graded from mafic-intermediate to felsic or peralkaline. Emplacement of the viscous differentiated magma resulted in the formation of a number of volcanic domes or complexes consisting of high K felsic volcanics and intrusive dykes and stocks along the fault zones. Meanwhile, crackle breccias zones occurred along the rims of the volcanic domes. A lot of uranium-bearing veins and altered-fractured zones have been identified in the volcanic complexes and intrusive dykes; (4) Main ore-forming stage: During the last phase of intrusion, a lot of magmatic hydrothermal fluids were released from the peralkaline magma and mixed with the meteoric water. The intensive reaction of the water and wall rocks resulted in the formation of major uranium ore bodies followed by folding, faulting and erosion; (5) Preservation stage of the uranium ore deposits: Middle to Late Cretaceous period: the topographic depression occurred again in the Turgen-Mardai uranium mineralized area, followed by a blanket cover of the lignite-bearing continental sediments of the Zuunbayan Formation which could prevent the ore bodies from erosion

小不等和几何形态各不相同的中新生代断陷盆地,并且接受大量中新生代沉积物的堆积。有同位素年代数据表明^[11,26-28,30-31],前侏罗纪岩体(层)的抬升和风化剥蚀作用始于175 Ma。受到改造的地下水对含铀沉积物的淋滤萃取导致铀含量的增高,并且形成铀的矿源层和矿胚。这种风化剥蚀和搬运沉积作用可一直持续到中白垩世,并且分别在晚侏罗世(154 Ma)和早白垩世(125 Ma)达到高潮期。尽管晚白垩世(96 Ma)和渐新世(32 Ma)研究区范围内构造活动仍以古陆块抬升和风化剥蚀作用为主,但是大规模沉积作用明显减弱,进而为沉积活动期间氧化作用的发生创造了有利条件,有利的氧化-还原环境是导致含铀组分运移、沉淀和富集的主要原因(图8)。砂岩型铀矿床成矿作用的高峰期为85 Ma左右^[2,11,26]。野外地质调查结果表明,多期中新生代构造变动及相关热液流体对早期形成的铀矿体进行过不同方式的叠加改造作用,进而导致矿床(体)规模增大和矿石品位增高。在过去的数十年间,人们对中蒙边境两侧砂岩型铀矿床的产出环境、地质特征、分布规律、形成作用和找矿模型进行过不同程度的研究。尽管人们在此类矿床的成矿机理上存在有一定的意见分歧,均强调下述几个条件对于砂岩型铀矿床的形成至关重要^[26,42-44]。

(1)有利的沉积环境

如前述,中新生代含铀沉积盆地大都由若干不同的沉积岩相所构成,其中辫状河流沉积岩相是最为重要的含铀层位。含铀沉积岩地层由粗粒硬砂岩和泥质岩所组成,前者的厚度变化范围为20~40 m,铀含量为 $(3\sim 5)\times 10^{-6}$ 。最佳含铀层位砂岩和泥岩含量比例为3:1~1:1。鉴于单个砂岩体和泥岩层是相互连通的,因此,上述岩石类型的配比有利于含铀流体的流动,和氧化-还原作用的发生,进而导致含铀组分的沉淀堆积。

(2)有利的成矿条件

大量研究结果表明,中新生代沉积盆地内所发生的氧化-还原作用有利于含铀组分的沉淀和堆积,并形成具有经济价值的铀矿体。氧化-还原环境的变化主要体现在2个方面:①含铀砂岩地层中分布有一定量的还原性物质组分,例如有机质、碳、硫和石油天然气包裹体,其含量变化范围为0.5%~1.5%。还原性组分的存在是6价铀变化为正4价铀必不可少的先决条件。②还原带和氧化带的存在,一般情况下,砂岩型铀矿床(体)大都与含铀地层的氧化带和还原带具有密切时空分布关系。在原生带和氧化带之间存在一过渡带,其产生和演化与古火山喷发所诱发的氧化效应和沉积岩层的层间氧

