

南岭成矿带铀矿地质特征、成矿规律与全位成矿模式

赵如意^{1,2)}, 王登红²⁾, 陈毓川²⁾, 冷成彪¹⁾, 秦锦华²⁾, 赵晨辉²⁾

1) 东华理工大学, 核资源与环境国家重点实验室, 南昌, 330013;

2) 中国地质科学院矿产资源研究所, 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 北京, 100037

内容提要:南岭成矿带是中国重要的铀矿基地, 产出的铀矿床以花岗岩型为主, 其次为碳硅泥岩型和少量砂岩型。本文通过搜集整理前人找矿勘查和科研成果, 认为南岭成矿带多期多阶段构造演化为铀成矿作用提供了初始铀源、产铀花岗岩、断裂网络和含铀热液等有利的成矿条件。产铀花岗岩大多是由高硅、过铝、偏钾高碱的S型花岗岩, 沿断裂分布的构造碎裂岩、蚀变岩和还原性地质体是有利的赋矿围岩。矿化与蚀变中心带发育沥青铀矿、黑色微晶玉髓、紫黑色萤石、胶状黄铁矿、赤铁矿、绿泥石等矿物组合。铀矿体形态多样, 以中小规模、中低工业品位为主。南岭成矿带中生代多阶段区域性拉张过程中形成了多阶段铀矿化。花岗岩型铀矿床分布于加里东隆起区花岗岩内部构造结和岩体接触带附近, 矿体沿断裂与蚀变体一起赋存于氧化-还原界面和脆韧性构造转换面之间的“成矿壳层”内。南岭成矿带中生代“空间全位”铀成矿模式显示, 不同的构造层、不同的建造、不同的岩性及不同的部位均有铀成矿潜力, 但由于具体成矿条件的不同组合而产出不同类型、不同规模、不同时间和不同强度的铀矿化。也就是说, 难以排除某一空间部位不成矿的可能性。根据这一“全位”成矿的认识, 从不同的角度对南岭成矿带中生代铀成矿作用进行全面分析, 找出尚未落实的“缺位”, 再根据工作区具体成矿条件指导铀矿找矿新突破。

关键词:南岭; 铀矿; 地质特征; 成矿规律; 成矿模式; 全位成矿

南岭成矿带是中国核工业发源地之一。自1955年1月, 中央作出发展原子能的战略决策起, 到1959年在粤北突破希望铀矿床, 仅仅历时4年, 便提交了中国第一个花岗岩型铀矿床中间性储量报告^①。之后, 南岭成矿带花岗岩型铀矿地质工作取得长足进展, 找到了数十个铀矿床和数以百计的铀矿点, 并开展了相应的地质科研工作。南岭发展成中国最大的花岗岩型铀矿基地, 为中国核工业的起步和发展做出了巨大贡献。

铀作为能源金属矿产, 其探采、销售和使用受到国际原子能机构与世界各国的高度关注和严苛限制。为了保护国家安全、维持经济可持续发展, 铀矿地质工作一直受到国家和各级政府的大力支持。在《全国矿产资源规划(2016—2020)》中, 铀再次被界

定为“战略性关键矿产”(Wang Denghong, 2019)。“和平时期能够稳定、持续供应, 并保持适度储备, 用于应对国内外突发事件”这一方针同样适合铀矿。虽然“水成铀矿理论”的引入和国际市场铀价变动致使中国花岗岩型铀矿退居次要地位, 但是为了进一步推动铀矿成矿理论和找矿方向研究, 本文在搜集整理前人资料的基础上, 全面、客观地分析南岭成矿带铀矿地质找矿、勘查和科研成果与进展, 归纳总结出南岭成矿带中生代全位铀成矿模式, 进而运用“全位成矿和缺位找矿”理念梳理了南岭成矿带下一步找矿思路。

1 区域地质背景

南岭成矿带主体位于华南大陆之华夏板块的中

注: 本文为中国地质调查局中国矿产地质志项目(编号 DD20160346、DD20190379)和中央级公益性科研院所基本科研业务费项目(编号 JYYWF20183701、JYYWF20183704)资助成果。

收稿日期: 2019-09-27; 改回日期: 2019-11-22; 网络发表日期: 2019-11-26; 责任编辑: 周健。

作者简介: 赵如意, 男, 1982年生, 博士后, 矿物学、岩石学、矿床学专业, 主要从事岩浆岩与成矿规律研究和矿产勘查工作; Email: 93236749@qq.com。通讯作者: 王登红, 男, 1967年生, 研究员, 主要从事矿产地质调查与科研工作; Email: wangdenghong@vip.sina.com。

引用本文: 赵如意, 王登红, 陈毓川, 冷成彪, 秦锦华, 赵晨辉. 2020. 南岭成矿带铀矿地质特征、成矿规律与全位成矿模式. 地质学报, 94(1): 149~160. doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020108.
Zhao Ruyi, Wang Denghong, Chen Yuchuan, Leng Chengbiao, Qin Jinhua, Zhao Chenhui. 2020. Geological characteristics, metallogeny and geospatial mineralization model of uranium in the Nanling metallogenic belt. Acta Geologica Sinica, 94(1): 149~160.

西部(图 1a),它经历了早前寒武纪克拉通、华夏古陆、华南裂谷、华南大陆和滨太平洋大陆边缘等五个地质发展阶段,形成了元古宙—早古生代基底、晚古生代—晚三叠世盖层、中生代盆地沉积三个大的构造层(Chen Yuchuan et al.,2007)。区域地层自元古宇至第四系出露齐全,基底岩石多为浅海相—次深海相陆源碎屑岩建造和火山复理石建造形成的中浅变质岩系;盖层以浅海—陆缘环境沉积的碎屑岩、碳酸盐岩为主;盆地沉积则是先由陆相断陷盆地沉积,之后以红色沉积建造为主(Chen Yuchuan et al.,1989)。南岭成矿带北东向断裂十分发育,其中的深大断裂控制着地壳演化并与燕山期构造岩浆活动及成矿作用有关,北西向和近东西向断裂亦有所发育。区域上吕梁期、晋宁期、加里东期、印支期和燕山期构造岩浆岩活动十分发育,总的岩性演化趋

势从英云闪长岩→花岗闪长岩→二长花岗岩→二云母花岗岩→白云母碱长花岗岩→碱性花岗岩,随时代由老至新,岩石具有由中性至酸性到富碱的演化规律(黄净白等,2005^①)。

南岭成矿带与燕山期中浅成花岗岩类有关的稀土、稀有、有色及铀金属矿床成矿系列是华南地区中生代岩浆成矿作用的五大矿床成矿系列之一(Chen Yuchuan et al.,2012)。其中的湘赣粤铀矿床成矿亚系列与张金带等(2015)^②划分的华东南铀成矿省之桃山—诸广铀成矿带和郴州—钦州铀成矿带北段的湘南—桂北成矿亚带相当。南岭成矿带铀矿床以花岗岩型为主(图 1b),其次为碳硅泥岩型和少量砂岩型。花岗岩型主要有桃山矿田、鹿井矿田、诸广矿田、下庄矿田、大湾矿田和龙源坝—陂头成矿区、弹前—良村成矿区、大东山成矿区及禾洞矿床等铀矿产

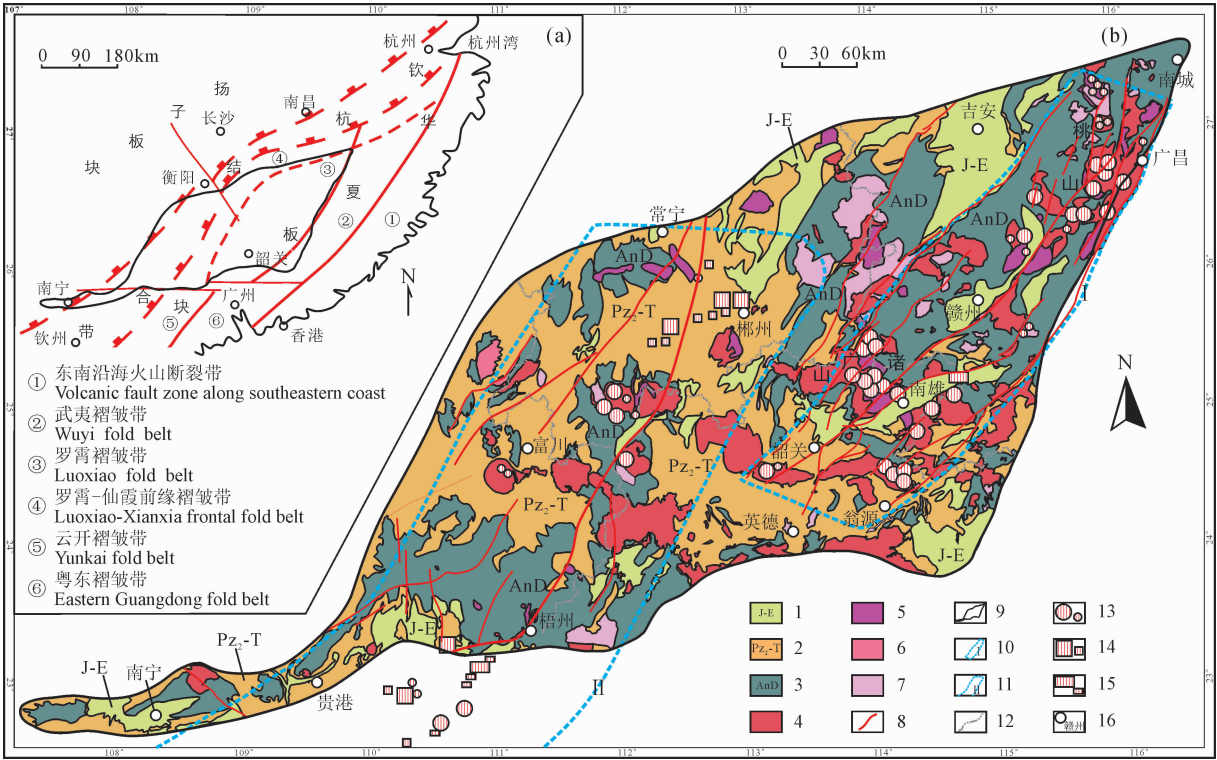


图 1 南岭成矿带铀矿地质图(a)(据 Chen Yuchuan et al.,2013)

