

我国碳酸盐岩型铀矿床成矿特征

姚振凯, 黄宏业, 徐 勇

核工业二三〇研究所, 湖南 长沙

收稿日期: 2022年3月7日; 录用日期: 2022年5月23日; 发布日期: 2022年5月31日

摘 要

本文试图初步总结我国产于灰岩和白云岩内, 碳酸盐岩型铀矿床成矿特征, 该类矿床属我国碳硅泥岩型铀矿床大类中的一个亚类。笔者通过对国外碳酸盐岩铀矿床的文献调查, 及国内相关的10个矿床现场访问考察, 和一个大型矿床的专题研究, 结合前人研究成果, 采用成矿分析法和成矿类比法研究后, 认为有必要对我国碳酸盐岩铀矿床成矿特征进行单独论述。研究得出我国碳酸盐岩型铀矿床成矿特征是, 空间分布集中于江南赣湘粤桂黔五省, 及西秦岭川北-甘南的两片碳酸盐岩发育区。矿床层控明显, 断裂控矿突出, 矿石建造多彩, 矿床成因多样, 成矿大地构造演化趋于一致等。铀成矿演化具前后叠加, 塔式迭增富集进程。铀矿成因以构造-热液为主, 工业铀成矿年龄集中在中新生代, 属活化阶段形成的工业矿床。矿床规模大中小型具全, 中小型居多。矿床铀品位偏低, 在0.1%~0.3%之间。矿体集中产出, 开采方便。找矿空间和找矿潜力大, 值得重视。

关键词

中国, 碳酸盐岩型, 铀矿床, 成矿特征, 找矿潜力大

Metallogenic Characteristics of Carbonate Type Uranium Deposits in China

Zhenkai Yao, Hongye Huang, Yong Xu

Research Institute No.230, CNNC, Changsha Hunan

Received: Mar. 7th, 2022; accepted: May 23rd, 2022; published: May 31st, 2022

Abstract

This paper attempts to preliminarily summarize the metallogenic characteristics of carbonate type uranium deposits in limestone and dolomite in China. These deposits belong to a subclass of carbonaceous siliceous mudstone type uranium deposits in China. Based on the literature investigation of foreign carbonate uranium deposits, the on-site visit to 10 domestic related deposits, and

the special study of a large deposit, combined with the previous research results, and using the metallogenic analysis method and metallogenic analogy method, it is necessary to discuss separately the metallogenic characteristics of carbonate uranium deposits in China. The study of the metallogenic characteristics of carbonate type uranium deposits in China shows that the spatial distribution is concentrated in Jiangxi, Hunan, Guangdong, Guangxi and Guizhou, the five provinces of Jiangnan, and the two carbonate rock development areas of northern Sichuan and southern Gansu in the West Qinling Mountains. The regional stratabound of most deposits is obvious, the fault ore control is more prominent, the ore formation is rich and colorful, the genetic types of deposits are diverse, and the metallogenic geostucture tends to be consistent in time and space. The study shows that the uranium metallogenic evolution has the process of superposition before and after, tower superposition and enrichment. Uranium mineralization is mainly tectonic hydrothermal. The age of industrial uranium mineralization is concentrated in the Meso Cenozoic, which is an industrial deposit formed in the activation stage. The scale of the deposit is large, medium and small, and most of them are medium and small. The uranium grade of the deposit is low, ranging from 0.1% to 0.3%. The ore body is concentrated and the mining is convenient. The prospecting space and prospecting potential are large and worthy of attention.

Keywords

China, Carbonate Rock Type, Uranium Deposits, Metallogenic Characteristics, Great Prospecting Potential

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

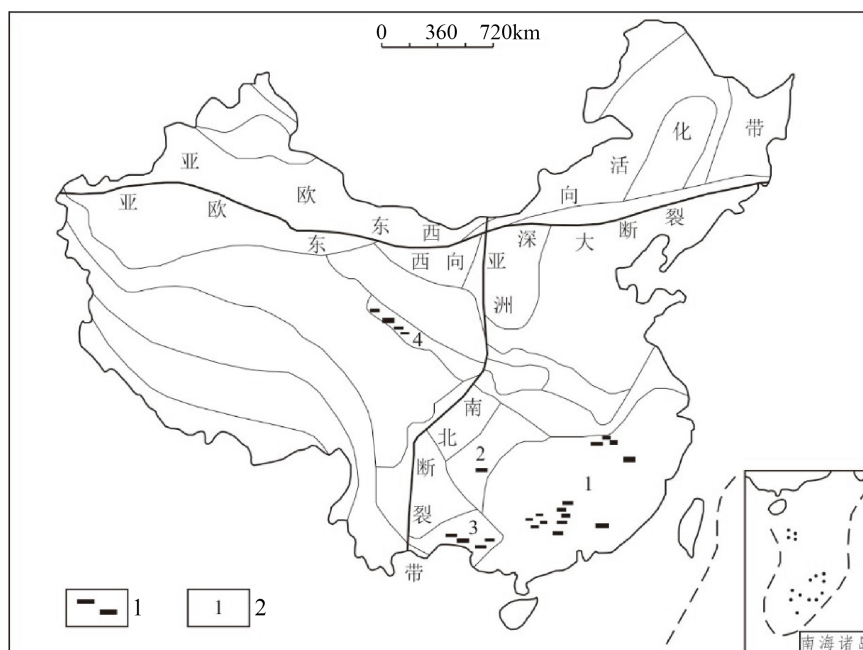
本文述及的碳酸盐岩型铀矿床,是指产于灰岩和白云岩内的一类铀矿床。众所周知,碳酸盐岩的地壳平均铀含量最低,其值在 $(1.5\sim 2.1) \times 10^{-6}$ 范围变化,远低于泥岩 3.7×10^{-6} 和砂岩 4.5×10^{-6} 的数值[1]。但为何又能成矿,而且能成大矿呢,值得深入研究。我国碳酸盐岩型铀矿床,列为碳硅泥岩型铀矿床大类中的一个组成部分[2]。按国际原子能机构(IAEA, 2016)铀矿床类型划分,碳酸盐岩型铀矿床列为15类铀矿床中的第13类,并细分成层控型、构造碎裂型和古岩溶型等三个亚类。层控亚类矿床有铀资源量90462tU(如印度图马拉帕列区),构造碎裂亚类-20445tU(如吉尔吉斯斯坦的Mailuu-Suu等约2万tU,美国的托迪尔托-2570tU),古岩溶亚类(如乌兹别克斯坦的秋雅穆云矿床-70tU)[3]。此外,还有20世纪中叶世界著名的中非申科洛布韦等14个碳酸盐岩矿床[4],其铀资源总量约3.5万tU,早已采空。乌兹别克斯坦东部费尔干纳盆地有马伊里苏、马伊里萨伊、沙卡普培尔等灰岩铀矿床[1],其铀资源量约2.5万tU。而美国阿利桑那州8个塌陷角砾岩筒型铀矿床,IAEA未列入岩溶或碳酸盐岩型铀矿床,而单独列为15类铀矿床中的第8类。我国学者黄静白、黄世杰、张金带等(2005)[5]对中国铀矿床类型划分中,分出碳酸盐岩型、碳硅泥岩型等,前者分布于我国湘桂黔地区,绝大多数属热液(热水)改造型矿床。后者包括震旦-寒武纪典型的碳硅泥系的铀矿床,也包括志留纪硅灰岩系和二叠纪黑色硅质岩系中的矿床。赵凤民(2012)在《中国铀矿床研究评价。第四卷,碳硅泥岩型铀矿床》专著中[2],对我国碳硅泥岩型铀矿床大类作了系统的综合论述,其中包含了碳酸盐岩铀矿床,只是未对碳酸盐岩型铀矿床进行单独的专门论述。