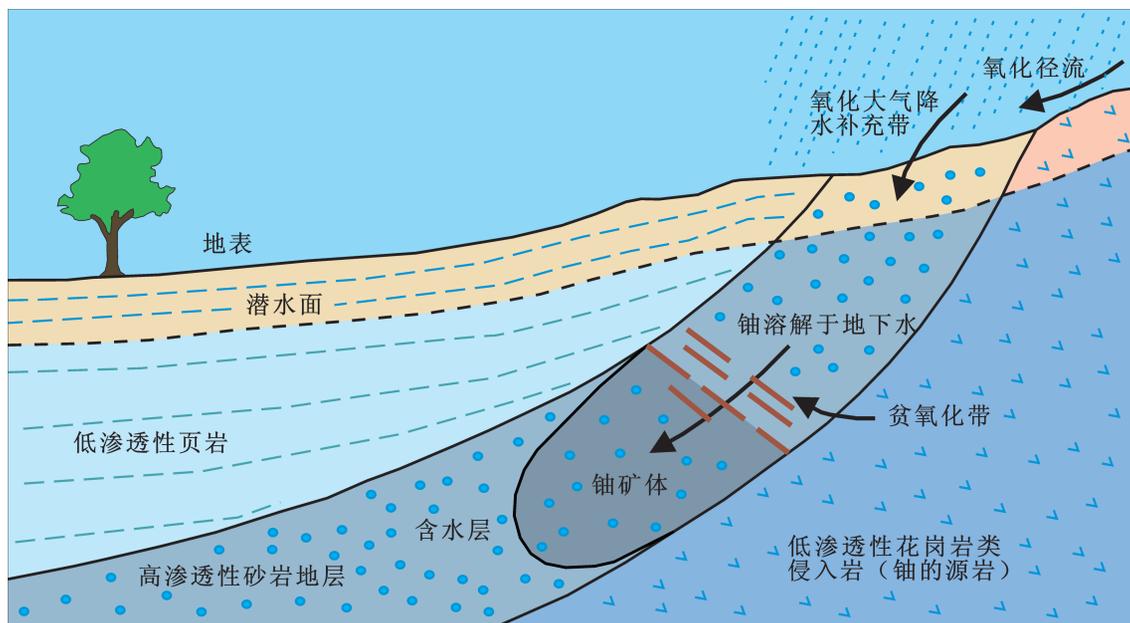


图8 中蒙边境砂岩型铀矿床成矿模式简图

Fig.8 Simplified genetic model of the sandstone-type uranium deposits occurring within the Sino-Mongolian border region

化作用有关。从原生带经过渡带到氧化带,铀、钍、钼、钒、镱和硫含量呈明显降低趋势,水平和垂直分带特征十分明显。在矿物学方面,还原带以含有黄铁矿、有机碳和石油-天然气包裹体为特征,相比之下,氧化带则含有不等量的针铁矿、高岭石和褐铁矿。需要指出的是,部分砂岩型铀矿床(体)曾经遭受到二次还原作用影响,古氧化带内绿色和灰绿色砂岩的存在即是很好的例证。绿色砂岩的形成作用与绿泥石化和绿帘石化有关。铀矿床大都出现在绿色灰色砂岩的过渡带内。另外,早期铀矿体形成之后,区域性深大断裂的活化不仅可以诱发深源含铀流体沿构造有利部位向地表处运移,而且致使部分还原性组分(含石油和天然气组分流体)向上运移,为还原作用的产生创造了有利条件。

(3) 热液叠加改造作用

砂岩型铀矿床(体)中大量铀石(水硅铀矿)的存在表明,铀矿化是在相对较高温度和十分明显的还原条件下发生的。含铀碳酸盐脉流体包裹体研究表明,温度和盐度的变化范围分别为70℃~170℃和8%~20%,暗示铀矿床曾遭受到热液改造作用影响。

(4) 有利的古气候条件

从湿润到干旱或从干旱到湿润的过渡性气候条件有利于含铀组分的沉淀和富集。早期或晚期的湿润环境有利于有机质的产生和保存,晚期或早期燥热的环境有利于氧化作用发生,并且导致铀的活化和迁移。