Fig.1 Uranium geological map of the Nanling metallogenic belt (a) (after Chen Yunchuan et al.,2013)

1—中-新生代断陷盆地沉积;2—晚古生代至三叠纪盖层;3—下古生界及前寒武纪基底;4—燕山期花岗岩;5—印支期花岗岩;6—海西期花岗岩;7—加里东期花岗岩;8—区域性深大断裂和主要断裂;9—南岭成矿带范围;10—桃山—诸广铀成矿带;11—湘南—桂北铀成矿亚带;12—省界;13—花岗岩型铀矿床和矿点;14—碳硅泥岩型铀矿床和矿点;15—砂岩型铀矿床和铀矿点;16—城市及名称

1—Mesozoic-Cenozoicgraben basin deposition;2—Late Paleozoic to Triassic overlying strata;3—Lower Paleozoic and Precambrian basement;4—Yanshanian granite;5—Indovician granite;6—Hercynian granite;7—Caledonian granite;8—regional deep and large faults or major faults;9—the region of Nanling metallogenic belt;10—Taoshan-Zhuguang uranium metallogenic belt;11—South Hunan-North Guangxi uranium mineralization sub-belt;12—province boundary;13—granite type uranium deposits and occurrences;14—carbonosilicate mudstone type uranium deposits and occurrences;15—sandstone-type uranium deposits and occurrences;16—city and its name

地。碳硅泥岩型主要有金银寨、垸头和马鞍肚铀矿床,而砂岩型铀矿床则仅产于中生代盆之中,如界址矿床。

2 铀成矿条件

铀位于周期表上第Ⅲ族,属于锕系元素,其原子序数为 92。铀的电子层结构特点使得其化学性质活泼,在自然界中绝大多数呈可相互转化的正四、正六价态,存在于氧化物和含氧酸盐中。在南岭成矿带漫长的地质历史中,受多期次的剥蚀沉积、变质作用和构造岩浆活动及热液作用影响,铀的地球化学特征决定了它会在这一过程中不断迁移、富集。

2.1 初始铀源充足

虽然南岭成矿带地层现代铀含量一般为 $2.3 \times 10^{-6} \sim 4.8 \times 10^{-6}$,但是局部尚存现代铀含量偏高或者富铀的岩层。前震旦系变质岩,尤其是新太古代—古元古代形成的成熟度略高的早期地壳,是南岭成矿带的最初铀源。中元古界和新元古界变粒岩、片岩、石英岩等岩石由于陆壳演化趋于成熟,原岩中的酸性火山岩夹杂的细碎屑岩、泥质岩增多。虽然经过中高级变质作用的活化迁出,但是它们铀含量仍有 $3 \times 10^{-6} \sim 7 \times 10^{-6}$ (Huanan Uranium Geology, 2005)。大量地壳重熔型富铀花岗岩的残留锆石年龄为 2000~800Ma,也表明中新元古界含铀岩系是南岭成矿带重要的初始铀源。震旦系上部富铀碳质岩、千枚岩、硅质岩,寒武系下部硅质岩、含黄铁矿和磷结核碳质页岩夹石煤层分布较广,其铀含量一般为 $4 \times 10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$ (黄净白等, 2005^②)。上古生界泥盆系—石炭系含铀性较差,但二叠系富铀。如金银寨矿区龙潭组黑色硅质页岩与碳质页岩互层,含有机碳 0.1%~4%,含黄铁矿 1%~3%,铀含量一般在 $10 \times 10^{-6} \sim 17 \times 10^{-6}$,厚度可达 50~70m (Li Ziyang et al., 2015)^③。它们的预富集作用能为南岭成矿带中生代铀成矿作用提供更为直接的成矿物质。

2.2 多阶段大规模复式花岗岩广泛发育

华夏地块内岩浆作用自吕梁期到喜马拉雅期均有活动,但是南岭成矿带内前寒武纪花岗岩出露不多,仅在西部扬子构造区见有少量四堡期和雪峰期岩浆岩 (Wang Liankui et al., 1981),之后的加里东期、印支期和燕山期花岗岩在南岭地区广泛发育,然而海西期岩浆活动较弱。总体来看,南岭地区花岗岩,尤其是产铀者,自北西向南东侵入时代越来越新、规模越来越大,多被 NE 向断裂控制,呈带状产

出 (Zhang Zuhuan et al., 1991)。

南岭成矿带加里东期花岗岩以南北向和北东向展布为主,以万洋山、诸广山北体、扶溪岩体、都庞岭西体、九嶷山西体、彭公庙岩体等岩体为代表,出露面积约 2050km² (Mo Zhusun, 1980)。印支期花岗岩呈南北向、北东向展布为主,以诸广山南体东部最大,其次有贵东岩体之下庄、帽峰和隘子岩体以及清溪、宝华山、中村、司前、阳明山、大源里、塔山、大义山、五峰仙、邓阜仙等岩体,出露面积约 1900 km²。燕山期花岗岩在南部呈近东西向,北部呈北东向展布,是南岭地区花岗岩的主体。主要有大东山、贵东、龙源坝、陂头、九峰山、九龙脑、骑田岭、九嶷山、禾洞、姑婆山、花山、都庞岭东体、大义山、鹅形、大埠、下村、弹前、永丰、江背、良村、坪溪、新丰街等岩体,出露面积超过 10000 km² (Chen Yuchuan et al., 2007)。上述花岗岩体呈多期多阶段或是同期多阶段形成的大型复式岩基产出,有的面积达到 1000 km² 以上,如桃山矿田花岗岩可划分为 4 期 9 阶段、诸广矿田可划分为 4 期 12 阶段、下庄矿田可划分为 4 期 13 阶段 (Chen Zhenyu et al., 2014)。它们为南岭成矿带铀成矿作用提供了有利的岩浆条件和直接铀源,尤其是以改造型花岗岩 (S 型) 为主体者。其中印支期经演化分异的浅色强过铝质二云母花岗岩、白云母花岗岩铀含量明显偏高,如诸广山南体印支期花岗岩 U 含量 $7.7 \times 10^{-6} \sim 16.2 \times 10^{-6}$, Th 含量 $21.6 \times 10^{-6} \sim 39.2 \times 10^{-6}$, Th /U 2.4~3.4 (Zhu Ba, 2010)。燕山期产铀花岗岩从早到晚经历了中粗粒似斑状黑云母花岗岩→中细粒似斑状二云母花岗岩→细粒白云母花岗岩→碱性岩 (正长岩) 的演化,越到晚期铀含量越高。如诸广山南体燕山期花岗岩 U 含量 $10.6 \times 10^{-6} \sim 24.4 \times 10^{-6}$, Th 含量 $17.3 \times 10^{-6} \sim 42.3 \times 10^{-6}$, Th /U 0.7~2.2 (Zhu Ba, 2010; Huang Guolong et al., 2012, 2014)。同熔型花岗岩中的 A 型花岗岩产出也有一些铀矿床 (占矿床数的 7%),但 I 型花岗岩中仅有少量铀矿点和矿化点产出,而 M 型花岗岩则至今没有发现铀矿点 (Chen Zhenyu et al., 2014)。

2.3 “多”字形断裂网络

南岭成矿带经历了多阶段“开-合”、“升-降”构造运动之后,形成北东向断裂为主、近东西向断裂次之的断裂格架,组成了巨大“多”字形断裂网络。北东向深大断裂深可切入地幔。如双牌-阳朔深大断裂是扬子地块和华夏地块的分界断裂。抚州-遂川、桃山-韶关和宁都-翁源三条深大断裂是燕山早期受

古太平洋板块俯冲作用的影响,形成的一组北东向左行压扭性脆性断裂(黄净白等,2005^②),它们控制了北东向展布花岗岩的产出,且都具有长期活动的特点。南部近东西向宜山-全南深断裂和全南-安远大断裂分别控制了两条近东西向花岗岩带。燕山晚期至喜马拉雅早期,造山后松弛构造环境下,南岭成矿带与华夏地块一起向东南离散。地壳减薄的同时地幔上涌,陆块强烈裂陷,发育一系列高角度正断层和铲状滑脱断裂,形成了一批陆相断陷红盆,盆地群总体呈北东向、北北东向分布(张金带等,2015^③)。如南雄、宁都和鹿井等断陷红盆,它们常叠置于燕山早期花岗岩之上,或是沿其边部发育,拉张伸展强度很大,有的可能深及莫霍面或切入上地幔。深大断裂不仅是南岭成矿带的控岩断裂,也为深部岩浆上涌提供了通道,还是热液运移通道和有利的容矿空间。裂陷拉张构造环境则为铀的定位富集提供了有利的应力环境。

