

攀枝花大田铀矿床基本特征及成因

孙泽轩¹⁾, 陈友良²⁾, 姚建¹⁾, 韩文文¹⁾, 王凤岗³⁾, 张亮¹⁾

1) 核工业 280 研究所, 四川广汉, 618300; 2) 成都理工大学, 成都, 610059;

3) 核工业北京地质研究院, 北京, 100029

内容提要: 大田铀矿床为康滇古陆上探明的首例铀矿床。在矿床勘探过程中, 共施工钻探 29712 m、槽探 5000 m³, 发现工业铀矿孔 25 个、铀矿化孔 6 个。本文在野外调查、岩芯编录和勘探剖面编制的基础上, 结合样品分析测试, 对大田铀矿床基本特征及成因进行了研究。结果表明, 大田铀矿床是在 Rodinia 大陆裂解拉张背景下, 构造热液作用过程中形成的。已探明铀矿(化)体定位于构造蚀变带内, 矿体形态呈透镜状、脉状。原生铀矿物以晶质铀矿为主, 含少量钛铀矿、沥青铀矿。赋矿岩石为斜长角闪岩, 其原岩为侵位于构造蚀变带内的辉长岩脉。主量元素特征显示, 赋矿岩石与基性岩类辉长岩主量元素含量特征一致; 稀土元素特征显示, 赋矿岩石的原岩形成于拉张构造环境。铀成矿与钠交代作用关系密切。

关键词: 构造蚀变带; 斜长角闪岩脉; 钠交代作用; 晶质铀矿; 大田铀矿床; 攀枝花地区

康滇古陆中南段攀枝花地区出露一套前寒武纪中、深变质岩系, 俗称康定群(康定杂岩)。近年来, 相继在康定群中发现巨粒晶质铀矿(张成江等, 2015; 王凤岗等, 2017)、特富铀矿(姚建, 2014), 并在攀枝花地区康定群中探明了大田铀矿床。大田铀矿床为康滇古陆上探明的首例铀矿床, 因而成为铀矿地质工作者研究的热点。前人的研究主要集中在赋矿岩石及围岩岩石地球化学特征(姚建等, 2014; 刘云鹤等, 2016; 张航等, 2018; 郑玉文等, 2019)、年代学特征(杜利林等, 2007; 姚建等, 2015, 2017; 柏勇等, 2019)、成因(姚建, 2014; 郭锐等, 2019)、铀矿物学特征(张成江等, 2015; 徐争启等, 2015; 王凤岗等, 2017)、铀地球化学特征(常丹等, 2015; 欧阳鑫东, 2017)、铀矿化特征(莫帮洪等, 2013; 徐争启等, 2019)、铀矿物年代学特征及成因(徐争启等, 2017; 武勇等, 2020), 以及铀矿勘查综合物探方法应用(汪来等, 2016)等, 而矿床基本特征、成因, 以及成矿模式等是研究的薄弱环节。笔者等根据矿床勘探实践, 结合样品分析测试, 对攀枝花大田铀矿床基本特征及成因进行探讨, 旨在对区内从事铀矿找矿工作的同行们有所启迪。

1 区域地质背景

攀枝花地区地处扬子陆块西缘康滇古陆中南段。区内地层, 除志留系外, 从新元古界至新生界均有出露(图 1); 岩浆活动强烈, 并具多期次活动特点。侵入岩以中酸性侵入岩为主, 基性侵入岩次之; 褶皱、断裂构造发育。其中, 基底构造以近东西向为主, 盖层构造以北东、北西, 以及南北向为主。大田复式背斜是区内典型的基底褶皱, 轴部近东西向, 两翼出露新元古界康定群和河口群, 核部被新元古代青白口纪石英闪长岩侵位吞食。大田铀矿床即定位于大田复式背斜南翼康定群中。

2 矿区地质特征

2.1 地层

康定群是康滇古陆上出露最古老的地质体, 在攀枝花地区自下而上划分为咱里组(Pt_3zl)和冷竹关组(Pt_3lz)。矿区内仅出露下部层位咱里组, 根据咱里组岩性特征及接触关系可划分为三个岩性段(图 2):

咱里组三段(Pt_3zl^3): 斜长角闪岩(图 3a、3b),

注: 本文为国家自然科学基金资助项目“攀西地区混合岩型铀矿成矿机理研究”(编号: 41472073)、中国核工业地质局项目“四川攀枝花大田地区铀矿普查”(编号: 201638-1, 201807-1)的成果。

收稿日期: 2020-02-28; 改回日期: 2020-06-13; 责任编辑: 章雨旭。Doi: 10.16509/j.georeview.2020.04.015

作者简介: 孙泽轩, 男, 1966 年生, 博士, 高级工程师(研究级), 主要从事层序地层学与含油气盆地分析、铀成矿地质条件分析; 通讯地址: 618300, 四川省广汉市成都路东二段 180 号; Email: 270162313@qq.com。