4.3 找矿标志

4.3.1 火山岩型铀矿床

(1)以前侏罗纪岩层(体)为基底的中、新生代火山-沉积岩盆地,其产出规模和几何形态变化较大;(2)含铀火山岩-沉积盆地主要由渗透性较好的中酸性火山岩和火山碎屑岩以及有机质含量较高的沉积岩所构成;(3)晚侏罗世一早白垩世碱性和富碱性钙-碱性长英质岩脉十分发育;(4)陡倾斜或平缓断层破碎带分布广泛,其中断层的交汇处是厚大的铀矿体产出的有利部位;(5)成矿期前的热液蚀变有云母化和蒙脱石化,同成矿期有泥化、碳酸盐化和赤铁矿化,其中后者与铀矿化具有密切的时空分布关系;(6)尽管含铀矿层(体)风化剥蚀程度相对较低,但是风化剥蚀带可沿主要断裂延伸到较

深的部位;(7)含铀矿物主要为铀的氧化物和硅酸盐,局部地段具有伴生的硫化物;(8)铀矿体为3~5倍于矿体规模的铀、钍、钼和铅异常带(晕)所包裹。

4.3.2 砂岩型铀矿床

(1)以前侏罗纪岩层(体)为基底的中新生代沉积岩(物)盆地,其产出规模和几何形态变化较大;(2)细砂岩、粉砂岩、泥岩和粘土岩以及含有动植物碎屑、碳和硫的沉积物(岩)层构成沉积盆地的主体;(3)基底和盖层中陡倾斜断层破碎带十分发育;(4)铀矿化大都沿透水性存在有明显差异的沉积岩(物)界面呈浸染状产出,并且构成透镜状、毯状和卷状矿体;(5)赤铁矿化、碳酸盐化和水云母化所在部位反映了氧化还原带的存在;(6)含铀矿物有铀石、沥青铀矿、钙铀云母、硅钙铀矿、板菱铀矿、β硅钙铀矿、马水铀矿;其他矿物包括方铅矿、白铁矿、黄铁矿、辉钼矿、石英和碳酸盐。

5 结 论

(1)中蒙边境砂岩型铀矿床(点)大都在中新生代断陷盆地的含有机质黏土层和砂岩透镜体内产出,其形成作用于古陆块体抬升沉降,风化剥蚀和沉淀堆积作用有关,有利的氧化-还原环境和多期成矿期构造变动及热液叠加活动是导致大规模和高品位铀矿床产生的重要因素。

(2)中蒙边境火山岩型铀矿床(点)大多在前侏罗纪地层(体)为基底的中生代断陷盆地内产出,并且与侏罗-白垩纪碱性和富碱性火山岩地层和侵入岩体具有密切的时空分布关系。

(3)中生代时期,受古板块碰撞后古大陆内部伸展构造及太平洋板块对欧亚大陆持续俯冲作用影响,近东西深大断裂多期活化所诱发的深源岩浆上侵和古陆壳重熔以及相关流体活动在构造有利部位形成具有工业价值的铀矿床。

(4)中蒙边境两侧各类铀矿床(点)星罗棋布,并且构成几十处铀矿化集中区,其中以马尔岱、鄂尔多斯、二连、银根和乔伊尔以矿床数量多、单个矿体产出规模大、矿石品位高和易采易选为特征。已经确定的矿床类型有火山岩型、砂岩型、热液脉型、褐煤型、交代岩型(矽卡岩型?)和磷酸盐型。在所有矿床(点)中,具有重要价值的矿床类型分别为火

山岩型和砂岩型。

参考文献(References):