2.4 多阶段多来源成矿流体活动

南岭成矿带铀成矿热液活动与区域性拉张作用具有一致性,已经统计出的6个主成矿热液活动阶段分别为140Ma、120Ma、100Ma、90Ma、70Ma和50Ma(Hu Ruizhong et al., 1990, 2004; Chen Yuehui et al., 1997; Zhu Ba et al., 2006; Li Ziyang, 2006; Cao Haojie et al., 2011, 2013; Chen Zhenyu et al., 2014; 张金带等, 2015^④)。从热液活动与铀矿化的时间关系又可分为成矿前碱交代、成矿前酸交代、成矿期碱交代、成矿期酸交代、成矿后热液及表生流体作用阶段。铀成矿流体可能有花岗岩分异(Ni Shijun et al., 1994)、岩浆水与大气水混合(Ling Hongfei et al., 2011)、幔汁(Du Letian, 1996, 2001, 2009)、地幔柱(热点)(Wang Denghong, 1996, 1998; Li Ziyang, 2006; Li Ziyang et al., 2015)及加入幔源矿化剂形成成矿流体(Hu Ruizhong et al., 1993, 2004)等多种来源。

燕山期花岗岩侵位后的结晶过程中,虽然岩体上部已经固结,但是下部依然存在有 SiO_2 、 K^+ 、 Na^+ 和挥发份等组成的熔流体。该熔流体对流经围岩产生钾长石化或钠长石化的同时,将黑云母蚀变为绿泥石或白云母,溶蚀石英和副矿物,并将 U^{4+} 转化为 U^{6+} ,此为成矿前碱交代作用。成矿前碱交代作用使得岩石多孔疏松、易于破碎、含有活化铀,便于构造破碎,为流体运移提供通道,并为热液萃取成矿物质提供了基础。当碱质热液溶蚀的石英量逐渐增加,流体因 SiO_2 含量不断升高而过渡为酸性热

液。成矿前酸性蚀变主要有浅色硅化、绢云母化、水云母化、绿泥石化、黄铁矿化、高岭土化、伊利石化等蚀变,蚀变岩石还原性增加、吸附性变强、孔隙度变大,有利于铀的变价定位富集成矿。

3 铀矿地质特征

南岭成矿带铀矿床类型和铀矿地质特征是划分矿床式的重要依据,其中产铀花岗岩特征、赋矿围岩特征、控矿构造特征、热液蚀变特征和铀矿化特征至关重要。

3.1 产铀花岗岩特征

南岭成矿带除湖南省桂东县大坪洞小型铀矿床产出于加里东期汤湖岩体外(成矿时代46.6Ma),其余花岗岩型铀矿床都是与中生代花岗岩有关。产铀花岗岩大多是大规模多阶段复式岩基,每个期次不同阶段的侵入体从大岩基到岩脉、从粗粒似斑状到细粒、从黑云母到白云母、从钙碱性到碱性的演化趋势明显。

从造岩矿物看,南岭成矿带产铀花岗岩石英含量较高($>28\%$),钾长石含量大于斜长石,斜长石的多为更长石($\text{An}<30$),黑云母含量较少,常出现白云母但不含角闪石,副矿物有晶质铀矿、钛铁矿、独居石等。南岭成矿带产铀花岗岩主要地球化学特征如下:①高硅, SiO_2 含量 $70.30\%\sim 76.70\%$,在哈克图解上, TiO_2 、 Al_2O_3 、 FeO 、 Fe_2O_3 、 MnO 、 MgO 、 CaO 与 SiO_2 的含量呈现较好的负相关,但是 K_2O 、 Na_2O 和 P_2O_5 大多数情况相关性不甚明显。②过铝,除少量数据显示准铝质外,大多数样品的 A/CNK 值在 $1.01\sim 1.68$ 之间,显示过铝—强过铝质的特点。③偏钾高碱,全碱含量 ALK 为 $6.79\%\sim 9.71\%$,且 $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 的值为 $1.10\sim 4.85$ 之间,属于高钾钙碱性系列岩石。④原始地幔标准化后,相对富集大离子亲石元素 Rb 、 Th 、 U ,而亏损 Ba 、 Sr 、 Ti 和 Nb 、 Ta ,球粒陨石标准化稀土元素配分曲线图则显示 Eu 谷发育的轻稀土元素右倾而重稀土元素较平的特点(Li Xianhua, 1990a; Wu Lieqin et al., 2005; Ling Hongfei et al., 2005; Zhu Ba, 2010; Zhang Wanliang et al., 2011; Huang Guolong et al., 2012, 2014; Shao Fei et al., 2013)。

南岭成矿带产铀花岗岩的 Sr 、 Nd 同位素特征与华南元古宙地壳的 Sm - Nd 同位素特征相似(Shen Weizhou et al., 1999; Zhu Ba, 2010; Yi Liwen et al., 2011), Nd 的两阶段模式年龄 $T_{\text{DM}2}$ 为 $2021\sim 1666\text{Ma}$ (Chen Jiangfeng, 1999; Yi Liwen et al.,

2011),与华南基底变质原岩的年龄数据(1946~1766Ma)相当(Xie Guogang et al., 1997; Zhang Xiaoyang, 2000)。 $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}})$ 分子数值为1.83~6.98, $\text{CaO}/(\text{MgO} + \text{FeO}^{\text{T}})$ 分子数值多数为0.18~0.63,个别比值接近1。在不同成分岩浆岩的源岩判别图上,多数落入变质泥岩和变质杂砂岩部分熔融起源的岩浆区域。加之前述岩石学、地球化学特征具有改造型(S型)花岗岩特征,表明产铀花岗岩是由元古宙变质泥岩和变质杂砂岩部分熔融而来。 Rb/Sr 、 K/Rb 、 Zr/Hf 和 Nb/Ta 的特征表明印支期花岗岩演化分异程度略低(Zhu Ba, 2010; Huang Guolong et al., 2012),而燕山期花岗岩的演化分异程度较高(Zhu Ba, 2010; 张金带等, 2015^①)。

3.2 赋矿围岩特征

铀元素 U^{6+} 运移、 U^{4+} 定位的特征,决定了围岩性质在铀成矿作用中起到至关重要的作用,尤其是对厚富大矿体的形成。南岭成矿带铀矿床赋矿围岩特征如下:① 赋矿围岩富含角闪石、黑云母、绿泥石、有机碳、黄铁矿等还原性物质,能够将热液中的铀还原形成沥青铀矿。如交点型铀矿中的基性岩脉、花岗岩体内的黑云母和黄铁矿及花岗岩外带地层中的碳质、有机物和黄铁矿等还原物质。② 赋矿围岩孔隙度一般较大,因为其有利于流体运移和卸载成矿,如粗粒似斑状花岗岩、成矿前碱交代岩、构造碎裂岩、砂砾岩等。③ 赋矿围岩含有吸附性矿物,黏土矿物如高岭土、伊利石等具有吸附性的矿物在同生富集、热液成矿、次生氧化叠加富集和砂岩型铀成矿作用中起到一定的吸附定位作用。黄铁矿等具有还原性的矿物在铀成矿过程中也具有一定的吸附作用,将沥青铀矿吸附于其周边,形成草莓状产出的沥青铀矿。④ 与花岗岩存在较大的地球化学反差的围岩,如硅钙界面、硅镁界面、硅铁界面、钙铁界面等。

3.3 控矿构造特征

断裂构造是南岭成矿带铀成矿作用的动脉系统,几乎所有的铀矿体都赋存于断裂和构造破碎带内,或是赋存于与断裂相连通的围岩中。不同规模的断裂控制了不同级别的铀矿化:① 南岭成矿带内铀成矿带的边界多是区域性二级断裂,或是受二级断裂控制的花岗岩带。② 铀矿田的分布受二级断裂控制,沿三级断裂分布。③ 铀矿床分布于三级断裂之上,或三级断裂与四级断裂的交汇部位。④ 铀矿体产出于四级断裂之内,或是沿与四级断裂相交的五级断裂、裂隙或层间破碎带(空隙)产出。

3.4 热液蚀变特征

南岭成矿带热液蚀变规模大、范围广、类型全,大的碱交代带、大的硅化断裂带及其中伴生有酸性蚀变是华南花岗岩型铀矿田的主要热液蚀变特征。铀矿田范围内岩体侵位使得围岩发育角岩化和矽卡岩化等接触交代变质作用。之后,随着热液温度由高到低,赋矿花岗岩发育自变质碱交代、云英岩化、硅化、赤铁矿化、绿泥石化、绢云母化、碳酸盐化、萤石化、水云母化、高岭土化、伊利石化等蚀变。垂向分带上表现为“下碱上酸、先碱后酸、酸碱分离”特征(Du Letian, 1996, 2001)。水平分带上可划分为矿化中心带(黑色微晶玉髓化、紫黑色萤石化、赤铁矿化、胶状黄铁矿化、绿泥石化)、近矿蚀变带(灰白色—棕红色硅化、赤铁矿化、水云母化、伊利石化、绿泥石化)、远矿蚀变带(水云母化、碳酸盐化、高岭土化、绢云母化、浅色萤石化)及正常花岗岩。