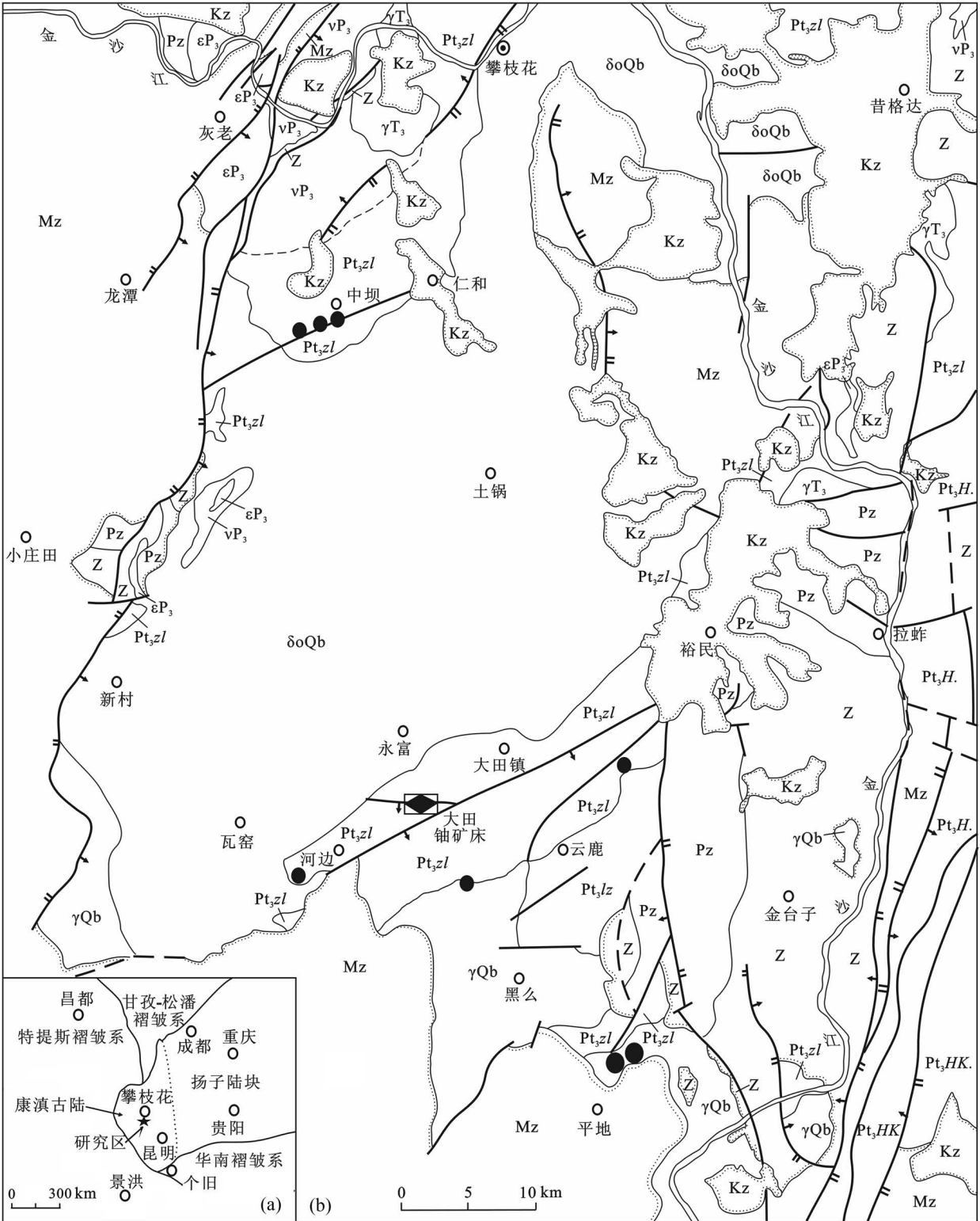


图 1 攀枝花地区铀矿地质略图

Fig. 1 Geological Sketch of uranium deposit in Panzhihua area

Kz—新生界;Mz—中生界;Pz—古生界;Z—震旦系;Pt₃H. —会理群;Pt₃HK. —河口群;Pt₃Lz—冷竹关组;Pt₃zl—咱里组;γT₃—晚三叠世花岗岩;εP₃—晚二叠世正长岩;νP₃—晚二叠世辉长岩;δoQb—新元古代青白口纪石英闪长岩;γQb—新元古代青白口纪花岗岩
Kz—Cenozoic;Mz—Mesozoic;Pz—Paleozoic;Z—Sinian System;Pt₃H. —Huili Group;Pt₃HK. —Hekou Group;Pt₃Lz—Lengzhuguan Formation;Pt₃zl—Zali Formation;γT₃—Late Triassic granite;εP₃—Late Permian syenite;νP₃—Late Permian gabbro;δoQb—quartz diorite of Qingbaikou Period, Neoproterozoic;γQb—granite of Qingbaikou Period, Neoproterozoic

混合岩化斜长角闪岩,斜长角闪片麻岩。粒状变晶结构,片麻状、块状构造。其原岩为基性火山岩(拉斑玄武岩)。铀含量 $2.1 \times 10^{-6} \sim 4.2 \times 10^{-6}$ 。锆石 U-Pb 同位素年龄 $816.0 \sim 833.6$ Ma(郑玉文等,2019)。

咱里组二段(Pt₃zl²):含石墨黑云母片岩,黑云母石英片岩,黑云母斜长片麻岩,黑云母斜长混合岩。鳞片变晶、斑状结构,片麻状、厚层块状构造。其原岩为沉积碎屑岩类。铀含量 $5.6 \times 10^{-6} \sim 15.5 \times 10^{-6}$ 。混合岩锆石 U-Pb 同位素年龄 $771 \sim 837$ Ma(姚建等,2015,2017)。

咱里组一段(Pt₃zl¹):黑云母斜长片麻岩,眼球状片麻岩,眼球状混合岩。粒状变晶、斑状结构,片麻状、眼球状构造。其原岩为酸性侵入岩类。铀含量 $5.8 \times 10^{-6} \sim 16.7 \times 10^{-6}$ 。锆石 U-Pb 同位素年龄 822 Ma(姚建等,2014)。

2.2 侵入岩

青白口纪石英闪长岩(δoQb):分布于矿区北部,侵位于大田复式背斜核部,亦称大田石英闪长岩。岩石呈灰白色,细—中粒半自形粒状结构,片麻状、块状结构。主要矿物成分为中长石、普通角闪石、石英、黑云母,副矿物以锆石、磷灰石为主,磁铁矿、钛铁矿次之。铀含量 $2.6 \times 10^{-6} \sim 6.1 \times 10^{-6}$ 。锆石 U-Pb 同位素年龄 827 Ma(姚建等,2014)。

细晶花岗岩脉(γ):呈北东、北西,以及近东西向侵位于咱里组、石英闪长岩或斜长角闪岩脉中(图 3c)。岩石呈白色,细粒花岗结构,块状构造。主要矿物成分为长石、石英,含少量白云母。铀含量 $4.5 \times 10^{-6} \sim 8.9 \times 10^{-6}$ 。锆石 U-Pb 同位素年龄 $760 \sim 770$ Ma(柏勇等,2019)。

斜长角闪岩脉(υφo):呈脉状发育于 F₁、F₂、F₄ 三条构造蚀变带内(图 3c、d),是大田铀矿床主要赋矿岩石。岩石呈深灰—灰黑色,细粒斑杂状—粒状变晶结构、碎裂结构、交代结构,角砾状、块状构造。主要矿物成分为角闪石和斜长石,副矿物为绿帘石、透辉石、榍石、磷灰石,以及钛铁矿等。根据斜长角闪岩脉的产状,结合矿物学特征,推测其原岩可能为

侵位于构造蚀变带内的辉长岩脉。铀含量 $2.3 \times 10^{-6} \sim 3.8 \times 10^{-6}$ 。锆石 U-Pb 同位素年龄 $770 \sim 780$ Ma(张航等,2018;柏勇等,2019)。