- [1] Dill H G. The “chessboard” classification scheme of mineral deposits: Mineralogy and geology from aluminum to zirconium[J]. *Earth Science Reviews*, 2010, 100: 206–222.
- [2] Dahlkamp F J. Chapter 8 Mongolia, Uranium Deposits of the World-Asia [M]. 2009: 285–311.
- [3] OECD NEA & IAEA. Uranium 2009: Resources, Production and Demand[R]. 2010.
- [4] World Nuclear Association(WNA), 2009 Market Report. Uranium in Central Asia[R]. <http://www.world-nuclear.org>. 2009.
- [5] Cuney, Michel. The extreme diversity [6] Cuney, Michel, Kyser et al., 2009b, Recent of uranium deposits: Mineralium Deposita[J]. 2009, 44:3–9.
- [6] Cuney, Michel, Kyser, et al. Recent and not- so- recent developments in uranium deposits and implications for exploration: Mineralogical Association of Canada, Short Course Series Volume[J]. 2009, 39: 1–257.
- [7] Bagby W C. Descriptive model of volcanogenic U[M]// Cox D P, and Singer D A, (eds.). *Mineral Deposit Models*[M]. U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 1986: 1–162.
- [8] Chen Z B, F M, Xiang W D, et al. Uranium Provinces in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2000, 74(3): 587–594.
- [9] 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 蒙古国南部及邻区金属矿床类型及其时空分布特征[J]. *地球学报*, 2010, 31(3): 267–288.
Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming, et al. Types and temporal-spatial distribution of metallic deposits in southern Mongolia and its neighboring areas[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2010, 31(3): 267–288 (in Chinese with English abstract).
- [10] 聂凤军, 江思宏, 张义, 等. 中蒙边境中东段金属矿床成矿规律和找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2007: 1–574.
Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, et al. *Metallogenic Studies and Prospecting Orientation in Central and Eastern Segments Along China- Mongolia*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1–574 (in Chinese with English abstract).
- [11] 申科峰. 鄂尔多斯、二连、巴音戈壁中新生代沉积盆地铀矿找矿突破及其成果扩大与找矿方向探讨[J]. *中国地质*, 2014, 41(4): 1304–1313.
Shen Kefeng. Investigation on Uranium prospecting Breakthrough and Achievement Expanding and Prospecting direction in Erdos, Erlian, Bayingobi Meso- Cenozoic sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 2014, 41(4): 1304–1313.
- [12] Bonnetti C, Cuney M, Malartre F, et al. The Bayinwula Roll Front-Type Uranium deposit, Erlian basin, NE China[C]//Jonsson E, et al (ed.). *Mineral deposit research for a high- tech world. Proceedings of the 12th Biennial SGA Meeting*, 2013, 4: 1579–1582.
- [13] 内蒙古自治区地质矿产局(内蒙地矿局). 内蒙古自治区区域地质志[M]. 北京: 地质出版社, 1991: 1–725.
Inner Mongolian Bureau of Geology and Mineral Resources (IMBGMR). *Regional Geology of Inner Mongolia Autonomous Region*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1991:1–725 (in Chinese with English abstract)
- [14] 内蒙古自治区地质矿产局(内蒙地矿局). 内蒙古自治区区域矿产总结[R]. 呼和浩特: 内蒙古自治区地质矿产局内部科研报告, 1995: 1–786.
Inner Mongolia Bureau of Geology and Mineral Resources (IMBGMR). *Regional Metallogenic Summary of Inner Mongolia Autonomous Region*[R]. Hohhot: Geological Open File Report, 1995: 1–786 (in Chinese)
- [15] 聂凤军, 江思宏, 张义, 等. 中蒙边境及邻区斑岩型铜矿床地质特征及成因[J]. *矿床地质*, 2004, 23(2): 176–189.
Nie Fengjun, Jiang Sihong, Zhang Yi, et al. Geological features and origin of porphyry copper deposits in China-Mongolia border region and its neighboring areas[J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(2): 176–189 (in Chinese with English abstract)
- [16] 聂凤军, 江思宏, 白大明, 等. 北山地区金属矿床成矿规律及找矿方向[M]. 北京: 地质出版社, 2002: 1–499.
Nie Fengjun, Jiang Sihong, Bai Daming, et al. *Metallogeny and Ore- prospecting of Ore Deposits Occurring within the Conjunction Area of Inner Mongolia, Gansu and Xinjiang (Beishan Mt.), Northwestern China*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002: 1–499 (in Chinese with English abstract).
- [17] Badarch G, Cunningham W D, Windley B F. A new terrane subdivision for Mongolia: implications for the Phanerozoic crustal growth of central Asia [J]. *J. Asian Earth Sci.*, 2002, 20: 87–100.
- [18] Tse Pui-Kwan. The mineral industry of Mongolia: U.S. Geological Survey Minerals Yearbook-2007. 2009, 18.1–18.6.
- [19] Ministry of Industry and Trade of Mongolia(MITM). Current Situation and Future Tendency of the Geology, Mining and Heavy Industry[R]. Ministry of Industry and Trade of Mongolia, 2006: 1–17.
- [20] Nash J T, Granger H C, Adams S S. Geology and concepts of genesis of important types of uranium deposits[J]. *Economic Geology Seventy-Fifth Anniversary Volume*, 1981: 63–116.
- [21] Zielinsk R A, Lindsey D A, Rosholt J N. The distribution and mobility of uranium in glassy and zeolitized tuff, Keg Mountain area, Utah, USA[J]. *Chemical Geology*, 1980, 29: 139–162.
- [22] Mosier D L. Grade and tonnage model of volcanogenic U[C]// Cox D P, Singer D A, (eds.). *Mineral Deposit Models*. U.S. Geological Survey Bulletin 1693, 1986: 162–164.
- [23] Castor S B, Henry C D. Geology, geochemistry, and origin of volcanic rock-hosted uranium deposits in northwestern Nevada and southeastern Oregon[J]. *Ore Geology Reviews*, 2000, 16:1–40
- [24] Cazoulet M. Geologic environment of uranium deposits in Carboniferous and Jurassic sandstones of the western margin of the Air Mountains, Republic of Niger[M]. Vienna, International