3.5 铀矿化特征

南岭成矿带铀矿体形态因产出位置不同而各具特色。花岗岩体内部的铀矿体沿断裂产出于构造破碎蚀变带中、与基性岩脉交汇部位或是花岗岩相变部位,通常呈透镜状、板状、脉状、柱状、鱼群状、人参状、团块状、不规则状。花岗岩外接触带型铀矿床的矿体产出于接触界线附近,或是沿断裂产出于外接触带地层中,矿体呈似层状、透镜状、板状、不规则状。碳硅泥岩型矿床一般都受到了后期热液改造,其矿体呈透镜状、扁豆状、不规则状。砂岩型铀矿体形态简单,平面上呈不规则的长条状、剖面上看呈似层状、扁平透镜状。铀矿体产状与断裂或地层产状一致,与还原性界面平行或小角度相交,以中小型矿体为主,长度几十米至200m,但是诸广山长江矿田棉花坑、书楼丘、水石等铀矿床见有垂幅近千米的矿体。矿体平均厚度一般小于10m,但鹿井矿田中黄峰岭、鹿井、高昔等矿床出现有厚度十几到数十米的厚矿体。

矿石的构造类型以脉状、浸染状为主,其中以细脉状、微脉状—浸染状复合类型最为典型,其次有角砾状、条带状构造和晶洞状构造。矿石结构以胶状结构和充填交代结构为主,还可见结晶结构、乳滴状结构、格状结构及溶蚀结构等。铀矿化品位以中低品位者居多,矿床平均品位以0.10%~0.20%为主,贵东岩体下庄矿田332E铀矿床平均品位最低(0.063%),九嶷山大湾矿田NTJ矿床是南岭铀矿床中最富的,局部品位可达14%,矿床平均品位超过1%,其次是诸广山南体百顺矿田201矿床,平均

品位超过 0.500% (Yang Shanghai, 2008)。矿石矿物以沥青铀矿为主, 品质铀矿和铀石较少, 多数矿床因表生淋积富集产出有脂铅铀矿、铀黑、硅钙铀矿、硅钡铀矿、钙铀云母、铜铀云母、铀云母、钙铀矿等次生铀矿物。花岗岩型铀矿床常见的原生矿石矿物主要为沥青铀矿和晶质铀矿, 次生铀矿有铀黑、脂铅铀矿、硅钙铀矿、钙铀云母、铜铀云母等。

4 区域铀成矿规律

(1) 从平面上看, 南岭成矿带铀矿床分布于加里东隆起区内, 铀矿床产出于花岗岩内部构造结和岩体接触带附近。区内分布着成熟度较高的元古宙和早古生代中浅变质岩, 是一套富硅、高铝、富钾的细碎屑岩建造和碳硅泥岩建造。南岭成矿带的鹿井矿田、诸广南部矿田、下庄矿田和武夷山铀成矿带的白面石矿田、河草坑矿田位于深部构造层南雄三叉幔凸与幔凹过渡区, 幔凸自南雄分别向韶关、梅县和吉安方向沿伸 (图见 Zhu Ba, 2010), 暗示铀矿化的产出可能与地幔上涌引起活跃的构造岩浆作用有关。

(2) 从垂向成矿壳层分带性看, 铀矿床的保存在海拔 500m 以下相对低洼的大岩基区, 剥蚀程度相对较强, 有些矿床的矿体一直延续到 300m 标高还有出现 (Du Letian, 2001)。与铀矿床相反, 钨锡矿床的产出都在 500m 标高以上的高山上, 岩体出露规模相对较小, 剥蚀程度较低。铀成矿壳层以铲状断裂系下铲面的韧性构造转换面为下限面, 它既是岩石温度变化的突变面、构造 (压、张) 环境反差面、酸碱分离面, 也是氧化-还原转换面。其上限面为古大地水准面, 是侵蚀基准面、潜水面、渗入水的氧化-还原面, 也是上升热液与下降水的混合面 (Yu Dagan et al., 2007)。

(3) 从成矿时间上看, 南岭成矿带的铀成矿作用与区域性拉张断陷时代一致。燕山运动后碰撞环境、太平洋俯冲的弧后拉张或是地幔柱的热点等多阶段伸展作用控制了南岭成矿带的多阶段铀成矿作用。南岭成矿带自中生代以来经历了 164 (178) ~ 153Ma, 146 ~ 136Ma, 129 ~ 122Ma, 109 ~ 101Ma, 97 ~ 87Ma, 75 ~ 70Ma 和 55 ~ 45Ma 七个主要的伸展阶段 (Li Xianhua et al., 1990b, 1997; Chen Peirong, 2004; Hu Ruizhong et al., 2007), 对应了 165 ~ 140Ma, 120Ma, 100Ma, 90Ma, 70Ma 和 50Ma 等 6 个主铀成矿热液活动阶段 (Hu Ruizhong et al., 2004, 2007)。除少数绢英岩型铀矿、同生沉积型碳硅泥岩型铀矿和铀煤矿化外, 绝大多数为后生

铀矿床, 矿岩时差可达 30Ma 以上。

(4) 南岭成矿带花岗岩型铀矿床呈 NE 向展布, 相对集中分布于桃山-诸广构造岩浆活动带和九嶷山西体-金鸡岭岩体内。纵贯全区的宁都-翁源、桃山-韶关、抚州-遂川、梧州-临武四条 NE 向深大断裂都是区域性控矿断裂。它们控制了南岭成矿带的铀矿田和矿床分布, 但矿体往往赋存于大断裂的次级构造内。如桃山矿田 NE 向的桃山断裂、罗坑断裂是主要的控矿断裂, 但是铀矿体都赋存在其上下盘的裂隙及构造碎裂花岗岩内。

(5) 产铀岩体的构造热液蚀变发育。至今尚未发现构造热液蚀变不发育的岩体发育铀矿床, NE 向主控断裂与 NW 向或 EW 向断裂交汇部位是矿田和矿床的产出有利位置。沿断裂成矿前蚀变大规模发育, 总体呈现出“下碱上酸、先碱后酸、酸碱分离”特征 (Du Letian, 1996, 2001)。蚀变的发育程度和规模与矿床规模密切相关, 黑色-暗红色微晶石英、紫黑色萤石、胶状黄铁矿、红色方解石、绿泥石等矿物常见与沥青铀矿共生, 是良好的指示矿物。此外, 早期高温阶段晶质铀矿等铀矿化与绢英岩化关系密切 (Du Letian, 2009)。

(6) 南岭成矿带铀成矿作用具有统一性。尽管花岗岩型、碳硅泥岩型和砂岩型铀矿及周边铀成矿带产出的火山岩型铀矿床彼此间存在较大差异, 但是它们都是受燕山晚期至喜马拉雅期区域性岩浆-构造-热液活动统一制约的热液铀矿床 (Du Letian and Wang Yuming, 1984)。

5 南岭成矿带中生代“空间全位”铀成矿模式

新太古代-古元古代的南岭地区陆源碎屑岩建造和双峰式火山岩夹复理石建造部分熔融形成的过铝质浅色花岗岩开始产出, 这成为了南岭成矿带铀成矿作用的初始铀源。随着大气中含氧量的升高 (2.2Ga 之后), 大气降水将 U^{4+} 氧化为 U^{6+} 进入水溶液, 和 Se、V、P、Mo、Ni、Cu、Pb 及 Zn 一起沉积富集于黑色岩系之中, 形成沉积碳硅泥岩型铀矿化。南岭成矿带内虽无沉积碳硅泥岩型铀矿床, 但沉积成岩阶段的预富集矿体, 如金银寨式预富集铀矿化 (图 2 中①), 为中生代热液叠加富集铀成矿提供了更为丰富的物质基础。燕山期花岗岩侵位后热液作用在氧化物阶段会产出磁铁矿、赤铁矿、白钨矿、黑钨矿和锡石等氧化物。此时, 如果花岗岩中的铀含量较高, 便会以晶质铀矿微细颗粒的形式晶出, 与