笔者对国外一些碳酸盐岩铀矿床地质资料曾作过文献调查,并对我国湘桂黔赣粤川甘7省的10处相

关铀矿床先后进行过现场访问考察,以及对盆头大型铀矿床作过专题研究[6]后获得一些认识,认为碳酸盐岩型铀矿床归属碳硅泥岩铀矿床大类,有其共同的某些地质和铀成矿特征,但与泥岩型铀矿床和硅质岩型铀矿床成矿仍有明显区别,特别是在岩石的含铀性及其物理和化学性质上有明显差异。笔者认为,碳酸盐岩的物理性质属脆性岩类,在构造应力作用下极易产生脆性变形,形成各种断裂构造及其交叉复合和重叠。碳酸盐岩的化学性质属易溶岩类,在地表和地下水水力作用下可形成形态各异的岩溶洞穴、岩溶洼地和岩溶盆地等,继而形成岩溶堆积体。在与热液作用下易产生交代矿成作用,特别是在各种断裂交叉复合地段,有利于形成矿液通道和储矿空间,具有与泥岩和硅质岩不同的独特地质和成矿特点。碳酸盐岩型铀矿床的规模,按我国标准大中小型俱全,以中小型居多,找矿空间宽阔和找矿潜力大。另外,该类矿床总体研究不足,前人多从单个矿床或单个地区的碳酸盐岩铀矿床研究成果较多。对各个矿床和各地区的研究程度也不平衡,相差悬殊。尚无人对该类矿床进行单独综合研究,故有必要对我国碳酸盐岩型铀矿床成矿特征给以单独综合论述。本文在前人成果基础上,依据活化构造理论,对我国碳酸盐岩型铀矿床整体成矿特征进行综合论述,试尝给人们对此类矿床有个完整的概貌,并以此引起更多同仁进行深入的综合研究。

2. 矿床空间分布集中在二片区

我国碳酸盐岩铀矿床比较发育,但空间分布极不均匀。现有的 26 个碳酸盐岩型铀矿床,集中分布在江南中西部赣湘桂黔粤五省区,及西秦岭川北-甘南的两片碳酸盐岩发育地区。大地构造单元分别归属为华东南活化区,有 14 个矿床,桂西南活化区 4 个矿床,鄂黔活化区 1 矿床,西秦岭活化区 7 个矿床(图 1),均归属中生代构造活化区。在大地构造剖面中以产于地台构造层内居多,其次是地槽构造层(表 1),大地构造演化进程同属海西地台活化区。



1——碳酸盐岩铀矿床; 2——活化构造区: 1——华东南; 2——鄂黔; 3——桂西南; 4——西秦岭

Figure 1. Geotectonic location map of Carbonate Uranium Deposits in China

图 1. 我国碳酸盐岩型铀矿床分布大地构造位置图

Table 1. Metallogenic characteristics of Carbonate Uranium Deposits in China**表 1.** 我国碳酸盐岩型铀矿床成矿特征表

地层时代 U-10 ⁻⁶	岩性	构造特征	构造层	构造单元	成矿年龄, Ma	矿床
Z _{2d} -Є _{1w} U-(7~36)	泥质、硅质向斜, 层间断裂, 微晶白云岩 NE 向切层断裂, 灰岩			赣西北九岭构造带	112, 53.8, 45, 15, 1.5	保峰源
					33, 28, 26	董坑
					26.5	大椿
					116, 84, 76, 54, 42, 22	降扎
S _{(1-2)y} U-(12~25)	硅灰岩	单斜 + 顺层断裂 + 切层断裂,	地槽	西秦岭白龙江复背斜	144, 102, 74, 49, 22, 14	占哇
					120, 95, 60, 25, 6.7	崇尔
					117, 85, 81, 77	刁德卡
					116, 84, 78, 65	7701
Є _{1q} U-(15~25)	白云岩	褶皱 + 断裂		黔中台隆	51.5, 38, 31, 20	白马洞
					96, 74, 62, 47, 33, 7	广子田
D _{2s-d} ⁵⁻¹ U-(3~38)	白云岩 灰岩	单斜 + 层间断裂		桂东北苗儿山 - 越城岭隆起带	74~33.7	大江背
					74~33.7	土地堂
					96, 70, 44, 31, 14, 1.5	矿山脚
D _{1-2d} U-(25~50)		背斜 + 断裂		桂西大明山隆起	136, 119, 30	大新
D _{3w} U-(1~5)	灰岩	穹隆 + 洞穴			—	那渠
D _{1y-3} U-(1.4~7.2)	白云岩		地台	桂东南大容山隆起	65, 59, 39, 31, 20	马鞍肚
D _{2d-3l} U-(4.1~9.9)		向斜 + 断裂			56~48.7	伟扬
C _{1ds} U-(10~13)	泥质灰岩			湘南 - 粤北南北向构造带	135, 119, 65, 30	岔头
C _{1dz-P_{2l}} U-(8~12)		背斜 + 断裂			105, 70, 65, 59, 11	西江
Z ₂ -C ₃ U-(3.9~5.3)		不整合界面		赣西南断褶带	—	下围
C _{3h-P_{1y}} U-(3.9~5.3)	灰岩	背斜 + 断裂		湘南 - 粤北南北向构造带	70, 65, 56, 42	柏坊
						燕山晚期
P _{1q}		向斜 + 洞穴			47	水口山
P _{1q} -Q		倒转背斜 + 断裂		赣杭构造带	— K-Q	坑口
		向斜 + 洼地				