- Atomic Energy Agency(IAEA), Geological Environments of Sandstone-type Uranium Deposits, 1985, Teccoc-328: 247-264.
- [25] Nash J T. Volcanogenic Uranium Deposits: Geology, Geochemical Processes, and Criteria for Resourceassessment[R]. U.S Geological Survey, 2010, Open-File Report: 2010-1001.
- [26] Li Ziyang, Fang Xiheng, XiaYuliang, et al. Metallogenetic conditions and exploration criteria of the Dongsheng sandstone type uranium dposit in Inner Mongolia[R]. China Proceedings of 8th Biennial Meeting of Society for Geology Applied to Mineral Deposits 18-21 August 2005, Beijing, China, 2005: 3-19, 291-294.
- [27] 向伟东, 方锡珩, 李田港, 等. 鄂尔多斯盆地东胜铀矿床成矿特征与成矿模式[J]. 铀矿地质, 2006, 22(5): 257-266
Xiang Weidong, Fang Xiheng, Li Tiangang, et al. Metallogenetic characteristics and model of Dongsheng uranium deposit in Ordos basin, North China[J]. Uranium Geology, 2006, 22(5): 257-266
- [28] Xiang Weidong, Fang Xiheng, Li Tiangang, et al. Geology and origin of the Dongsheng uranium deposit in the Ordos basin, North China[C]. Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge. Germany: Springer, 2005, 1-327-330.
- [29] 邢秀娟, 柳益群, 樊爱萍. 鄂尔多斯盆地店头地区砂岩型铀矿成因初步探讨[J]. 中国地质, 2006, 33(3): 591-597.
Xing Xiujuan, Liu Yiqun, Fan Aiping. Genesis of sandstone-type uranium deposits: A case study in the Diantou area of the Ordos basin [J]. Geology in China, 2006, 33(3): 591-597(in Chinese with English abstract).
- [30] 刘武生, 王正邦, 谢佑新. 二连盆地可地浸砂岩型铀成矿的再认识[J]. 铀矿地质, 2004, 20(2): 65-70.
Liu Wusheng, Wang Zhengbang, Xie Youxin. New understanding of ore-formation of in situ leachable sandstone type uranium deposit in Erlian basin[J]. Uranium Geology, 2004, 20(2): 65-70 (in Chinese with English abstract).
- [31] 吴仁贵, 周万蓬, 刘平华, 等. 巴音戈壁盆地塔木素地段砂岩型铀矿成矿条件及找矿前景分析[J]. 铀矿地质, 2008, 24(1): 24-31
Wu Rengui, Zhou Wanpeng, Liu Pinghua, et al. Analysis of metallogenetic condition and prospecting potential of sandstone type uranium deposit in Tamusu district of Bayinggebi basin[J]. Uranium Geology, 2008, 24(1): 24-31(in Chinese with English abstract).
- [32] Mironov, Yu B. Uranium of Mongolia[M]. Centre for Russian and Central Eur-Asian Mineral Studies, Natural History Museum, London, UK, 2006: 1-230.
- [33] Tse Pui-Kwan. The mineral industry of Mongolia.U.S. Geological Survey Minerals Yearbook-2006. 2007, 15.1-15.6.
- [34] Chabiron, Aliouka, Alyoshin A P, et al. Geochemistry of the rhyolite magmas from the Streltsovka Caldera (Transbaikalia, Russia)——A melt inclusion study[J]. Chemical Geology, 2001, 175: 272-290.
- [35] Chabiron, Aliouka, Cuney, et al. Possible uranium sources for the largest uranium district associated with volcanism——The Streltsovka caldera (Transbaikalia, Russia) [J]. Mineralium Deposita, 2003, 38: 127-140.
- [36] Ischukova L P. The Streltsovskoye uranium district[M]. Vienna, International Atomic Energy Agency, Teccoc-961, 1997: 237-250.
- [37] Rytuba J J. Evolution of volcanic and tectonic features in caldera settings and their importance in the localization of ore deposits[J]. Economic Geology, 1994, 89: 1687-1696.
- [38] Leroy J L. George-Aniel, Brigitte, Volcanism and uranium mineralisations——The concept of source rock and concentration mechanism[J]. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 1992, 50: 247-272.
- [39] Zielinski R A. Volcanic rocks as sources of uranium, in Uranium in Volcanic Rocks[M]. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1985, 690: 83-95.
- [40] Leroy J L, Aniel, Brigitte, et al. The Sierra Pena Blanca (Mexico) and Meseta Los Frailes (Bolivia)——The uranium concentration mechanisms in volcanic environment during hydrothermal processes[J]. Uranium, 1987, 3: 211-234.
- [41] Lindsey D A. Volcanism and uranium mineralization at Spor Mountain, Utah[C]// Goodell P C, Waters A C.(eds.). Uranium in Volcanic and Volcaniclastic rocks. American Association of Petroleum Geologists, Studies in Geology, 1981, 13: 89-98.
- [42] Finch W I, Davis J F. Sandstone-type uranium deposits——An introduction, in geological environments of sandstone-type uranium deposits[M]. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1985, Teccoc-328: 11-20.
- [43] Adams S S, Cramer R T. Data-process-criteria model for roll-type uranium deposits, in geological environments of sandstone-type uranium deposits [M]. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1986, Teccoc-328: 383-399.
- [44] Comte D, Blanchere H, Varlet M. Geological environment of the uranium deposits in the Permian of Lodeve basin, France, in Geological environments of sandstone-type uranium deposits[M]. Vienna, International Atomic Energy Agency, 1986, Teccoc-328: 69-82.