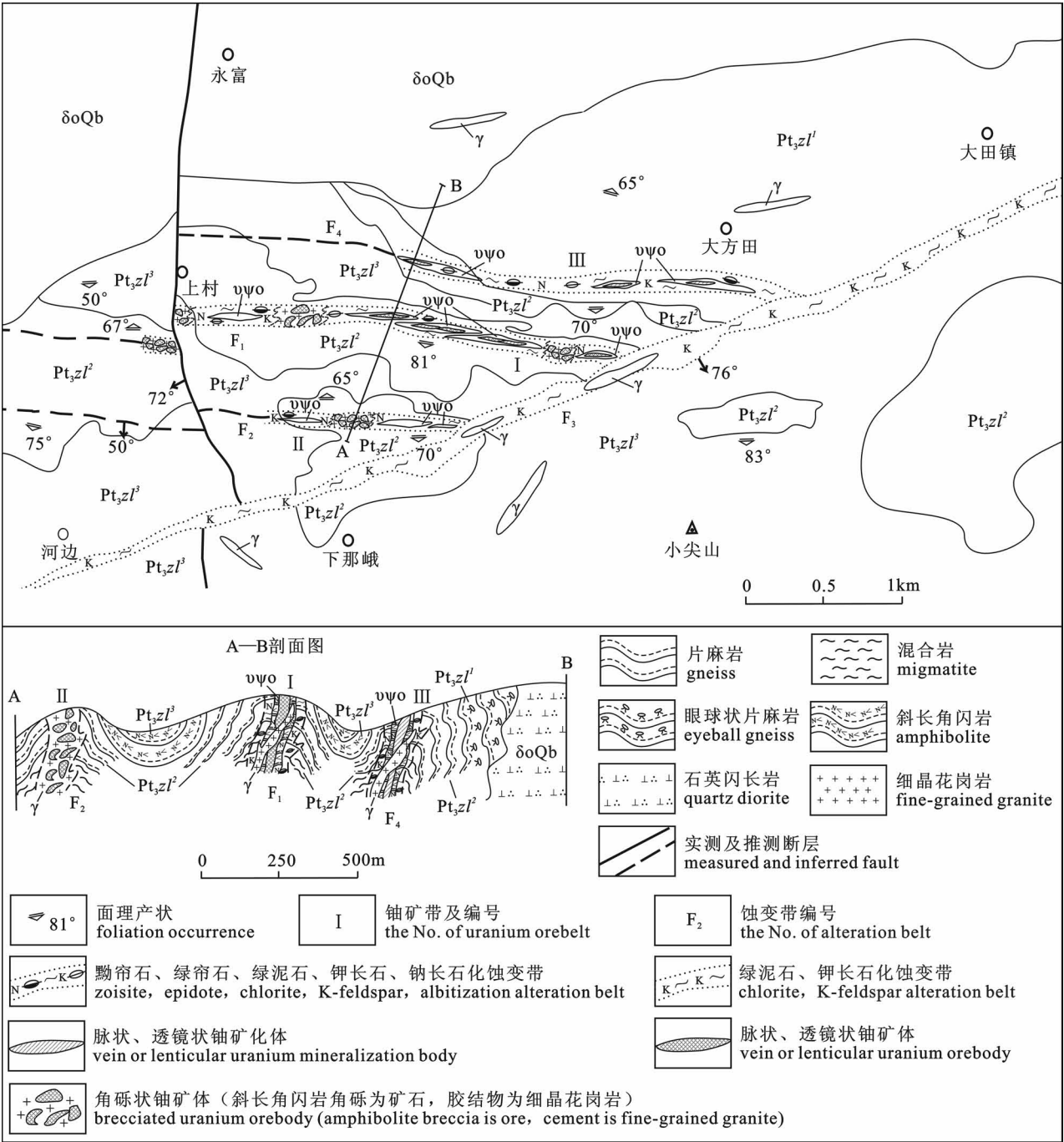
2.3 构造蚀变带

大田复式背斜南翼构造形迹主要表现为,近东西向紧密排列的直立—斜歪褶曲,并伴有大规模密集的轴面面理及斜交面理组合,从而形成矿区内四条构造蚀变带(亦称绿色蚀变带)。

F₁:发育于咱里组二段组成的褶曲轴部位置。呈近东西走向,长约 3.0 km,宽 250 m。倾向南,倾角 $55^\circ \sim 80^\circ$ 。蚀变带内发育斜长角闪岩脉(图 3c)、细晶花岗岩脉(图 3c)、角砾岩(亦称角砾状斜长角闪岩)(图 3e)。斜长角闪岩脉呈群脉状侵位于咱里组二段黑云母斜长片麻岩、黑云母斜长混合岩中,与蚀变带产状一致,长 250~650 m,宽 1~75 m;细晶花岗岩脉呈近东西或北东向侵位于斜长角闪岩脉或咱里组二段黑云母斜长片麻岩、黑云母斜长混合岩中,长 50~250 m,宽 0.1~25 m;角砾岩呈带状分布于蚀变带东部和西部(图 2),角砾成分为斜长角闪岩,角砾棱角明显,可拼合,并被细晶花岗岩胶结,角砾岩出露宽度与蚀变带一致,角砾直径一般 10~50 cm,大者大于 1 m。主要蚀变矿物为钾长石(图 4a)、钠长石(图 4b、d)、黝帘石(图 4c)、绿帘石(图 4e)、绿泥石(图 4f)等。

F₂:发育于咱里组二段组成的褶曲轴部位置。呈近东西走向,长约 1.5 km,宽 200 m。倾向南,倾角 $55^\circ \sim 71^\circ$ 。蚀变带内发育斜长角闪岩脉、角砾岩。斜长角闪岩脉呈群脉状侵位于咱里组二段黑云母斜长片麻岩、黑云母斜长混合岩中,产状与蚀变带一致,长 150~375 m,宽 1~50 m;角砾岩呈带状分布于蚀变带中部(图 2),角砾成分为斜长角闪岩,角砾棱角明显,可拼合,并被细晶花岗岩胶结,角砾岩出露宽度与蚀变带一致,角砾直径一般 10~50 cm,大者大于 1 m。主要蚀变矿物为钾长石、钠长石、黝帘石、绿帘石、绿泥石等。

F₃:发育于斜交褶曲翼部位置。总体走向 60° ,



长大于 8 km,宽 100~250 m。倾向南东,倾角 70°~80°。蚀变带内发育细晶花岗岩脉。细晶花岗岩脉呈近北东向侵位于咱里组三段斜长角闪岩、混合岩化斜长角闪岩、斜长角闪片麻岩中,产状与蚀变带一致,长 300~500 m,宽 10~150 m。主要蚀变矿物为钾长石、绿泥石等。



图 3 大田铀矿床斜长角闪岩(脉)、细晶花岗岩脉与围岩接触关系照片: (a) 斜长角闪岩照片; (b) 斜长角闪岩显微镜下照片; (c) 斜长角闪岩脉、细晶花岗岩脉与围岩接触关系照片; (d) 斜长角闪岩脉镜下照片; (e) 角砾岩照片
Fig. 3 Photos of amphibolite (vein) and fine-grained granite vein contact with wallrocks in the Datian uranium deposit, Panzhihua area: (a) Photo of amphibolite; (b) microscopical photo of amphibolite; (c) photo of contact relationship between amphibolite vein, fine-grained granite vein with surrounding rock; (d) microscopical photo of amphibolite vein; (e) Photo of breccia

Gn—片麻岩; Am—斜长角闪岩; $\psi\psi o$ —斜长角闪岩脉; γ —细晶花岗岩脉; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Bi—黑云母; Ur—晶质铀矿
Gn—gneiss; Am—amphibolite; $\psi\psi o$ —amphibolite vein; γ —fine-grained granite vein; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende;
Bi—biotite; Ur—uraninite