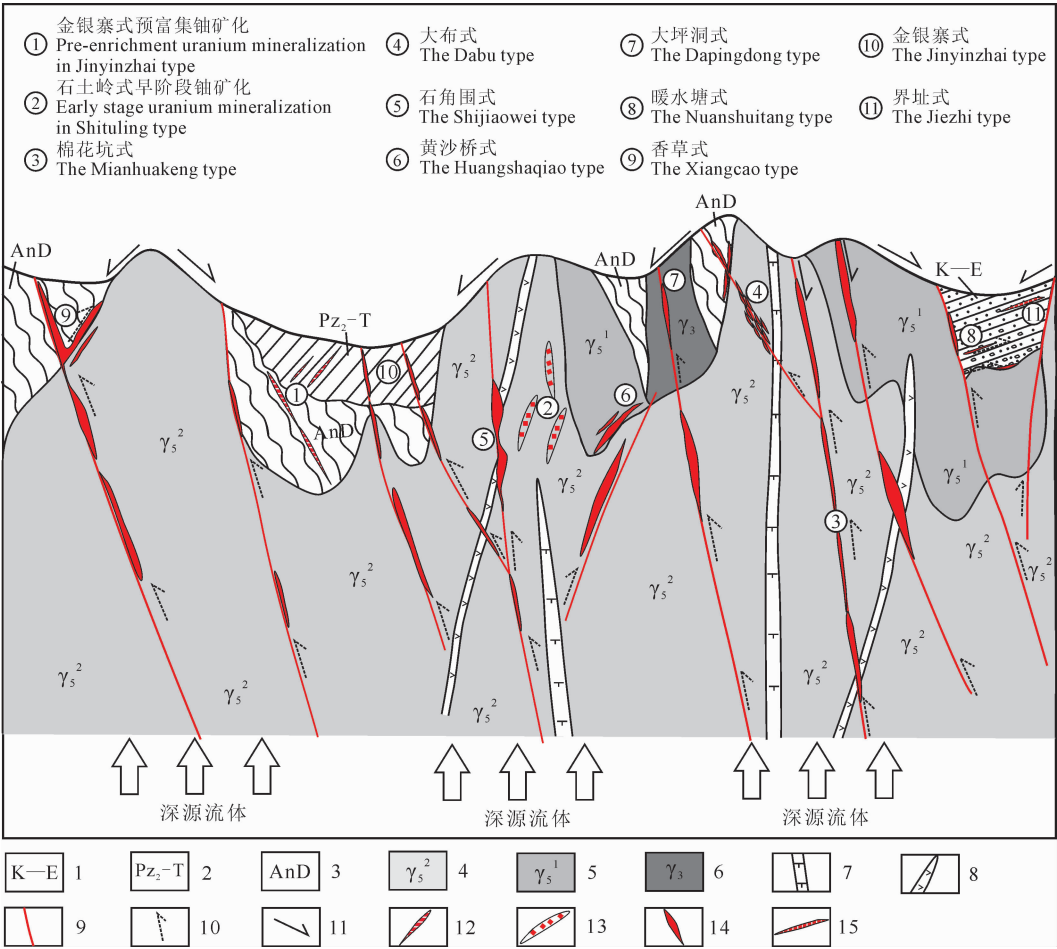


图 2 南岭成矿带中新世代“空间全位”铀成矿模式图

Fig. 2 “Holomorphic space” uranium mineralization model of Nanling metallogenic belt

1—中生代盆地沉积;2—晚古生代—三叠世盖层;3—元古宙—早古生代基底;4—燕山期花岗岩;5—印支期花岗岩;6—加里东期花岗岩;7—正长岩脉;8—基性岩脉;9—断裂;10—成矿热液运移方向;11—表生含氧含铀水运移方向;12—沉积碳硅泥岩型铀矿体;13—花岗岩型晶质铀矿体;14—花岗岩型热液铀矿体;15—砂岩型铀矿体

1—Mesozoic-Cenozoic basin deposition; 2—Paleozoic-Triassic cap; 3—Proterozoic-Early Paleozoic basement; 4—Yanshanian granite; 5—Indovician granite; 6—Caledonian granite; 7—syenite dykes; 8—basical dykes; 9—faults; 10—direction of ore-forming hydrothermal migration; 11—direction of supergene water movement which is containing oxygen and uranium; 12—sedimentary carbonosilicate mudstone type uranium ore body; 13—granite type uranionbite ore body; 14—granite type hydrothermal uranium deposit; 15—sandstone type uranium ore body

之共生的含铀矿物有铀石、铌钽铀矿、黑稀金矿、铀钼矿等,有时与白钨矿、磁铁矿共生,围岩发育绢英岩化等蚀变(Du Letian and Wang Wenguang, 2009),如石土岭式早阶段铀矿化(图 2 中②)。南岭成矿带发育有此类铀矿化的矿床有下庄矿田的石土岭矿床、竹山下矿床、诸广山矿田的澜河矿床、东坑矿床等,晶质铀矿成矿年龄 165 ~ 146Ma (Hu Baoqun et al., 2001),与赋矿花岗岩之间几无矿岩时差,也对应区域上第一次和第二次岩石圈伸展作用时间(164~153Ma 和 146~136Ma)。

络合物分解和还原作用是热液铀成矿作用阶段形成矿物质沉淀成矿的两个最重要条件机制(Ling

Hongfei et al., 2011)。当铀成矿流体沿陡倾硅化破碎带运移时,由于硅化破碎带与地表连通,在垂向上形成相对开放的体系,成矿流体向上运移的速度远大于侧向运移。快速上升流体的压力快速降低,逆向沸腾引发 CO_2 、 H_2S 等挥发份物质快速逸出,碳酸铀酰络合物解析出沥青铀矿,形成定位于陡倾硅化破碎带内大垂幅的脉状、大脉状矿体,如棉花坑式(图 2 中③)。成矿流体在碎裂蚀变花岗岩体内运移时,多孔隙的围岩使得流体运动基本属于渗流,当有来源不同的流体沿断裂流动时,便会在夹持区或不同岩性界面附近的碎裂花岗岩内形成对流,形成陡倾的群脉状、鱼群状铀矿体(Shao Fei et al.,

2013),如大布式(图2中④)。碳质、有机质、黄铁矿、 Fe^{2+} 、 H_2S 、 CH_4 、 H_2 、 CO 等物质是有效的还原剂,能够将 U^{6+} 还原为 U^{4+} 形成沥青铀矿沉淀出来。当含矿流体的运移方向与基性岩脉相交时,基性岩脉中原有的黑云母、角闪石、黄铁矿等矿物中的 Fe^{2+} 和沿脉体上涌的还原性气体将 U^{6+} 还原为 U^{4+} ,在锐角夹持区形成“交点型”铀矿体,如石角围式(图2中⑤)。花岗岩中的黑云母充当还原剂时也形成扁豆状、透镜状矿体,如黄沙桥式(图2中⑥),赋矿围岩还可以是加里东期的花岗岩,如大坪洞式(图2中⑦)。

含矿热液沿断裂自岩体内部流向岩体外围,在外接触带富集成矿时形成外带型铀矿床。赋矿围岩可以是沉积岩,岩层的岩性岩相变化会引起沥青铀矿沉淀,如暖水塘式(图2中⑧),岩层如果发生褶皱,其鞍部也是成矿有利部位。当围岩是富铀的含碳质、含有机物和黄铁矿的浅变质细碎屑岩-泥质岩-硅质岩系时,花岗岩与围岩物理化学反差较大,加之外接触带易破碎的角岩成为有利的容矿空间,成矿流体沿接触界线、断裂和顺层空隙形成透镜状、脉状和似层状矿体,如香草式(图2中⑨)。值得注意的是,接触界线呈港湾状时,两个向外伸出的港湾间的破碎围岩有利于形成品位极富的矿体。富铀的碳硅质泥岩在成岩脱水过程中铀得到了预富集,来自深部的热液驱使含矿层中的铀元素重新分配,并在有利的物理地球化学环境下形成工业矿体,如金银寨式(图2中10)。红盆沉积过程中,产铀花岗岩及已形成的铀矿化遭受剥蚀,含氧水萃取物源区及沉积碎屑中的铀形成的含铀水,在古潜水面的氧化-还原交替部位沉淀成矿,如界址式(图2中11)。多数铀矿床在表生作用阶段,原生铀矿物在含氧水的作用下,向下淋积生成大量次生铀矿物叠加富集于下部原生矿体之上。

南岭成矿带中新生代“空间全位”铀成矿模式显示,不同的构造层、不同的建造、不同的岩性及不同的部位均有铀成矿潜力,但由于具体成矿条件的不同组合,而产出不同类型、不同规模、不同时间和不同强度的铀矿化。

6 讨论

6.1 “全位成矿与缺位找矿”理念

“全位成矿与缺位找矿”理念是矿床成矿体系理论成果的发展与应用,是地质找矿实践与成矿理论研究紧密结合的产物(Wang Denghong et al.,

2006,2007;Chen Yuchuan et al.,2007,2014)。所谓“全位成矿”是指在一定时空范围内,有一定成因联系的成矿作用是全面发生的,时空范围的尺度决定了已经发生、正在发生和将会发生成矿作用的物质来源、成矿类型、矿化规模、矿体定位等。简言之,成矿作用是必然发生的,而矿体的定位是偶然的,取决于比地质作用更加复杂的因素,包括自然因素和社会因素。“缺位找矿”从不同的角度可划分不同的缺位类型,它是在一定的时空范围内,全方位预测(或寻找)尚未被发现的可被人类利用矿产资源的找矿理念。“全位成矿与缺位找矿”是基于成矿体系中相对级别高低(大小)而定义的,全位是相对的,缺位是暂时的。

6.2 找矿应用

南岭成矿带中新生代铀成矿作用广泛发育,因空间位置不同、具体成矿条件的不同,产出铀矿的类型、产状、规模、矿化特征和先后顺序也有所差异。“全位成矿”首先基于南岭成矿带中新生代具有良好的铀成矿条件,有利于铀元素的(萃取)—迁移—富集,进而从不同角度分析其“全位”成矿的规律性和“缺位”找矿的可能性。