Geological setting, features, origin and exploration criteria of uranium deposits occurring within the China–Mongolia border region and its neighboring areas

NIE Feng–Jun¹, LI Qiang–Feng^{1,2}, WANG Jia–Xin^{1,3}, JIANG Zhe^{1,2},
ZHANG Xiao–kang^{1,4}, WU Ke–rui^{1,4}, DING Cheng–wu¹, CAO Yi¹

(1. *Institute of Mineral Resources, CAGS, Beijing 100037, Beijing 100037, China*; 2. *Shijiazhuang University of Economics, Shijiazhuang 050031, Hebei, China*; 3. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China*; 4. *University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China*)

Abstract: The Sino–Mongolia border region and its neighboring areas are located at the convergence zone of the Siberian platform, Tarim plate and North China craton, and is one of the most important uranium metallogenic provinces in the world. Deep–seated faults, pre–Jurassic metamorphic terrane and various types of uranium deposits (mineralized areas) are well developed in the region due to the multiphase tectonic–magmatic events. These uranium deposits can be classified into six types in term of their host rocks, geometry and ore–forming processes: (1) volcanic type; (2) sandstone type; (3) vein type; (4) lignite type; (5) metasomatitic type; (6) phosphorite type, among which the first two types of uranium deposits bear the most important economic significance.