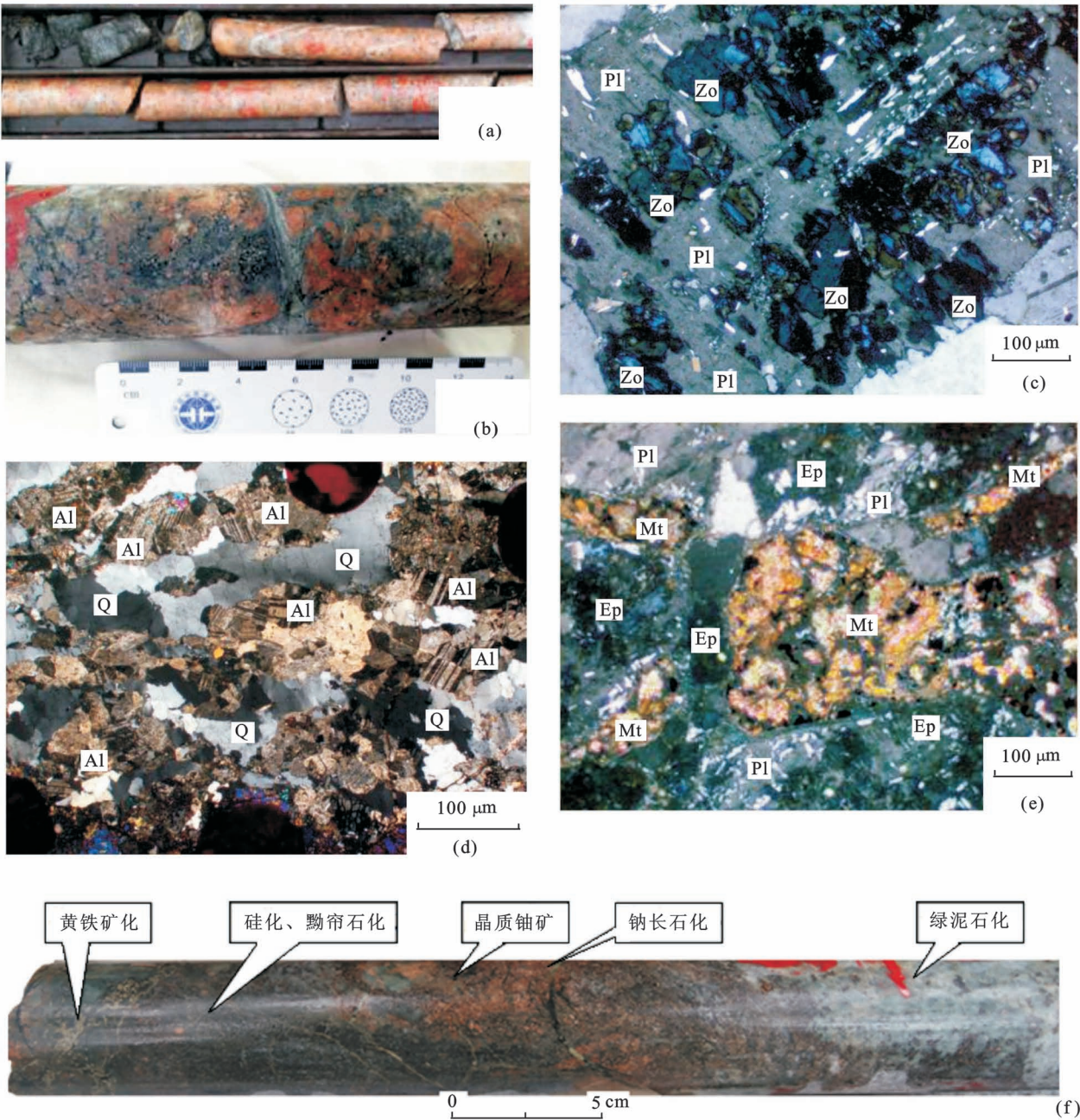


图 4 攀枝花大田铀矿床蚀变岩石、矿物特征示意图：(a) 钾长石化岩芯(亮红色)；(b) 钠长石化岩芯(暗红色)；
(c) 黦帘石交代斜长石；(d) 新生钠长石被晚期石英再次交代；(e) 绿帘石交代斜长石；(f) 蚀变矿物组合岩芯

Fig. 4 Sketch map showing altered rock and mineral characteristics of the Datian uranium deposit, Panzhihua area: (a) K-feldspar core (bright red); (b) albitization core (dark red); (c) zoisite metasomatic plagioclase; (d) late quartz metasomatic new albite again; (e) epidote metasomatic plagioclase; (f) altered mineral combination core

Q—石英; Pl—斜长石; Al—钠长石; Zo—黦帘石; Ep—绿帘石; Mt—金属矿物集合体(晶质铀矿、钛铁矿、黄铁矿)
Q—auartz; Pl—plagioclase; Al—albite; Zo—zoisite; Ep—epidote; Me—metal mineral aggregate (uraninite, ilmenite, pyrite)

F₄:发育于咱里组二段组成的褶曲轴部位置。呈近东西走向,长约 2.5 km,宽 50~200 m。倾向南,倾角 55°~80°。蚀变带内发育斜长角闪岩脉、混合岩化长英质脉体。斜长角闪岩脉呈群脉状侵位于咱里组一段眼球状片麻岩、眼球状混合岩及咱里组二段黑云母斜长片麻岩、黑云母斜长混合岩中,产状

与蚀变带一致,长 250~675 m,宽 0.5~50 m;混合岩化长英质脉体与地层产状一致,长 10~20 m,宽 1~5 m。斜长角闪岩脉与混合岩化长英质脉体呈侵入接触,前者侵位于后者之中。主要蚀变矿物为钾长石、钠长石、黝帘石、绿帘石、绿泥石等。

3 铀矿床基本特征

3.1 铀矿带划分

通过槽探揭露,地表共圈定铀矿(化)体 15 个,分别位于 F_1 、 F_2 、 F_4 三条构造蚀变带内,由此可划分出 I、II、III 三条铀矿带。其中, I 号铀矿带内圈定矿体 7 个,矿化体 4 个,赋矿岩石为碎裂状斜长角闪岩、角砾状斜长角闪岩; II 号铀矿带内圈定矿体 1 个,赋矿岩石为角砾状斜长角闪岩; III 号铀矿带内圈定矿化体 3 个,赋矿岩石为碎裂状斜长角闪岩和混合岩化长英质脉体。

3.2 矿体地质特征

通过钻探查证,深部共圈定铀矿体 18 个。其中, I 号铀矿带内圈定矿体 17 个, II 号铀矿带内圈定矿体 1 个。矿体呈透镜状、脉状产出(图 5)。矿体走向近东西向,走向长 200~500 m;倾向南,倾角 $55^{\circ}\sim 67^{\circ}$,倾向延伸 100~200 m;平均水平厚度 0.73~1.14 m,平均品位 0.077%~0.321%。