如“岩性全位”即“类型全位”,中国铀矿床可以划分为花岗岩型、火山岩型、砂岩型、碳硅泥岩型、伟晶岩型、钠交代岩、不整合面型、碱性岩型、磷块岩型、煤岩型、碳酸盐型、泥岩及泥灰岩型等12个类型。南岭成矿带已经发现的铀矿类型有花岗岩型、碳硅泥岩型和砂岩型,那么处于“缺位”的其他9种类型和岩性便是找矿方向。再如“还原物质全位”,氧化-还原反应是铀元素迁移—富集的重要机制。通常来说,在 U^{6+} 还原为 U^{4+} 形成沥青铀矿的过程中,“还原物质全位”包括碳质、有机质、黄铁矿、 Fe^{2+} 、 H_2S 、 CH_4 、 H_2 、 CO 等物质。碳质、有机质和黄铁矿是大湾矿田常见的还原物质,那么处于“缺位”的还原物质就有 Fe^{2+} 、 H_2S 、 CH_4 、 H_2 、 CO 和岩体内的黄铁矿等。“缺位”岩体内的黄铁矿常见于硅化带内,若发育有硅化带则是有利的找矿部位;“缺位” Fe^{2+} 通常见于暗色矿物和绿泥石等矿物,如果花岗岩内有富含黑云母的相带和中基性岩脉等便是有利的找矿部位;“缺位” H_2S 、 CH_4 、 H_2 和 CO 等还原物质可能来自地幔,也可能来自油气,如有深大断裂和连通烃源岩的断裂就成了找矿有利的部位。由此,我们还可以推得:“时间全位”从早到晚都可以成矿;“空间全位”产铀花岗岩体内部和外围都可成矿;“酸碱全位”花岗岩型铀矿具有“上酸下碱、外酸内

碱、先碱后酸、酸碱分离”的特征;“温度全位”从高温到低温均有铀矿化产出;“流体全位”幔源热液、花岗岩热液、混合热液、地表流体都有可能成矿;“卸载机制全位”热液沸腾、流体沸腾、水岩反应、Eh 和 pH 值变化等都可以沉淀析出铀矿,等等。诸多“全位”是从不同的角度对南岭成矿带中新世代铀成矿作用全面的分析,找出其中尚未落实的“缺位”,根据成矿区、矿田、矿床、矿点和异常点带等不同级别工作区的具体成矿条件实现找矿突破。

7 结论

(1) 南岭成矿带多期多阶段构造演化为铀成矿作用提供了十分有利的成矿条件,产出的铀矿以花岗岩型为主,其次为碳硅泥岩型和少量砂岩型矿床。产铀花岗岩大多是由高硅、过铝、偏钾高碱的 S 型花岗岩组成的大规模多阶段复式岩基。铀矿体形态多样,以中小规模、中低工业品位为主。沿断裂分布的构造碎裂岩、蚀变岩和还原性地体是有利的赋矿围岩。矿化与蚀变中心带发育沥青铀矿、黑色微晶玉髓、紫黑色萤石、胶状黄铁矿、赤铁矿、绿泥石等矿物组合。

(2) 从成矿规律看,南岭成矿带花岗岩型铀矿床分布于加里东隆起区花岗岩内部构造结和岩体接触带附近,矿体沿断裂与蚀变体一起赋存于氧化-还原界面和脆韧性构造转换面之间的“成矿壳层”内,铀成矿时代与中生代区域性多阶段拉张过程一致。

(3) 南岭成矿带中新世代“空间全位”铀成矿模式显示,在不同的构造层、不同的建造和不同的岩性及不同的部位均有成矿潜力,但由于具体成矿条件的不同,而产出不同类型、不同规模、不同时间和不同强度的铀矿化。

(4) 南岭成矿带可以根据不同级别工作区的铀成矿条件,寻找“时间缺位”、“空间缺位”、“(岩性)类型缺位”、“还原物质缺位”、“酸碱缺位”、“温度缺位”、“流体缺位”和“卸载机制缺位”等,取得“缺位找矿”突破。

注 释

- ① 中国核工业地质局《华南铀矿地质志》编写组. 2005. 华南铀矿地质志. 中国核工业地质局,内部资料.
- ② 黄净白,黄世杰,张金带,李友良,韩长青. 2005. 中国铀成矿带概论. 中国核工业地质局内部资料, 1~284.
- ③ 李子颖,张金带,秦明宽,范洪海,蔡煜琦,漆富成,徐浩,夏宗强,张明林,刘蓉蓉,刘武生,贾立城,张宇龙,林锦荣. 2015. 中国铀矿成矿模式. 中国核工业地质局内部资料, 1~298.
- ④ 张金带,李子颖,蔡煜琦,张明林,徐浩,刘红旭,张宇龙,刘武生,贾立城,漆富成,黄新志. 2015. 中国铀成矿区带划分和铀资源的

区位优势. 中国核工业地质局内部资料,1~219.

References

Cao Haojie, Huang Lezhen, Shen Weizhou, Ling Hongfei, Huang Guolong, Dengping. 2011. Geochemical characteristics and genesis of Niudai diabase dykes in northern Guangdong Province. *Journal of East China Institute of Technology (Natural Science)*, 34(4):323~331 (in Chinese with English abstract).

Cao Haojie, Huang Guolong, Xu Lili, Huang Lezhen, Wang Xiaodong, Wu Jianyong, Wang Chunshuang. 2013. The Ar-Ar age and geochemical characteristics of diabase dykes of the Youdong fault zone in south Zhuguang granite pluton. *Acta Geologica Sinica*, 87(7):957~966 (in Chinese with English abstract).

Chen Jiangfeng, Guo Xinsheng, Tang Jiafu, Zhou Taixin. 1999. Nd isotopic model ages; implications of the growth of the continental crust of southeastern China. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 35(6):649~658 (in Chinese with English abstract).

Chen Peirong. 2004. Geodynamic setting of Mesozoic magmatism and its relationship to uranium metallogenesis in southeastern China. *Uranium Geology*, 20(5):266~270 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Zhu Yusheng, Xu Zhigang, Ren Jishun, Zhai Yusheng, Chang Yinfu, Tang Zhongli, Pei Rongfu, Teng Jiwen, Deng Jinfu, Hu Yunzhong, Ren Tianxiang, Shen Baofeng, Wang Shicheng, Xiao Keyan, Peng Runmin, Qian Zhuangzhi, Mei Yanxing, Du Jianguo, Shi Junfa, Zhang Xiaohua, Zhu Mingyu, Xu Jue, Xue Chunji. 2007. *Metallogenic System and Regional Metallogenic Evolution in China*. Beijing: Geology Publishing House, 1~1005 (in Chinese).

Chen Yuchuan, Chen Zhenghui, Zeng Zailin, Zhao Zheng, Zhao Bin, Wang Denghong, ZhangYongzhong, Li Jianguo, Zhou Xinpeng, Li Jiangdong. 2013. Research on the site selection of Nanling scientific drilling-1. *Geology in China*, 40(3):659~670 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuchuan, Wang Denghong, Xu Zhigang, Huang Fan. 2014. Outline of regional metallogeny of ore deposits associated with the Mesozoic magmatism in South China. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2):219~229 (in Chinese with English abstract).

Chen Yuehui, Chen Zuyi, Cai Yuqi, Shi Zuhai, Feng Quanhong, Fu Jin. 1997. Space-time evolution of Meso-Cenozoic extensional tectonics and distributions of uranium mineralizations in South China. *Uranium Geology*, 13(3):129~138(146) (in Chinese with English abstract).

Chen Zhenyu, Huang Guolong, Zhu Ba, Chen Zhenghui, Huang Fan, Zhao Zheng, Tian Zejin. 2014. The characteristics and metallogenic specialization of granite-hosted uranium deposit in the Nanling region. *Geotectonica et Metallogenia*, 38(2):264~275 (in Chinese with English abstract).

Du Letian. 1996. *Geochemical Principles of Alkali-Hydrocarbon Fluid—A Reassessment of Hydrothermal and Magmatic Processes*. Beijing: Science Publishing House, 1~230 (in Chinese).

Du Letian. 2001. *Basic Metallogenic Laws and General Hydrothermal Metallogeny of Hydrothermal Uranium in China*. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1~307 (in Chinese).

Du Letian. 2009. Mantle ichor (HACONS Fluids): The interior crucial factor of geodynamic. *Acta Geoscientia Sinica*, 30(6):739~749 (in Chinese with English abstract).

Du Letian, Wang Yuming. 1984. The unity of metallogenic mechanism of granite-type, volcanic-type, carbon-silicone-mudstone and sandstone-type uranium deposits in South China. *Uranium Geology*, 3:3~12 (in Chinese with English abstract).