Regional metallogenic studies show that most of the uranium deposits (or mineralized areas) occurring within the Sino–Mongolian border region are closely spatially associated with pre–Jurassic metamorphic terrane consisting of two parts: (1) Precambrian high–grade metamorphic rocks; (2) Paleozoic lightly metamorphic rocks. Since uranium is a lithophile element, it is more easily enriched in the acidic sialic section of the crust during the differentiation of mantle matter. Because these old formations had already been enriched in uranium through the long geological evolution, they might have provided the precondition for economic enrichment of uranium in the Phanerozoic tectonic movements when downfaulted or downwarped continental basins occurred with terrestrial dominated sediments. Where the uranium–enriched geological bodies existing in one region are eroded, all of them can serve as the source for the sandstone–type deposits. The early tectonic event occurring around 176 to 125Ma provided suitable conditions for the oxidization of the groundwater table and the formation of low–grade uranium mineralization area. In the Phanerozoic tectonic–activated regions, the economic enrichment of uranium usually occurred in intensive rejuvenated places of the pre–Jurassic metamorphic terrane. The gradual enrichment of uranium in the sialic crust is mainly achieved through two differential processes: granitization and sedimentary differentiation. However, this combined process is very slow and takes a long time. The ore–forming processes of volcanic type uranium deposits may be an integrated part of the uranium–bearing granitization.

For the volcanic type uranium deposits occurring in the easternmost segment of the Sino–Mongolian border, they were formed during the time of tectonic extension when a number of troughs that were filled with high K–felsic volcanics were formed within the Central Mongol–Argun terrain. Several large–sized Pb–Zn–Ag–U deposits have been identified in the felsic volcanic complexes. Both uranium and fractionated peralkaline magma

were produced by the intensive rejuvenation of the pre-Jurassic metamorphic terrane. The formation processes of the sandstone type uranium deposits might have been genetically related to Late Jurassic to Early Cretaceous igneous activities. Geochronological studies (U-Pb isotopes on uranium ores) demonstrate that the uranium ores formed around 153 to 136 Ma. That time of the uranium ore formation coincides with the formation age of andesitic basalt and rhyolite of the Dornod Formation. Late Jurassic to Early Cretaceous ages are practically equivalent to the formation time of uranium deposits in the Streltsosk caldera in Russia (136–134 Ma). The high K rhyolite is clearly enriched in uranium (about 30×10^{-6}), making it the probable uranium source. The high U content of the melt inclusions (U, 14×10^{-6} – 25×10^{-6}) from the rhyolite provides the further evidence for the hypothesis mentioned above. The Early formed uranium mineralized zones were intensively overprinted by the hydrothermal events associated with the emplacement of the high K-felsic magma. Widespread pyrite, galena, sphalerite and marcasite suggest formation from metastable sulfur species, which are powerful reductants. Most of the sandstone type uranium deposits occur in the Meso-Cenozoic rift basins filled with various sediments. The uranium-bearing layers formed by amalgamation of braided channels deposited in a fluvial, terrestrial delta and offshore environment. All these sandstone uranium deposits were formed at the last stage of Phanerozoic tectonic movement when downfaulted or downwarped continental basins occurred with terrestrial dominated sediments. The Early tectonic event (176–156 Ma) provided suitable condition for the paleo-phreatic oxidation and led to the formation of low-grade uranium mineralized zones. During the period of Late Cretaceous (96 Ma) to Oligocene (35 Ma), the uplifting erosion and sedimentation resulted in suitable condition for the inter-layers oxidation and led to the formation of major sandstone type uranium deposits.

Geological and geochemical features of both volcanic type uranium deposit and sandstone type uranium deposit have attracted much attention among geologists both in China and abroad. The integrated analysis of the geological setting, geological and geochemical features of these deposits and their related wall rocks will greatly upgrade the understanding of the ore-forming processes of the uranium deposits. Meanwhile, the genetic model and mineral exploration criteria of these uranium deposits can also be used during the comprehensive evaluation of the concealed uranium deposits in the China-Mongolia border region and its neighboring areas.

Key words: volcanic type uranium deposit; sandstone type uranium deposit; rejuvenation; Pre-Jurassic metamorphic terrane; spatial-temporal distribution; China-Mongolia border region

About the first author: NIE Feng-jun, male, born in 1956, senior researcher, supervisor of doctor candidates, engages in the study of geochemistry of metal mineral deposits; E-mail: nfjj@mx.cei.gov.cn.