3.3 矿石特征

结构构造:矿石结构主要为细粒斑杂状—粒状变晶结构、碎裂结构(图 6a、6b)、交代结构(图 4c、4d、4e)等;矿石构造主要为块状、角砾状构造(图 6c)。

物质成分:原生铀矿物以晶质铀矿为主(图 6a、6d),含少量钛铀矿、沥青铀矿;次生铀矿为硅钙铀矿、铜铀云母、钙铀云母。此外,在铀矿化富集地段均见黄铁矿和辉钼矿,前者呈团块状、细脉浸染状同晶质铀矿紧密共生(图 6e),后者在矿化地段呈星点状分布。脉石矿物以斜长石、钠长石、角闪石、石英为主,含少量透辉石、榍石、磷灰石等。

3.4 流体包裹体及同位素特征

交代成因形成的长英质矿物包裹体岩相学特征

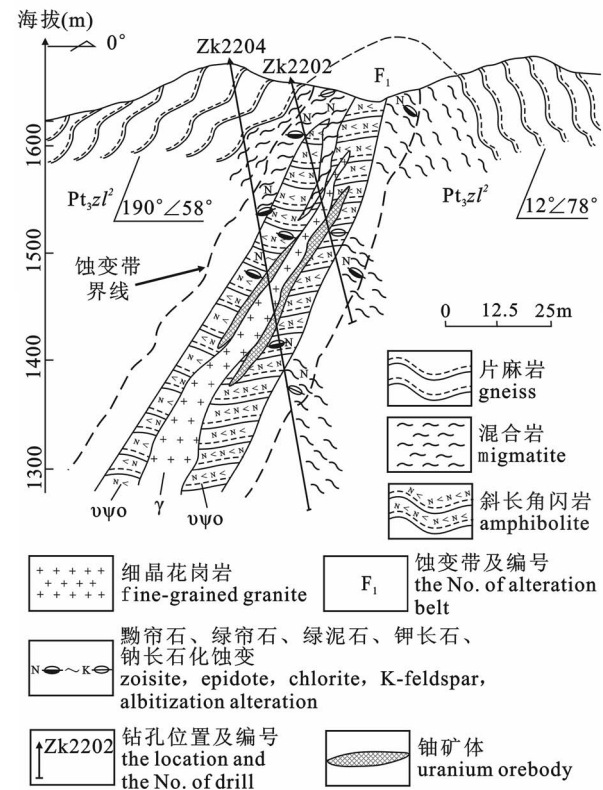


图 5 攀枝花大田铀矿床 I 号铀矿带 22 号勘探剖面示意图

Fig. 5 Sketch prospecting profile No. 22 in No. I uranium orebelt of the Datian uranium deposit, Panzhihua area

Pt_3zl^2 —咱里组二段; γ —细晶花岗岩脉;
 $\psi\phi o$ —斜长角闪岩脉
 Pt_3zl^2 —The 2nd Member of Zali Formation; γ —fine-grained granite vein; $\psi\phi o$ —amphibolite vein

显示(图 6f),包裹体主要有液相 H_2O+CO_2 (L 型)、气相 CO_2 (V 型)和子矿物相 $NaKCO_3$ (S 型)三种类型,三相包裹体相伴生,并以液相包裹体为主。气相包裹体成分有 CO_2 、 CH_4 、 H_2 、 H_2O 、 N_2 五种,构成 C—H—N 体系。从气体组合来看, CO_2 、 CH_4 、 H_2 成分相对较多,而 H_2O 相对较少,显示包裹体的气体成分可能来源于深部。

表 1 攀枝花大田铀矿床矿区构造蚀变特征一览表

Table 1 The tectonic alteration characteristics in mining area of the Datian uranium deposit, Panzhihua area

蚀变类型	蚀变矿物组合	对应铀矿物	对应金属矿物	发生构造部位	备注
气液交代蚀变: 钾交代	钾长石—绢云母—白云母	晶质铀矿—钛铀矿 沥青铀矿?	辉钼矿—黄铁矿 黄铜矿—黄铁矿	F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4	高温
气液交代蚀变: 钠交代	钠长石—黝帘石—绿帘石			F_1 、 F_2 、 F_4	高温
热液充填蚀变	绿泥石—碳酸盐—高岭土			F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4	中低温

与铀共生的黄铁矿硫同位素 $\delta^{34}\text{S}_{\text{V-CDT}}$ 值为 3‰~10‰,变化幅度窄,与岩浆源硫同位素值相近,显示热液可能来源于深部。