3. 层位控矿特征明显

我国碳酸盐岩铀矿床, 从全国范围看无明显的层控成矿特征, 表现在含矿地层时代范围广, 层位多, 自新元古代震旦纪至晚古生代二叠纪地层内, 均有碳酸盐岩铀矿床产出, 而无特定的时代层位控制, 不像南非古元古代石英 - 卵石砾岩型铀 - 金矿床, 在全球均受此特定层位控制明显。但在具体某一构造单元内, 层位控矿特征仍很明显。如赣西北九岭地区在上震旦统陡山沱组白云岩内, 有董坑(184)、保峰源、大椿等铀矿床产出。在西秦岭白龙江复背斜区下 - 中志留统的硅灰岩内, 有降扎(又称羊肠沟、510)、占哇(又称罗军沟、512)、藏旺脑(511)、崇尔(又称垭口、513)、刁德卡、中长沟和 7701 等矿床分布。上述两地区的铀矿床的赋矿层位, 属地槽阶段形成的产物, 工业铀成矿是在后地台活化阶段形成。在桂东北苗儿山 - 越城岭隆起带的中泥盆统的灰岩内, 产有广子田(3105)、大江背、土地堂、矿山脚等铀矿床。在

湘南-粤北南北向构造带上古生界灰岩内, 产有园山、垸头(387)和西江(114)等铀矿床, 共有 15 个矿床层控特征明显。上述 15 个铀矿床, 除白马洞矿床赋矿层位属寒武纪扬子古地台沉积外, 其余均为海西期地台沉积, 但工业铀矿化属地台活化阶段形成。

本文所称的层控特征是矿床定位总体受区域层位控制[7], 铀矿体与其围岩的产状基本一致, 围岩既是赋矿层又是铀源层之一。围岩含泥质、碳质、或有机质和黄铁矿等, 层位的含铀性显著增高, 沉积-成岩期有明显的铀预富集作用, 比地壳碳酸盐岩平均铀含量高出 5~10 倍甚至更高(表 1)。但铀预富集程度远未达到下寒武统黑色系的铀含量 $(100\sim 200) \times 10^{-6}$, 铀成矿以后生叠加成矿为主。

地层层位内铀成矿还与层位的岩性成分有关, 含矿层常含泥质、炭质、生物碎屑、硅质和黄铁矿等有关。单一的纯碳酸盐岩通常铀含量低, 不利于铀成矿叠加富集。从我国已发现的碳酸盐岩型铀矿床分析, 泥质和炭质碳酸盐岩较为常见, 且多在地台阶段浅海环境形成, 既有利于沉积-成岩期铀预富集, 又有利于成岩后的后生叠加铀富集。如我国垸头矿床, 马鞍肚矿床。硅质碳酸盐岩分布相对较少, 主要是地槽阶段相对较为深水环境下沉积。如西秦岭隆礼矿床、占哇等矿床, 产于早-中志留世地槽阶段浅-中深海环境形成的硅灰岩内。应当指出, 有些碳酸盐岩铀矿床, 还同时在碳酸盐岩的上部, 或下部层位的硅质岩及泥质岩中也有工业铀矿化产出。如赣西北的董坑铀矿床, 除上震旦统陡山沱组白云岩中铀矿化外, 还有下寒武统碳质板岩内的铀矿体产出。

4. 断裂构造控矿突出

碳酸盐岩在断裂构造作用下易产生脆性变形, 形成宽大构造角砾岩带、断裂破碎带或裂隙密集带。当碳酸盐岩与泥质岩互层时, 则易形成层间破碎带。与断裂构造成矿有关的各种碳酸盐岩铀矿床, 常留下构造成矿的行迹, 矿石多为角砾状、角砾-糜棱状。当断裂作用较弱时出现碎裂状, 而断裂构造强烈时甚至形成构造泥状。当碳酸盐岩产状陡倾时, 在断裂作用下则形成陡倾层间破碎带, 如广子田、大江背、矿山脚、土地堂等矿床, 均产于陡倾层间破碎带内。当有地表水或地下水加入时, 则易形成大小不等的岩溶洞穴。碳酸盐岩铀矿床矿体定位, 常受层位岩性和断裂构造的双重控制[7]。断裂是形成工业铀矿化的关键, 表现在矿石构造为角砾状、角砾糜棱状或碎裂状。但铀矿体有时又不直接产于切层的断裂带内, 如董坑矿床矿体只产于层间断裂带内。总观之, 可归纳出下列四种碳酸盐岩铀矿床的断裂构造组合类型:

- 1) 层间断裂夹持型, 如降扎、占哇、刁德卡、崇尔、广子田、大江背、土地堂、大新矿床, 铀矿体均产于层间断裂夹持区内, 有部分产于层间断裂与斜切断裂相交汇地段。
- 2) 层间破碎带 + 切层断裂型, 如白马洞、董坑矿床, 铀矿体产于层间断裂内, 切层断裂只作矿液通道。
- 3) 向斜 + 断陷断裂型, 如垸头、马鞍肚矿床, 铀矿体产于断陷向斜周边的断裂内。
- 4) 断裂 + 岩溶洞穴型, 如圆山矿床铀矿体产于断裂有关的岩溶洞穴内, 下围矿床铀矿体产于断裂有关的不整合构造岩溶洞穴中。