Du Letian, Wang Wenguang. 2009. New exploration target for

- granite-type uranium deposits in South China—A case study on uranium mineralization of sericitic alteration. *Uranium Geology*, 25(2):85~90 (in Chinese with English abstract).
- Hu Baoqun, Bai Lihong, Xu Dazhong. 2001. The early high-temperature uranium mineralization in Xiazhuang ore-field and its significance. *Uranium Geology*, 17(5):280~284 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Jin Jingfu. 1990. The origin of lamprophyre in Guidonggranitic complex. *Mineralogy and Petrology*, 10(4):1~7 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Li Chaoyang, Ni Shijun, Liu Li, Yu Jinsheng. 1993. The study on the origin of ΣCO_2 in hydrothermal from granite-type uranium deposit in the South China. *Science in China (Series B)*, 23(2):189~196 (in Chinese).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Wu Wenchao, Peng Jiangtang, Li Chaoyang. 2004. The relationship between uranium metallogenesis and crustal extension during the Cretaceous-Tertiary in South China. *Earth Science Frontiers*, 11(1):153~160 (in Chinese with English abstract).
- Hu Ruizhong, Bi Xianwu, Peng Jiangtang, Liu Shen, Zhong Hong, Zhao Junhong, Jiang Guohao. 2007. Some problems concerning relationship between Mesozoic-Cenozoic lithospheric extension and uranium metallogenesis in South China. *Mineral Deposits*, 26(02):139~152 (in Chinese with English abstract).
- Huang Guolong, Cao Haojie, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Wang Xiaodong, Fu Shuncheng. 2012. Zircon SHRIMP U-Pb age, geochemistry and genesis of Youdong granite in northern Guangdong. *Acta Geologica Sinica*, 86(4):577~586 (in Chinese with English abstract).
- Huang Guolong, Liu Xinyang, Sun Liqiang, Li Zhongshu, Zhang Shijia. 2014. Zircon U-Pb dating, Geochemical characteristic and genesis of the Changjiang granite in northern Guangdong. *Acta Geologica Sinica*, 88(5):836~849 (in Chinese with English abstract).
- Javoy M. 1990. The birth of the earth's atmosphere; the behaviour and fate of its major elements. *Chem. Geol.*, 147:11~25.
- Li Xianhua. 1990a. The magmatic activity age and crustal movement of Wanyangshan-Zhuguangshan granitoids complex. *Science in China (Series B)*, (7):747~755 (in Chinese).
- Li Xianhua. 1990b. A preliminary study on the genesis of medium-basic dykes in Zhuguang rock mass—evidence of Sr, Nd and O isotopes. *Chinese Science Bulletin*, 16:1247~1249 (in Chinese).
- Li Xianhua, Hu Ruizhong, Rao Bing. 1997. Geochronology and geochemistry of cretaceous mafic dikes from northern Guangdong SE China. *Geochimica*, 26(2):14~31 (in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang. 2006. Hotspot uranium metallogenesis in South China. *Uranium Geology*, 22(2):65~69(82)(in Chinese with English abstract).
- Li Ziyang, Huang Zhizhang, Li Xiuzhen, Guo Jian, Fan Chou. 2015. The discovery of native uranium and its significance. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 89(5):1561~1567.
- Ling Hongfei. 2011. Origin of hydrothermal fluids of granite-type uranium deposit: constraints from redox conditions. *Geological Review*, 57(2):193~206 (in Chinese with English abstract).
- Ling Hongfei, Shen Weizhou, Deng Ping, Jiang Shaoyong, Jiang Yaohui, Qiu Jiansheng, Huang Guolong, Ye Haimin, Tan Zhengzhong. 2005. Study of geochemistry and petrogenesis of the Maofeng granite, northern Guangdong Province. *Acta Petrologica Sinica*, 21(3):677~687 (in Chinese with English abstract).
- Mo Zhusun, Ye Bodan, Pan Weizu, Wang Shaonian, Zhuang Jinliang, Gao Bingzhang, Liu Jinquan, Liu Wenzhang. 1980. *Geology of Granitoids in Nanling Region*. Beijing: Geological Publishing House, 1~363 (in Chinese with English abstract).
- Ni Shijun, Hu Ruizhong, Jin Jingfu. 1994. A vertical zoning model generated by the mixing and boiling of hydrothermal solution for uranium deposit NO. 302. *Uranium Geology*, 10(2):70~77 (in Chinese with English abstract).
- Shao Fei, Xu Jianjun, Mao Yufeng, He Xiaomei, Gao Mengqi. 2013. Study on mineral discharge mechanism of granite type uranium deposit in South China uranium metallogenetic province. *Uranium Geology*, 29(3):146~151 (in Chinese with English abstract).
- Shen Weizhou, Ling Hongfei, Li Wuxian, Huang Xiaolong, Wang Dezi. 1999. Study on the Nd-Sr isotopic compositions of granitoids in SE China. *Geological Journal of China Universities*, 5(1):22~32 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 1996. Mantle plume and hot spot mineralization. *Acta Geoscientia Sinica*, 17(4):393~400 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 1998. *Mantle Plume and Its Mineralization*. Beijing: Seismic Publishing House, 1~160 (in Chinese).
- Wang Denghong. 2019. Study on critical mineral resources: significance of research, determination of types, attributes of resources, progress of prospecting, problems of utilization, and direction of exploitation. *Acta Geologica Sinica*, 93(6):1189~1209 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Chen Yuchuan, Zhu Yusheng, Zhu Mingyu, Xu Zhigang. 2006. The construction of the Chinese ore-forming system based on minerogenetic series and its application. *Mineral Deposits*, 25(5):43~46 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Luo Yaonan, Qu Wenjun, Li Yunquan, Fu Deming. 2007. *Geology, Geochemistry and Prospecting of Platinum Group Elements Deposits in Southwest China*. Beijing: Geology Publishing House, 1~335 (in Chinese).
- Wang Liankui, Fan Sikun, Zhu Weifang, Wu Xueyi, Gui Xuntang, Zhang Shaoli. 1981. Age and time division of granites in the Nanling region, South China—A review. *Geochimica*, 3:281~293 (in Chinese with English abstract).
- Wu Lieqin, Huang Guolong, Shen Weizhou, Ling Hongfei, Ye Haimin, Liu Ruzhou, Zou Zhiwen. 2005. Study on geochemical characteristics and genesis of Xiazhuang granite, northern Guangdong. *Uranium Geology*, 21(2):65~71 (in Chinese with English abstract).
- Xie Guogang. 1997. On the lower boundary of the Shuangqiaoshan Group in Jiangxi. *Regional Geology of China*, 16(4):410~414 (in Chinese with English abstract).
- Yang Shanghai. 2008. Uranium metallogenetic features and prospecting potentialities in the areas around Shabazi uranium deposit in Nanling metallogenetic belt. *World Nuclear Geoscience*, 24(4):195~203 (in Chinese with English abstract).
- Yi Liwen, Ma Changqian, Liu Xianfan. 2011. The study on Sr-Nd-Hf isotope and U-Pb dating of zircon in dacite from north Xiazhuang in Guidong rock mass. *Journal of Minerals*, S1:660~661 (in Chinese).
- Yu Dagan, Wu Rengui. 2007. Uranium “metallogenetic lithospheric layer” and “thermal upwelling structure”. *Uranium Geology*, 23(1):17~22 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wanliang. 2011. Uranium deposit type, characteristics and its spatial distribution in South China. *Mineral Resources and Geology*, 25(4):265~272 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Xiaoyang. 2000. Sm-Nd isotope age and its geological significance of Cangxi group complex at Wenjiashi area of northeastern Hunan. *Hunan Geology*, 19(3):157~158 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zuhuan, Zhang Bangtong. 1991. *Research on uranium granite and related uranium deposits in South China*. Beijing: Atomic Energy Publishing House, 1~215 (in Chinese).
- Zhu Ba, Ling Hongfei, Shen Weizhou, Gao Jianfeng, Deng Ping, Huang Guolong, Tan Zhengzhong. 2006. Isotopic geochemistry of Shituling uranium deposit, northern Guangdong Province, China. *Mineral Deposits*, 25(1):71~82 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Ba. 2010. The study of mantle liquid and uranium

metallogenesis—Take uranium ore field of south Zhuguan mountain as an example. Chengdu Institue of Technology, 1~114 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

曹豪杰,黄乐真,沈渭洲,凌洪飞,黄国龙,邓平,朱捌. 2011. 粤北牛岳辉绿岩脉的地球化学特征及其成因研究. 东华理工大学学报(自然科学版),34(4):323~331.

曹豪杰,黄国龙,许丽丽,黄乐真,王小冬,吴建勇,王春双. 2013. 诸广花岗岩体南部油洞断裂带辉绿岩脉的 Ar-Ar 年龄及其地球化学特征. 地质学报,87(7):957~966.

陈江峰,郭新生,汤家富,周泰禧. 1999. 中国东南地壳增长与 Nd 同位素模式年龄. 南京大学学报(自然科学),35(6):649~658.

陈培荣. 2004. 华南东部中生代岩浆作用的动力学背景及其与铀成矿关系. 铀矿地质, 20(5):266~270.

陈毓川,裴荣富,张宏良,林新多,白鸽,刘妍群,夏宏远,夏卫华,李崇佑,虞钟琪,胡永嘉,洗柏琪,仇年铭,叶庆同,王立华,孟令库,张德全. 1989. 南岭地区与中生代花岗岩类有关的有色及稀有金属矿床地质. 北京:地质出版社,1~508.

陈毓川,王登红,朱裕生,徐志刚,任纪舜,翟裕生,常印佛,汤中立,裴荣富,滕吉文,邓晋福,胡云中,任天祥,沈保丰,王世称,肖克炎,彭润民,钱壮志,梅燕雄,杜建国,施俊法,张晓华,朱明玉,徐珏,薛春纪. 2007. 中国成矿体系与区域成矿评价. 北京:地质出版社,1~1005.

陈毓川,王登红. 2012. 华南地区中生代岩浆成矿作用的四大问题. 大地构造与成矿学,36(03):315~321.

陈毓川,陈郑辉,曾载淋,赵正,赵斌,王登红,张永忠,李建国,周新鹏,李江东. 2013. 南岭科学钻探第一孔选址研究. 中国地质, 40(3):659~670.

陈毓川,王登红,徐志刚,黄凡. 2014. 华南区域成矿和中生代岩浆成矿规律概要. 大地构造与成矿学, 38(2):219~229.