3.5 蚀变特征

前已述及,大田铀矿床矿区内存在四条构造蚀变带。根据蚀变类型和蚀变矿物组合,以及与铀矿化的关系,可将矿区内划分出高温气液交代蚀变和

中低温热液充填蚀变两种蚀变类型。其中,以高温气液交代蚀变为主,中低温热液充填蚀变为辅。构造蚀变带内蚀变矿物组合及对应的铀、金属矿物组合特征见表 1。

3.6 地球化学特征

3.6.1 主量元素特征

大田铀矿床赋矿岩石斜长角闪岩主量元素氧化

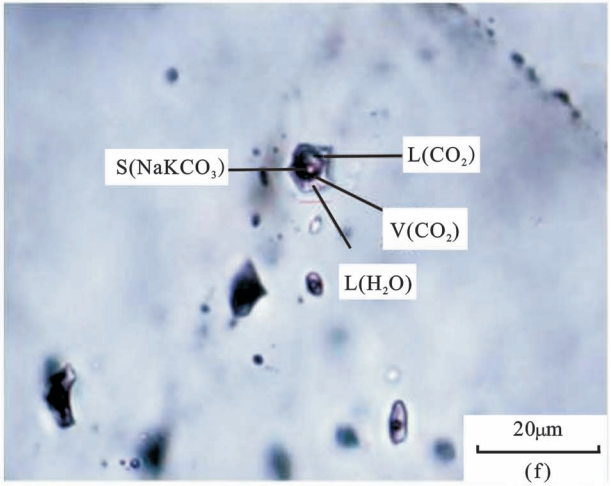
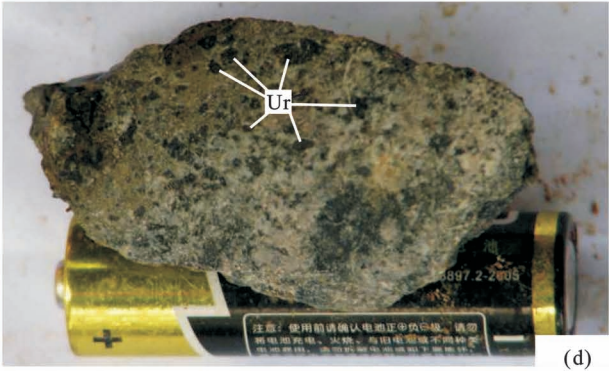
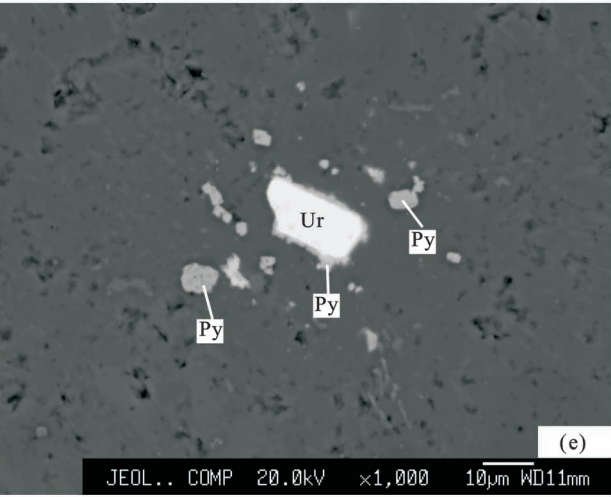
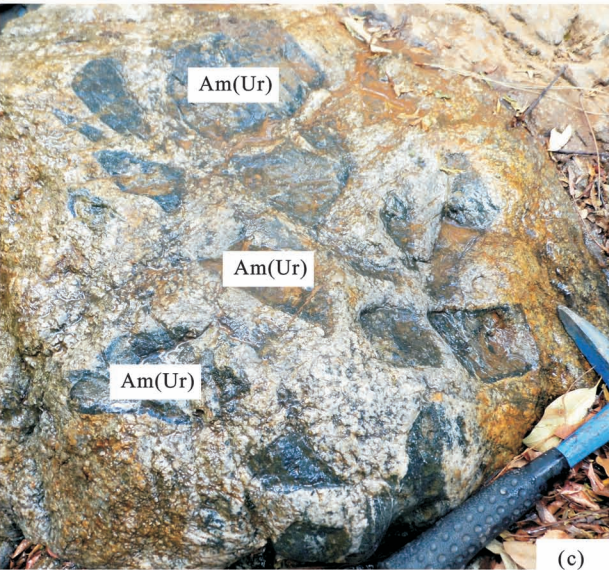
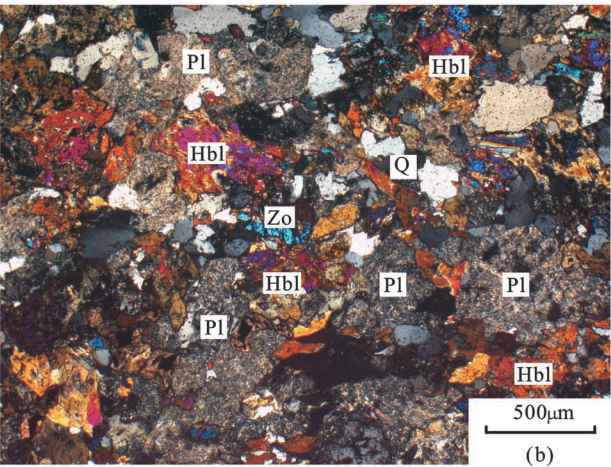
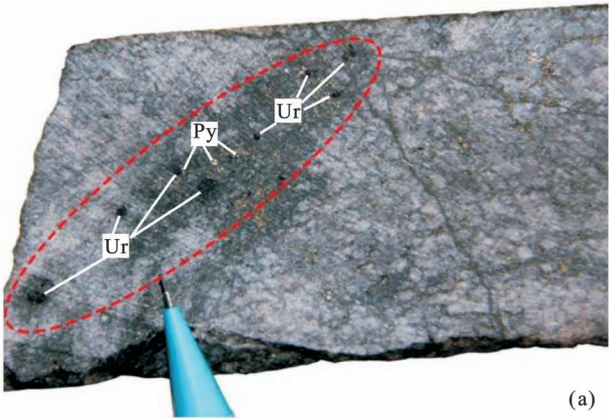


图 6 攀枝花大田铀矿床矿石结构构造及矿物成分示意图: (a) 钠长石化碎裂斜长角闪岩矿石; (b) 蚀变斜长角闪岩矿石镜下照片; (c) 角砾状铀矿石; (d) 强烈绿色蚀变碎裂斜长角闪岩矿石 (岩芯暴露在空气中很快氧化退色); (e) 电子探针照片 (晶质铀矿和黄铁矿共生); (f) 包裹体岩相照片

Fig. 6 Sketch map showing ore structure and mineral composition of the Datian uranium deposit, Panzhihua: (a) Albitization cataclasite amphibolite ore; (b) microscopical photo of altered amphibolites ore; (c) breccia uranium ore; (d) strongly green altered cataclasite amphibolite ore (the core is oxidized and discolored quickly when exposed to the air); (e) electronic probe photo (uraninite and pyrite coexist); (f) lithofacies photo of inclusions

Am—斜长角闪岩; Pl—斜长石; Hbl—角闪石; Zo—黝帘石; Q—石英; Ur—晶质铀矿; Py—黄铁矿; L—液相; V—气相; S—子矿物相
Am—amphibolite; Pl—plagioclase; Hbl—hornblende; Zo—zoisite; Q—quartz; Ur—uraninite; Py—pyrite;
L—liquid phase; V—vapor phase; S—subfacies

物含量列于表 2。

非含矿斜长角闪岩 SiO₂ 含量在 46.06% ~ 53.98% 之间, 均值为 51.22%, 富 Al₂O₃ (均值 12.75%)、CaO (均值 9.97%)、MgO (均值 4.84%)、FeO (均值 9.15%), 贫碱, (Na₂O + K₂O) 含量均值为 2.03%, 与基性岩类辉长岩主量元素含量特征一致。

矿石斜长角闪岩 SiO₂ 含量明显增加, SiO₂ 含量在 54.50% ~ 57.14% 之间, 均值为 55.66%; Na₂O (均值 3.59%) > K₂O (均值 0.92%), 其中, Na₂O 含量变化在 2.31% ~ 4.75% 之间, 最高达 5.68%。暗示赋矿岩石在成矿过程中有富硅质流体的注入, 并发生了较强烈的钠交代作用。

3.6.2 稀土元素特征

大田铀矿床斜长角闪岩稀土元素含量及地球化学参数列于表 2。

非含矿斜长角闪岩 Σ REE 为 $121.1 \times 10^{-6} \sim 155.1 \times 10^{-6}$, 均值为 132.9×10^{-6} ; LREE/HREE 为 11.80~28.54, 均值为 20.38; (La/Yb)_N 为 18.17~53.92, 均值为 36.57, 表明岩石均不同程度地富集轻稀土, 轻重稀土分异较强。δEu 为 0.75~1.84, 均值为 1.27; δCe 为 1.04~1.16, 均值为 1.07, 没有或具有弱的铈和铕异常。在球粒陨石标准化配分模式图上 (图 7a), 显示出轻稀土元素强富集型的右倾型配分模式, 与大陆板内拉斑玄武岩类似 (李玉琼等, 2017; 冯娟萍等, 2020), 暗示大田铀矿床赋矿岩石斜长角闪岩的原岩形成于拉张构造环境。