断裂、岩溶和铀成矿, 三者并非同时形成, 通常是先断裂或不整合面构造, 后是岩溶, 再后是铀成矿, 而且属造陆后形成的岩溶铀成矿。

应当指出, 岩溶是碳酸盐岩区极为常见的普通地质构造现象, 远非全部岩溶都有铀成矿现象。1978 年湖南省地质学会举办碳酸盐岩岩相学习班, 在湖南双峰廉桥马鞍山泥盆纪碳酸盐岩剖面观察时, 在陡壁下部基岩附近见到大量与断裂构造无直接关联的小型(小于 100 m^2)岩溶洞穴内, 充填有岩性成分与围岩完全相同的岩石角砾, 角砾棱角明显, 而未见明显的细碎屑物充填。表明碳酸盐岩角砾从海底运移距离不远, 角砾可能为浪击塌落所致。洞穴边界粗糙, 推测洞穴为生物成因及弱水动力环境产物。此外,

1980年在瓮头矿床地表见下石炭统大圪阶石磴子组和测水组之上见角砾状白云岩体,呈三角形顶角圆滑状形态出露,面积约40000 m²,角砾磨圆度好,形似蛋形,可能属海底搬运距离较远的岩溶角砾堆积体。在矿床主干探槽内有3~5 cm²的小岩溶洞穴中,见有呈旋窝状纹层结构的紫红色细砂泥质充填物,可与矿床附近第三纪岩溶红层盆地沉积对比,只是沉积的水动力环境有别,表明瓮头矿床曾被第三纪红层盆地所覆盖。上述四种古岩溶内均未发现铀异常现象。

5. 矿石建造多彩

碳酸盐岩型铀矿床的矿石建造丰富多彩,按铀矿石伴生或共生的工业元素组分划分建造,依赋矿层位时代由老至新为序,分为铀汞型、铀多金属型、铀钼型、铀钨型、单铀型、铁铀型和铜铀型等7种铀矿石建造类型。通常是铀矿化的形成,晚于其它元素矿种。

5.1. 铀汞矿石建造

该矿石建造分布于黔中下寒武统清虚洞组,和中寒武统石冷水组的白云岩中。大地构造归属无岩浆岩出露的黔中台隆构造活化区,矿床实例有贵州白马洞矿床。矿床赋矿层位含铀量低,为(4~8) × 10⁻⁶,表明沉积-成岩期有微弱的铀预富集作用。矿石中伴生元素多,有汞、钼、钨、铼、硒、钒、镓、镍等,其中以汞和钼达到工业品位,其余元素达综合利用指标。大致分为汞铋矿化组合和铀钼矿化组合,两种组合只是空间伴生关系。汞铋矿化有二期,即在铀钼成矿前和成矿后均有发生,空间上不完全叠合,铀矿化范围略小于汞矿化。矿石平均铀品位0.098%。汞平均品位达0.15%,钼品位达0.13%,均形成工业矿体,且汞钼资源储量都较大,综合利用价值高。分别有单铀、单汞和单钼矿体存在,以钼矿化范围最大。

铀矿石中矿物种类多达40余种,铀矿物有沥青铀矿、铀黑及大量钙铀云母,铜铀云母,硅钙铀矿,硅镁铀矿,砷钙铀矿,铀铜矾等次生铀矿物。其它金属矿物有硫钼矿、黄铁矿、胶黄铁矿、辉铋矿、辰砂、赤铁矿、闪锌矿,有时见辉钼矿、自然汞、雄黄、雌黄等。非金属矿物有石英、白云石、绢云母、方解石、重晶石,萤石、玉髓等。铀在矿石中呈吸附状和铀矿物形式存在。沥青铀矿与闪锌矿紧密共生,呈脉状充填于碎裂白云岩裂隙内,或围绕黄铁矿分布。沥青铀矿结晶程度差,其反射率R=9.19%~11.87%,显微硬度H=110~192 kg/mm²,晶胞参数为5.388 Å。铀在矿石中呈吸附状和铀矿物形式存在,汞以自然汞、辰砂矿物形式存在。表明矿石为低温浅成构造-热液矿石类型。

5.2. 铀多金属矿石建造

该类铀矿石建造分布于西秦岭川北-甘南白龙江复背斜西段次级白依背斜北翼,铀矿床沿白龙江深大断裂北盘呈带状分布[8]。西秦岭加里东期为地槽,海西期为地台,中生代转化的活化区[9],矿床实例有降扎、占哇等矿床。矿床产铀层位是下志留统塔尔组的硅灰岩透镜体,厚度50~150 m,其平均铀含量达34 × 10⁻⁶,表明有沉积-成岩期有明显的铀预富集成矿作用,层控成矿特征明显。矿区内岩浆岩较弱,只在其东南侧有地槽阶段辉绿岩和活化期的云辉斜煌岩及英安斑岩脉出露。铀矿化受层位和断层构造双重控制,尤以印支期顺层断裂在矿层内发育,及燕山期斜切断层发育。矿石铀平均品位为0.142%,矿石共生和伴生元素有铜、锌、镍、钼、钒等,达综合利用品位标准,矿石为铀-多金属建造类型。

矿石物质组分复杂,原生铀矿物有沥青铀矿,其他金属矿物有黄铜矿、闪锌矿、硫铋铁矿、辉铜矿、硫砷铜矿、辉镍矿、辉铜矿、黄铁矿。次生矿物有斑铜矿、赤铁矿及铀黑、铜铀云母、钙铀云母、钾矾铀矿、钒钙铀矿、翠砷铜铀矿等次生铀矿物。非金属矿物有石英、方解石、白云石、菱铁矿和重晶石等。沥青铀矿的反射率为13.1%~15.8%,晶胞参数为5.405 Å~5.425 Å,表明结晶程度较高。与铀矿化共生的

黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 平均值变化范围为+4.19‰~-28.36‰, 轻硫偏多, 表明在成矿过程中硫同位素产生了进一步分馏。随着矿石铀品位增富, 而黄铁矿中 $\delta^{34}\text{S}$ 值降低, 表明铀成矿具开放和封闭系统交替变化特征。与沥青铀矿共生的方解石脉 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-0.78‰~-6.355‰, 平均为-4.46‰, 而地层中方解石脉的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为0.86‰~5.14‰, 平均为 3.56‰, 两者有明显区别, 表明铀成矿作用的碳具有深源特征。在占哇矿床罗君沟见大量次生铀物产出, 表明有淋积成矿作用叠加。故矿石列为以中低温热液成因为主, 有成岩-变质铀预富集成矿作用, 及表生淋积叠加富集的复成因矿石建造[10]。此外, 湖南水口山铅锌铀矿床的矿石, 是属以铅锌为主的铀多金属矿石建造类型。

5.3. 铀钼矿石建造

该矿石建造分布于广西西大明山隆起带西部, 一个背斜构造内的下泥盆统灰岩内。大地构造归属桂西南活化区, 区内无岩浆岩出露, 矿床实例有大新矿床[11]。赋矿层位铀含量较高, 达 $(25\sim 50) \times 10^{-6}$, 表明沉积-成岩期有明显的铀预富集作用。矿石中的元素组合与围岩极为相似, 矿石平均铀品位为0.15%。与铀共生的元素有钼, 其含量达0.03%~0.72%, 铀与钼含量变化呈正相关关系, 构成工业铀钼矿石建造。

矿石矿物成分相对简单, 铀矿物以沥青铀矿和铀黑为主, 少量铀云母等次生铀矿物, 其它金属矿物有黄铁矿、闪锌矿、毒砂、褐铁矿、赤铁矿、白铁矿等。非金属矿物有石英、方解石、白云石、绢云母、绿泥石等。铀存在形式以铀矿物沥青铀矿和铀黑为主, 其次是吸附形式。矿石中沥青铀矿的晶胞参数为5.395 Å, 矿石中的石英液态包裹体氧同位素测定, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -2.1\text{‰} \sim +6.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{D}_{\text{水}} = -47.6\text{‰} \sim -28.8\text{‰}$, 多落在变质水范围, 表明成矿溶液为以变质水为主, 有大气水加入的混合溶液。矿石中黄铁矿硫同位素组成为 $\delta^{34}\text{S} = -23.40\text{‰} \sim -30.40\text{‰}$, 围岩中 $\delta^{34}\text{S} = +8.20\text{‰} \sim -38.10\text{‰}$, 两者有明显差异, 表明矿石中部分硫为外来硫。矿石中石英包裹体水的氧同位素值 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -2.1\text{‰} \sim -6.7\text{‰}$, $\delta^{18}\text{D}_{\text{水}} = -47.6\text{‰} \sim -28.8\text{‰}$, 均落在变质水范围内, 表明成矿热液具加有大气降水的深源特征[12]。据铀矿化及同位素特征认为, 矿石为中低温热液为主, 之前有沉积-成岩期铀预富集, 前后叠加所成的复成因铀钼矿石建造。

5.4. 铀钨矿石建造

该类矿石建造分布于桂北苗儿山-越城岭侵入岩浆-构造活化隆起带东侧, 铀矿化赋存于中泥盆统碳酸盐岩建造泥质白云岩断裂构造破碎带中。白云岩含矿层中铀含量达 $(26\sim 38) \times 10^{-6}$, 表明在沉积-成岩期有明显的铀预富集作用, 层位控矿明显。矿床实例有广子田、土地堂、大江背、矿山脚等矿床。矿石铀平均品位0.114%~0.188%, 矿石中伴生元素主要是钨和钼, 钨的平均品位为0.168%, 达综合利用要求, 广子田矿床钨资源量超3000 t。铀矿体与钨矿体分布基本一致, 但钨矿化先形成, 钨矿范围略大于铀矿化。

矿石矿物成分较为复杂, 铀矿物以沥青铀矿和铀黑为主, 有少量次生铀矿物。其它金属矿物有白钨矿、黑钨矿、钨华、赤铁矿、黄铁矿、方铅矿、闪锌矿和黄铜矿等。非金属矿物有白云石、蒙脱石、水云母、高岭石、水云母、绿泥石、石英、方解石、萤石等。与铀共生的黄铁矿的硫同位素组成变化大, $\delta^{34}\text{S}$ 值为-23.4‰~-30.4‰, 围岩中 $\delta^{34}\text{S} = 8.20\text{‰} \sim -38.10\text{‰}$, 表明两者有明显差异, 矿石中的部分硫为外来硫。成矿期方解石包裹体水的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = 2.10\text{‰} \sim 6.70\text{‰}$, $\delta^{18}\text{D}_{\text{水}} = -47.60\text{‰} \sim -28.80\text{‰}$, 大多落在变质水范围内, 显示成矿期以变质水为主, 有大气降水参入的混合热液水成矿。成矿期方解石 $\delta^{13}\text{C} = -1.5\text{‰} \sim -11.0\text{‰}$, 表明碳具多源特征, 热液中有深源碳。矿石中铀的存在形式以吸附状态为主, 其次为铀矿物。铀成矿以中低温热液为主, 铀主要来自深部, 之前有沉积-成岩期铀预富集作用, 地表有次生淋积叠加富集所成的复成因矿床, 矿石建造是以铀为主的铀钨建造类型。

5.5. 单铀型矿石建造

该类矿石建造分布于湘南 - 粤北南北向构造带中段的碳酸盐岩内, 大地构造属华东南海西期地台弱构造 - 岩浆活化区, 矿床实例有盆头矿床。该矿床赋矿层位为下石炭统大圹阶石磴子组, 因含泥质和炭质, 铀含量高达地壳灰岩平均值的 5~10 倍, 为 $(10\sim 20) \times 10^{-6}$, 表明沉积 - 成岩期有铀的预富集作用, 铀矿化受层位和断裂构造的双重控制。矿石中的伴生元素钼、铜、铅、锌、镍、钒等的含量, 接近于围岩中数值, 矿石平均铀品位为 0.15%, 属单铀矿石建造。