陈跃辉,陈祖伊,蔡煜琦,施祖海,封宏全,付锦. 1997. 华南中新世代伸展构造时空演化与铀矿化时空分布. 铀矿地质,13(3):129~138(146).

陈振宇,黄国龙,朱捌,陈郑辉,黄凡,赵正,田泽瑾. 2014. 南岭地区花岗岩型铀矿的特征及其成矿专属性. 大地构造与成矿学,38(2):264~275.

杜乐天. 1996. 烃碱流体的地球化学原理——重论热液作用和岩浆作用. 北京:科学出版社, 1~230

杜乐天. 2001. 中国热液铀矿基本成矿规律和一般热液成矿学. 北京:原子能出版社,1~307.

杜乐天. 2009. 幔汁(HACONS 流体)地球内动因探索. 地球科学,30(6):739~749

杜乐天,王文广. 2009. 华南花岗岩型铀矿找矿新目标——绢英岩化铀矿类型. 铀矿地质,25(2):85~90.

杜乐天,王玉明. 1984. 华南花岗岩型、火山岩型、碳硅泥岩型、砂岩型铀矿成矿机理的统一性. 铀矿地质,3:3~12.

胡宝群,白丽红,徐达忠. 2001. 下庄铀矿田早期高温成矿作用及其意义. 铀矿地质, 17(5):280~284.

胡瑞忠,金景福. 1990. 贵东花岗岩体中煌斑岩的成因. 矿物岩石, 10(4):1~7.

胡瑞忠,李朝阳,倪师军,刘莉,于津生. 1993. 华南花岗岩型铀矿床成矿热液中 ΣCO_2 来源研究. 中国科学(B 辑),23(2):189~196.

胡瑞忠,毕献武,吴文超,彭建堂,李朝阳. 2004. 华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系. 地学前缘(中国地质大学,北京),11(1):153~160.

胡瑞忠,毕献武,彭建堂,刘桑,钟宏,赵军红,蒋国豪. 2007. 华南地区中生代以来岩石圈伸展及其与铀成矿关系研究的若干问题. 矿床地质,26(02):139~152.

黄国龙,曹豪杰,凌洪飞,沈渭洲,王小冬,伏顺成. 2012. 粤北油洞岩体 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄、地球化学特征及其成因研究. 地质学报,86(4):577~586.

黄国龙,刘鑫扬,孙立强,李钟枢,张世佳. 2014. 粤北长江岩体的锆石 U-Pb 定年、地球化学特征及其成因研究. 地质学报,88(5):836~849.

李献华. 1990a. 万洋山-诸广山花岗岩复式岩基的岩浆活动时代与地壳运动. 中国科学(B 辑), 7:747~755.

李献华. 1990b. 诸广山岩体内中基性岩脉的成因初探——Sr、Nd、O 同位素证据. 科学通报,16:1247~1249.

李献华,胡瑞忠,饶冰. 1997. 粤北白垩纪基性岩脉的年代学和地球化学. 地球化学,26(2):14~31.

李子颖. 2006. 华南热点铀成矿作用. 铀矿地质,22(2):65~69(82).

凌洪飞. 2011. 论花岗岩型铀矿床热液来源——来自氧逸度条件的制约. 地质论评,57(2):193~206.

凌洪飞,沈渭洲,邓平,蒋少涌,姜耀辉,邱检生,黄国龙,叶海敏,谭正中. 2005. 粤北帽峰花岗岩体地球化学特征及成因研究. 岩石学报,21(3):677~687.

莫柱荪,叶伯丹,潘维祖,汪绍年,庄锦良,高秉章,刘金全,刘文章. 1980. 南岭花岗岩地质学. 北京:地质出版社,1~363.

倪师军,胡瑞忠,金景福. 1994. 302 铀矿床热液的混合和沸腾垂直分带模式. 铀矿地质,10(2):70~77.

邵飞,许健俊,毛玉峰,何晓梅,高梦奇. 2013. 华南铀成矿省花岗岩型铀矿矿质卸载机制研究. 铀矿地质, 29(3):146~151.

沈渭洲,凌洪飞,李武显,黄小龙,王德滋. 1999. 中国东南部花岗岩类 Nd-Sr 同位素研究. 高校地质学报,5(1):22~32.

王登红. 1996. 地幔柱与热点的成矿作用. 地球学报,17(4):393~400.

王登红. 1998. 地幔柱及其成矿作用. 北京:地震出版社,1~160.

王登红. 2019. 关键矿产的研究意义、矿种厘定、资源属性、找矿进展、存在问题及主攻方向. 地质学报,93(6):1189~1209.

王登红,陈毓川,朱裕生,朱明玉,徐志刚. 2006. 以矿床成矿系列构筑中国成矿体系及其运用. 矿床地质,25(增刊):43~46.

王登红,骆耀南,屈文俊,李云泉,付德明. 2007. 中国西南铂族元素矿床地质、地球化学与找矿. 北京:地质出版社,1~335.

王联魁,范嗣昆,朱为芳,吴学益,桂训堂,张绍立. 1981. 南岭花岗岩时代和分期讨论结果的总述. 地球化学,3:281~293.

吴烈勤,黄国龙,沈渭洲,凌洪飞,叶海敏,刘汝洲,邹志文. 2005. 粤北下庄花岗岩体地球化学特征与成因研究. 铀矿地质,21(2):65~71.

谢国刚. 1997. 论江西双桥山群的底界问题. 中国区域地质, 16(4):410~414.

杨尚海. 2008. 南岭成矿带沙坝子矿床外围铀成矿特征与找矿前景. 世界核地质科学,24(4):195~203.

易立文,马昌前,刘显凡. 2011. 贵东岩体下庄北缘英安岩的锆石 Sr-Nd-Hf 同位素研究与 U-Pb 定年. 矿物学报,(增刊):660~661.

余达淦,吴仁贵. 2007. 铀“成矿壳层”与“热隆构造”. 铀矿地质,23(1):17~22.

张万良. 2011. 华南铀矿类型、特点及其空间分布. 矿产与地质, 25(4):265~272.

张晓阳. 2000. 湘东北文家市地区仓溪岩群 Sm-Nd 同位素年龄及其地质意义. 湖南地质,19(3):157~158.

张祖还,章邦桐. 1991. 华南产铀花岗岩及有关铀矿床研究. 北京:原子能出版社,1~215.

朱捌. 2010. 地幔流体与铀成矿作用——以诸广山南部铀矿田为例. 成都理工大学,1~114.

朱捌,凌洪飞,沈渭洲,高剑峰,邓平,黄国龙,谭正中. 2006. 粤北石土岭铀矿床同位素地球化学研究. 矿床地质, 25(1):71~82.

Geological characteristics, metallogeny and geospatial mineralization model of uranium in the Nanling metallogenic belt

ZHAO Ruyi^{1,2)}, WANG Denghong^{* 2)}, CHEN Yuchuan²⁾, LENG Chengbiao¹⁾,
QIN Jinhua²⁾, ZHAO Chenhui²⁾

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

2) *Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Ministry of National Resources, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037*

** Corresponding authors: 92126749@qq.com; wangdenghong@vip.sina.com*

Abstract

Nanling metallogenic belt is an important uranium resource base of China. The granite type is the dominant uranium deposit type, with carbonaceous silicous-pelitic rock type and some sandstone type uranium deposits occurring as minor types. In this study, we compile and analyze the available literature on uranium prospecting, exploration and scientific research. We confirm that the favorable geological conditions for mineralization of uranium i. e. the initial source of uranium, uranium productive granitic massif, nets of fault junctures, uranium hydrothermal etc. were formed during the multi-stage tectonic evolution of Nanling metallogenic belt. Most of the uranium productive granitic massifs are the S-type granites characterized by high content of Si, peraluminous, meta-potassium and alkali. The favorable ore-bearing wallrocks are the cataclastic rocks, altered rocks and reductive geological bodies which are distributed along the faults. The mineral assemblage formed in the central zone of mineralization and alteration is composed of pitchblende, black microcrystalline chalcedony, purple black fluorite, colloidal pyrite, hematite, chlorite etc. Uranium ore bodies are mainly medium to small in scale, and of medium to low industrial grade. The research on metallogenic regularity indicates that the multi-stage uranium mineralization occurred during the regional extension in the Meso-Cenozoic. Granite-type uranium deposits are distributed near the contact zones or in the internal tectonic junction of granite rock bodies from the Caledonian uplift area. The orebodies along the fracture and in the erosional geological bodies are distributed in the “metallogenic crust” between the oxidation-reduction interface and the transition plane of brittle and ductile structure. The “holomorphic space” uranium mineralization model shows that there could be potential mineralization places in different tectonic layers, formations, lithology and spaces. However, the types, scales, and metallogenic times of uranium deposits are different due to the diversity of metallogenic conditions in different sites implying that no space can be excluded as a potential site for mineralization. Under this assumption, new uranium prospecting breakthroughs can be made based on the specific ore-forming conditions in the working areas. Summarising, the uranium mineralization in the Nanling metallogenic belt in Mesozoic-Cenozoic is comprehensively analyzed from different perspective in this study based on the recognition of “holomorphic space mineralization”.

Key words: Nanling region; uranium; geological characteristics; mineralization regularity; metallogenic model; holomorphic mineralization