矿石斜长角闪岩 Σ REE 为 $190.2 \times 10^{-6} \sim 286.8 \times 10^{-6}$, 均值为 249.8×10^{-6} ; LREE/HREE 为 2.81~4.62, 均值为 3.48; (La/Yb)_N 为 1.95~3.93, 均值为 2.97, 表明矿石轻重稀土均发生了强烈地富集, 且轻重稀土分异变弱。δEu 为 0.17~0.46, 均值为 0.31; δCe 为 0.99~1.07, 均值为 1.03, 铕呈强烈负异常。稀土元素球粒陨石标准化配分模式图上 (图

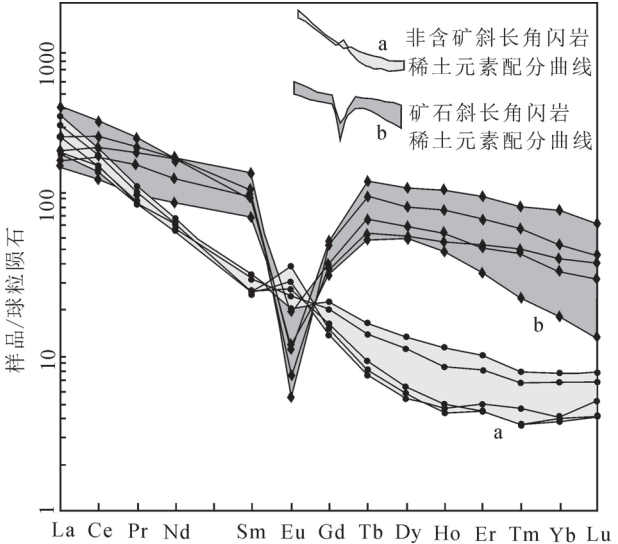


图 7 攀枝花大田铀矿床斜长角闪岩稀土元素球粒陨石标准化配分图 (球粒陨石标准值来自于 Boynton, 1984)
Fig. 7 The chondrite-normalized REE patterns diagram of amphibolites of the Datian uranium deposit, Panzhihua area (The chondrite standard comes from Boynton, 1984)

7b), 表现为稀土总量较高、轻重稀土平坦、铕强烈亏损的“V”型配分模式, 显示赋矿岩石在成矿过程中, 成矿流体带来了大量稀土元素; 而铕强烈亏损, 应与钠交代作用有关 (王奖臻等, 1998)。

3.7 成矿年龄

姚建等 (2015, 2017)、徐争启等 (2017) 对晶质铀矿进行了 U-Pb 同位素年龄测定, 成矿年龄在 775.2~777.6 Ma 之间。

4 铀矿床成因

4.1 控矿因素

大田铀矿床的主要控矿因素为构造蚀变带、钠交代作用、斜长角闪岩脉等。已探明铀矿 (化) 体定

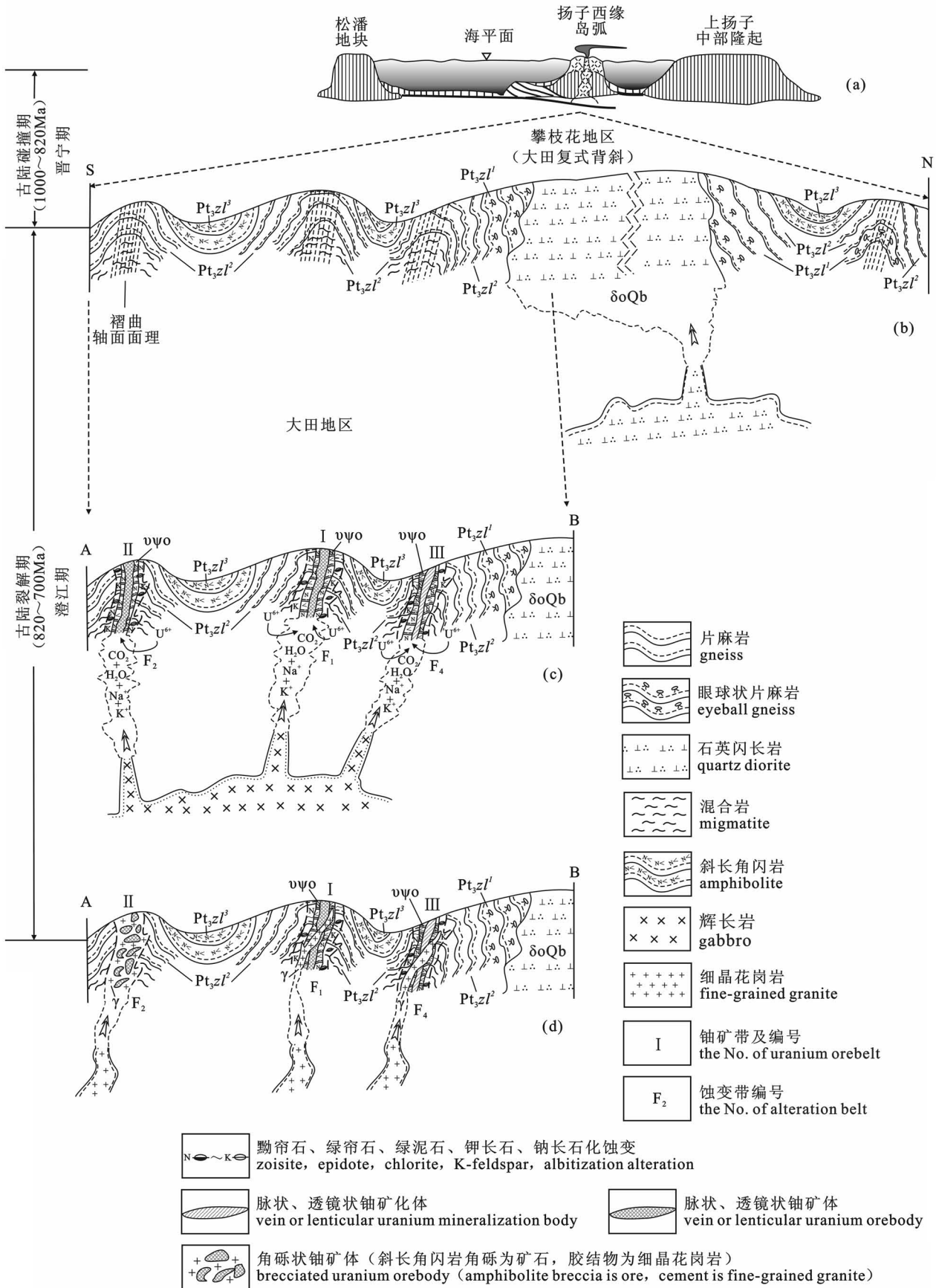


图 8 攀枝花地区区域地质构造演化与铀成矿的关系示意图

Fig. 8 Sketch map showing the relationship between regional tectonic evolution and uranium mineralization in Panzhihua area