铀矿石物质成分较为简单, 铀矿物以沥青铀矿为主, 在矿床氧化带内见铀黑、铜铀云母、钙铀云母、矽钙铀矿、兰钼矿等次生矿物。其它金属矿物有黄铁矿、闪锌矿、针铁矿、赤铁矿、褐铁矿等, 还有少量方铅矿、辉钼矿、锑硫镍矿、针镍矿、硒锑矿、红砷镍矿、镍黄铁矿等。非金属矿物有方解石、白云石、石英、水云母、绿泥石、磷灰石及粘土矿物等。沥青铀矿的含氧系数较低, 其值为 2.306~2.350, 晶胞参数较大, 其值为 0.5416~0.5428 nm, 显微硬度为 231~473 kg/mm², 与沥青铀矿共生的黄铁矿, 其 Co/Ni = 1.375, 具热液成因特征。与沥青铀矿的方解石均一法测温为 180~150℃。矿石中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S}$ 的变化范围为 -1.0‰~-21.4‰, 平均为 -9.0‰, 与围岩中的硫同位素特征无本质上的差别, 反映出矿石中的硫主要来自围岩, 属生物成因硫, 与矿石中有草莓状黄铁矿的事实合拍。矿石比围岩更富硫, 表明铀成矿的继承性和叠加性特点。矿石中 $\delta^{13}\text{C}$ 在 +0.3‰~-3.19‰ 范围变化, 平均为 -1.5‰, 表明矿石中的碳来自围岩。矿石中方解石和石英的包裹体水氧同位素成分测定 $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = 4.5\text{‰}\sim 7.9\text{‰}$, $\delta^{18}\text{D}_{\text{水}} = -32\text{‰}\sim -37\text{‰}$, 均落在变质水范围内, 表明成矿热液具深源特征。总观之, 铀矿石是以构造 - 热液成因为主, 有沉积 - 成岩期铀预富集和表生淋积叠加富集的多阶段复成因[10]矿石建造类型。

5.6. 铁铀矿石建造

铁铀矿石建造分布于赣西南信丰 - 于都拗陷带内, 大地构造属南岭侵入岩浆 - 构造活化构造带中段北侧, 矿床实例有以铁为主的下围铁铀矿床。该矿床无明显的赋矿层位, 矿区内上石炭统船山组灰岩含铀量不高, 在 $3 \times 10^{-6}\sim 6 \times 10^{-6}$ 范围, 表明在碳酸盐岩沉积 - 成岩期未发生明显的铀预富集成矿作用。矿床定位于上震旦统变质岩与上石炭统船山组灰岩之间的断裂构造不整合界面的灰岩内, 矿石铀平均品位为 0.11%, 为矿床的主要矿石类型。另在离断裂构造不整合界面不远的船山组灰岩溶洞穴内, 在铁帽之下产有富铀的含黄铁矿石英斑岩铀矿化。

铀矿石属铁铀建造类型, 主要矿物有褐铁矿、赤铁矿、铀黑、沥青铀矿、黄铁矿、胶黄铁矿、针铁矿、水针铁矿、白铁矿、自然铜及次生硫酸盐矿物等。石英斑岩中的沥青铀矿的比重为 6.5~7.0, 摩氏硬度 5~6, 反射率 13%~16%, 含氧系数为 2.375。矿石中伴生元素主要为铁, 其它金属元素银、铜、铅、锌、镓、镉、铟等均达综合利用指标。矿石属多阶段复成因, 即早期有富铀的含黄铁矿石英斑岩有关的热液铀矿化, 及晚期断裂构造不整合面内的岩溶铀成矿组合而成[13], 石英斑岩内的内生铀矿化可能是岩溶铀成矿的主要铀源。

5.7. 铜铀矿石建造

该类矿石建造分布于湘南 - 粤北南北向构造带中北端海西地台活化区内, 矿床实例有以铜为主的柏坊铜铀矿床。该矿床的铜铀矿化赋存于上石炭统壶天群底部灰岩, 及下二叠统栖霞组及孤峰组灰岩内的层间断裂破碎带内。另外在上白垩统红层底部与壶天群的不整合面下部的灰岩破碎带内产有铜铀矿化, 而在不整合面上部的砂岩内, 只有不含铀的铜矿化。上述层位灰岩内未见铀、铜含量的明显增高, 表明沉积 - 成岩期铀和铜无明显的预富集作用。铀与铜矿化关系有时为共生关系, 有时为伴生关系。当为共生关系时铜铀矿化范围基本吻合, 铀矿化富时铜矿化也富。铀常在铜矿体中下部或底部富集, 铀赋存于

辉铜矿中,有时铀矿化范围略大于铜矿化。铀矿体平均品位达 0.1%,矿化分布不均匀,当为致密块状辉铜矿组成的矿体时,铀品位有所下降。

矿石物质成分复杂,矿物种类多,原生矿石中金属矿物有黄铜矿、辉铜矿、斑铜矿、汞银矿、沥青铀矿、黄铁矿、赤铁矿等,脉石矿物有石英、方解石、高岭石等。在氧化带矿石中铀的次生矿物有铀的氢氧化物、变翠铀矿、铝铀云母、水矾铜铀矿等,铜的次生矿物有铜兰、含铜孔雀石等,一些铜的次生矿物不同程度的含铀,成为含铀矿物。沥青铀矿有二期,第一期为主成矿阶段,呈不规则斑点状、团块状分布于大理岩中,与浸染状黄铜矿共生,并被晚期的辉铜矿穿插交代。第二期的沥青铀矿呈细脉状或沿角砾边缘分布,结晶程度较差,其晶胞参数 $a = 5.405 \text{ \AA}$ 。辉铜矿也分二期,第一期为主成矿阶段,呈脉状、网脉状、网状及浸染状产出。该期辉铜矿含铀,表现在沥青铀矿呈显微细粒包体存在于辉铜矿中,铀含量高。或是铀均匀分布于辉铜矿中,铀含量低。含铀辉铜矿叠加于先成的铜铀矿体上,见辉铜矿细脉穿切沥青铀矿,或交代沥青铀矿。第二期辉铜矿呈微脉状穿切第一期辉铜矿,且不含铀。矿石中伴有银、钴、镍、铋,其品位均达综合利用要求[14]。根据沥青铀矿结晶程度低,含氧系数高,矿石矿物共生组合特点及其他特征,认为矿石为中低温热液成因。

6. 矿床成因复杂多样

碳酸盐岩铀矿床成因较为复杂,类型多样,常具多个大地构造阶段和多种成因的铀成矿作用,前后叠加塔式累积叠增的成矿过程。按成因分类分为热液、表生和复成因三大类七小类(表 2),当前我国还未发现沉积-成岩型碳酸盐岩铀矿床。

Table 2. Genetic classification of Carbonate Uranium Deposits in China

表 2. 碳酸盐岩铀矿床成因分类

大类	小类	矿床实例
热液	中低温热液	柏坊, 广子田, 大江背, 矿山脚, 土地堂, 水口山
	构造-热液(含热水)	白马洞, 大新, 西江
表生	岩溶洞穴堆积淋积	那渠, 园山
	淋积 + 岩溶洼地残积	坑口
复成因	沉积成岩 + 构造-热液	保峰源, 董坑, 大椿, 垒头
	变质 + 构造-热液 + 淋积	降扎, 占哇, 刁德卡, 崇尔, 中长沟, 藏旺脑, 7701
	构造-热液 + 岩溶洞穴淋积	马鞍肚, 伟扬, 下围

在热液和复成因两个大类矿床中,与岩浆岩无直接联系的构造-热液(含热水)成矿作用普遍,为主成矿作用。依据是矿石中出现有与沥青铀矿共生的方铅矿、黄铜矿、闪锌矿、辉铜矿等金属矿物。赤铁矿化、黄铁矿化、方解石化、硅化、绿泥石化等热液蚀变作用发育。与沥青铀矿共生的方解石,用均一法测定的形成温度范围较大,为 78~280℃,萤石包裹体均一法温度为 121~164℃。成矿期石英包裹体水 $\delta^{18}\text{O} = 5.06\text{‰} \sim 7.55\text{‰}$ 。成矿期方解石氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{矿物}} = 18.26\text{‰} \sim 19.42\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -7.55\text{‰} \sim 12.56\text{‰}$ 。成矿期方解石 $\delta^{13}\text{C} = -1.41\text{‰} \sim -3.6\text{‰}$,与海相碳酸盐沉积岩的值相近,表明碳主要来自围岩,部分来自深源。矿石中黄铁矿 $\delta^{34}\text{S} = -6\text{‰} \sim -38.4\text{‰}$,变化范围大。沥青铀矿结晶程度高,晶胞参数为 0.5401~0.5428 nm,含氧系数为 2.306~2.420,反射率为 13.08%~16.6%,显微硬度为 232~342 kg/mm²。与沥青铀矿共生的黄铁矿 Co/Ni 达 1.375。与华南花岗岩和火山岩中的中低温热液型铀矿化中的沥青铀矿的含氧系数为 2.290~2.50,晶胞参数 $a = 0.5398 \sim 0.5422 \text{ nm}$,显微硬度为 325~360 kg/mm²等相近似,而与淋积型沥青铀矿含氧系数 2.580,晶胞参数 0.5381~0.5386,显微硬度 325~260 kg/mm²,有较大差别。

应当指出，碳酸盐岩型铀矿床与花岗岩、火山岩及其他碳硅泥岩铀矿床一样，常具多期次不同成因的铀成矿作用叠加成矿，表现在不同岩性或不同地段有不同的铀成矿年龄。矿床形成之后，通常出露地表，受到风化淋蚀作用，形成数量不等的次生铀矿物，产生不同程度的表生淋积铀成矿作用，并叠加于先成矿体之上。如果淋积铀成矿作用对矿石品级和铀资源储量有着较大影响作用，则在矿床成因中应得到反映。否则不必在矿床成因类型划分中反映，只在矿床论述中说明即可。如盆头矿床铀矿体未出露地表，矿体内少见次生铀矿物，不需把淋积成矿在矿床成因中反映。

7. 成矿大地构造演化趋一致性

碳酸盐岩铀矿床成矿大地构造背景，体现在成岩阶段和成矿阶段的大地构造背景两个方面。从碳酸盐岩铀矿床与铀成矿时间演化及其大地构造背景分析，该类铀矿床的成矿时间和成矿大地构造空间定位趋一致性，即工业铀成矿时间，不论其产矿层位时代，也不论其矿石建造类型，都集中在中生代活化阶段，铀成矿大地构造空间均隶属于中生代活化构造区。我国绝大多数铀矿床在成岩阶段有不同程度的铀预富集作用，但从铀矿床的工业矿石年龄值的多值性，或矿床曾发生过多期次铀成矿作用(表 2)，或是不同成因的铀成矿作用前后叠加。我国碳酸盐岩型铀矿床，多在加里东地槽阶段，或海西期地台阶段形成铀预富集的产铀层位之后，于中生代活化阶段在先成铀预富集基础上叠加形成工业铀矿床。或者说工业的碳酸盐岩型铀矿床，是活化构造成矿作用的产物。工业铀矿石年龄集中在中生代 135~5 Ma 范围，明显反映出成矿时控性特点。如盆头铀矿床矿石年龄分别为 135、65、30 Ma，结合当地铀成矿与构造-岩浆活化作用联系及大地构造成矿演化阶段看出，产铀层位属下石炭统大圪阶石磴子组，工业铀成矿属中生代活化阶段所成(图 2)。当前我国尚未发现元古代前地槽阶段的碳酸盐岩产铀层位，也未发现活化阶段之外形成的工业铀矿床。这就表明各矿床的铀成矿演化具有共同的一致性，反映出中生代活化阶段成矿的时空分布特征。

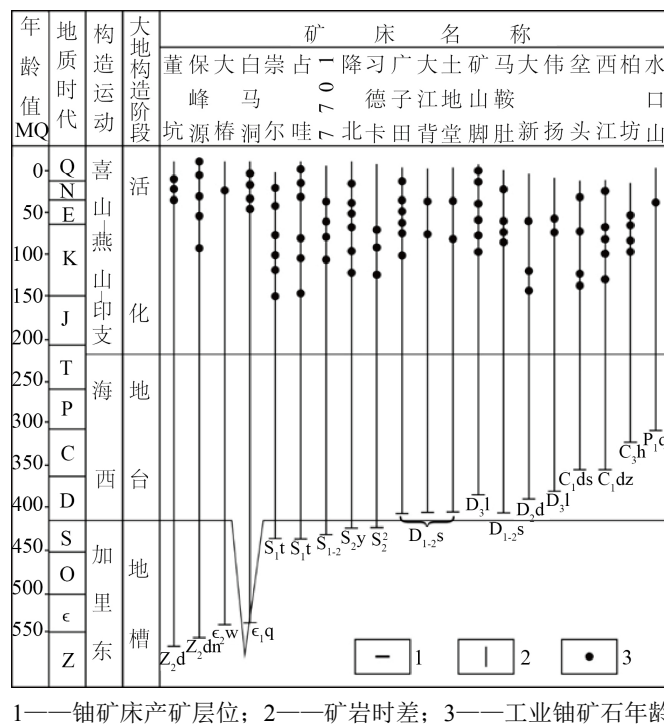


Figure 2. Metallogenic time control of Carbonate Uranium Deposits in China
图 2. 我国碳酸盐岩铀矿床成矿时控性

应当指出,表 2 及图 2 中有部分矿床,由于研究单位多,或取样时间早晚不同,或取样地段不一,获得的成矿年龄数值多达十余个之多,其中有的属非工业矿石的全岩矿化年龄,本文一般未被采用。当铀矿床的工业铀成矿年龄值超出 6 个时期,结合构造运动幕,选择其中 6 个值,舍去其数值相近的年龄值。因铀成矿次数与构造运动幕密切有关,燕山运动有 3 次幕,喜马拉雅运动有 2 次幕。铀成矿是在地壳构造运动由强转弱的构造转折期,正是铀从岩石活化转为沉淀的过渡期。中生代红层盆地是我国构造活化的产物,成为区域构造活化的重要标志之一。碳酸盐岩铀矿床的形成时间正与中生代活化盆地时间上合拍,空间上相伴,甚至重叠。因而,铀源层体、断裂构造及中生代红层盆地,可看作是我国碳酸盐岩区域铀成矿的三大标志,也可看作铀成矿的区域三大要素。

8. 结语

我国碳酸盐岩铀矿床成矿特征是,空间分布极不均匀,集中在江南中西部五省区及西秦岭川北甘南两片碳酸盐岩发育地区。区域层控成矿明显,断裂构造控矿突出,矿石建造丰富多彩。矿床成因类型多样,铀成矿的大地构造时空演化趋向一致,工业铀成矿时间为中生代,属后生工业铀矿床,成矿大地构造空间均属活化区。

铀成矿作用以构造-热液成因为主,属活化阶段形成的工业矿床。多数矿床铀成矿具多成因多期次复合成矿的复成因特点,显示铀成矿演化具前后叠加,塔式迭增富集的进程。按我国标准矿床规模大中小型俱全,以中小型居多。矿石铀品位偏低,多在 0.1%~0.3%之间。矿体集中产出,开采方便。找矿空间和找矿潜力大,值得重视。

我国在碳酸盐岩区断裂构造交汇地段,尚未发现塌陷角砾筒型铀矿床,也未发现隐爆角砾岩型铀矿床。在碳酸盐岩与花岗岩侵入体接触部位,未发现接触交代型(矽卡岩型)铀矿床。依本文所述碳酸盐岩铀成矿特征,在我国存在上述三种铀矿床的成矿条件,今后找矿中很有可能发现。

基金项目

中国核工业地质项目(202231)资助。

参考文献

- [1] B.И. 丹契夫, H.П. 斯特列梁诺夫. 外生铀矿床[M]. 姚振凯, 郑作环, 史维浚, 译. 北京: 原子能出版社, 1984, 131-149.
- [2] 赵凤民. 中国铀矿床研究评价. 第四卷, 碳硅泥岩型铀矿床[M]. 北京: 中国核工业地质局, 核工业北京地质研究院, 2013, 78+167-396.
- [3] IAEA (2018) World Distribution of Uranium Deposits (UDEPO). IAEA, Vienna, 18+43-44+65+171.
- [4] 舒瓦洛夫. 大陆地块铀成因[M]. 任文, 译. 北京: 原子能出版社, 1986, 79-92.
- [5] 黄净白, 黄世杰, 张金带, 等. 中国铀成矿带概论[M]. 北京: 中国核工业地质局, 2005, 84-92.
- [6] 姚振凯, 刘远厚, 朱容斌, 杨尚海. 三八七层控碳酸盐岩铀矿床地质和矿化特征. 湖南省地质学会矿床地质专集[M]. 长沙: 湖南省地质学会, 1981, 167-182.
- [7] 姚振凯. 中国地洼区层控铀矿床地质和分布规律[J]. 矿床地质, 1982, 1(1): 83-90.
- [8] 何明友. 西秦岭铀矿床迁移形式的热力学研究[J]. 矿床地质, 1997, 16(2): 181-187.
- [9] 陈国达, 黄苏, 关尹文. 中国区域大地构造基本特征初步总结. 中国大地构造问题[M]. 北京: 科学出版社, 1965, 96-116.
- [10] 姚振凯, 郑大瑜, 刘翔. 多因复成铀矿床及其成矿演化[M]. 北京: 地质出版社, 1998, 27-43.
- [11] 姚振凯. 我国层控碳酸盐岩铀矿床成矿的地质地球化学条件[J]. 沉积学报, 1984, 2(1): 66-75.

- [12] 闵茂中, 樊涛, 黎旭畅, 等. 华南古岩溶角砾岩中铀矿床研究[M]. 北京: 原子能出版社, 1998, 138-139.
- [13] 姚振凯, 刘远厚, 朱蓉斌. 岩溶铀矿床的类型及其特征[J]. 中国岩溶, 1986(2): 79-86.
- [14] 中国核工业地质局. 中南铀矿地质志[M]. 北京: 中国核工业地质局, 2005, 684-689+825-875.