Pt₃zl³—咱里组三段;Pt₃zl²—咱里组二段;Pt₃zl¹—咱里组一段;δoQb—新元古代青白口纪石英闪长岩;
γ—细晶花岗岩脉;υψo—斜长角闪岩脉
Pt₃zl³—The 3rd Member of Zali Formation;Pt₃zl²—The 2nd Member of Zali Formation;Pt₃zl¹—The 1st Member of Zali Formation;
δoQb—quartz diorite of Qingbaikou Period, Neoproterozoic;γ—fine-grained granite vein;υψo—amphibolite vein

表 2 攀枝花大田铀矿床斜长角闪岩主量元素(%)、稀土元素(×10⁻⁶)及地球化学参数一览表
Table 2 Schedule showing major elements(%), rare earth elements(×10⁻⁶) and
geochemical parameters of amphibolite in the Datian uranium deposit, Panzhihua area

样品编号	Pt-1	Pt-2	Pt-3	Pt-4	Pt-5	Y-1	Y-2	Y-3	Y-4	Y-5
岩性	斜长角闪岩(矿石)					斜长角闪岩(非含矿岩石)				
SiO ₂	54.61	54.50	57.14	55.40	56.64	46.06	52.51	53.98	49.94	53.60
Fe ₂ O ₃	9.06	1.40	0.03	2.38	0.48	9.21	0.54	1.82	0.70	0.96
FeO	5.52	9.56	8.35	5.59	7.86	12.13	7.90	6.84	9.92	8.96
Al ₂ O ₃	12.50	10.00	7.55	17.4	9.11	5.04	11.30	16.10	15.50	15.80
CaO	3.63	8.94	14.00	2.29	10.70	13.00	14.07	6.92	8.99	6.89
MgO	1.55	4.42	2.75	3.52	5.31	4.39	5.33	4.04	5.81	4.61
TiO ₂	1.19	0.40	0.29	0.98	0.22	0.24	0.98	1.46	1.34	1.11
P ₂ O ₅	0.18	0.66	0.58	0.10	1.11	0.11	0.18	0.33	0.37	0.32
MnO	0.13	0.13	0.17	0.12	0.19	0.29	0.19	0.11	0.21	0.23
Na ₂ O	4.75	2.83	2.31	5.68	2.40	0.30	0.55	0.72	1.10	0.83
K ₂ O	0.68	0.89	0.64	1.78	0.60	0.49	0.66	1.68	2.04	1.79
烧失量	3.95	3.03	1.08	3.87	2.52	6.68	2.43	4.11	2.73	2.66
La	27.10	35.00	45.60	30.90	28.40	26.60	27.60	38.60	43.60	33.40
Ce	61.30	91.80	104.00	82.60	74.70	54.50	58.20	67.00	73.10	57.10
Pr	8.28	12.60	13.70	12.20	10.80	5.64	5.46	6.43	6.86	5.45
Nd	38.30	57.30	54.60	56.10	47.20	20.60	18.90	20.50	22.10	18.60
Sm	10.90	13.60	12.80	16.40	13.10	3.46	3.28	2.76	2.69	2.80
Eu	1.28	1.28	1.74	0.82	0.98	0.83	1.00	1.19	1.48	1.09
Gd	8.99	12.00	9.90	12.00	9.40	3.30	2.96	2.10	2.24	2.41
Tb	2.21	3.68	2.34	3.26	2.64	0.45	0.39	0.23	0.24	0.27
Dy	15.20	23.40	15.00	20.00	16.60	2.55	2.20	1.14	1.19	1.31
Ho	2.98	5.20	3.26	4.28	3.54	0.49	0.38	0.22	0.21	0.23
Er	7.22	14.30	8.96	11.60	9.29	1.30	1.08	0.68	0.62	0.62
Tm	0.88	2.00	1.36	1.64	1.32	0.16	0.14	0.10	0.08	0.08
Yb	4.99	12.90	8.32	9.44	7.50	1.05	0.94	0.59	0.58	0.56
Lu	0.61	1.70	1.20	1.28	1.04	0.16	0.14	0.11	0.09	0.09
Y	65.40	128.00	82.80	101.00	78.20	13.00	10.30	5.96	6.16	6.89
ΣREE	190.24	286.76	282.78	262.52	226.51	121.09	122.67	141.65	155.08	124.01
LREE	147.16	211.58	232.44	199.02	175.18	111.63	114.44	136.48	149.83	118.44
HREE	43.08	75.18	50.34	63.50	51.33	9.46	8.23	5.17	5.25	5.57
LREE/HREE	3.42	2.81	4.62	3.13	3.41	11.80	13.91	26.40	28.54	21.26
(La/Yb) _N	3.90	1.95	3.93	2.35	2.72	18.17	21.06	46.93	53.92	42.78
δEu	0.38	0.30	0.46	0.17	0.26	0.75	0.98	1.51	1.84	1.28
δCe	0.99	1.07	1.01	1.04	1.05	1.09	1.16	1.04	1.04	1.04

条构造蚀变带内的钠交代作用。与沉积碎屑岩类形成的围岩相比,在构造应力作用下,发育于构造蚀变带内的斜长角闪岩脉,岩石更易破碎,为热液运移和铀的沉淀提供了有利的空间。

4.2 铀矿床成因探讨

4.2.1 古陆碰撞形成有利的铀成矿地质背景(1000 ~ 820 Ma)

新元古代青白口纪晋宁期,在全球Rodinia大陆汇聚的构造环境中,扬子陆块周缘表现为沟—弧—盆空间配置(张克信等,2018;陈建书等,2020)。扬子陆块西缘康滇古陆处于弧后盆地和岛弧环境(图8a),由西至东分别发育盐边群、康定群、会理群。晋宁运动末期(约820 Ma左右),洋壳消减殆尽,弧—陆碰撞形成统一的扬子古大陆。

位于F₁、F₂、F₄三条构造蚀变带内。F₃构造蚀变带内尚未发现铀矿(化)体存在,主要原因是交代作用类型不同。构造蚀变带内普遍发育了钾交代作用,而与铀成矿关系最为密切的是发育于F₁、F₂、F₄三

攀枝花地区褶皱隆起,发育了大田复式背斜,并伴有大规模中酸性岩浆侵位(大田石英闪长岩、黑么花岗岩)。康定群发生了区域变质和强烈的混合岩化

作用(图 8b)。特别是在混合岩化作用过程中,铀元素从基体向脉体发生迁移,并在长英质脉体中初步富集,从而形成了区内有利的铀成矿地质背景。

4.2.2 古陆裂解拉张背景下构造热液作用形成大田铀矿床(820~700 Ma)

青白口纪澄江期,在全球古陆裂解拉张背景下,康滇古陆发育以苏雄组火山喷发为代表的裂谷盆地。攀枝花地区,沿直立—斜歪褶曲轴面侵入大规模辉长岩脉(770~780 Ma)——后变质为斜长角闪岩。岩浆期后,富含钾、钠和挥发份的高温气液流体在上涌过程中(图 6f),一方面,萃取了围岩中的铀,形成含铀流体;另一方面,在地下封闭构造环境下,发生减压沸腾(液爆),使辉长岩脉碎裂形成碎裂岩,含铀流体与碎裂岩发生交代作用形成铀矿体(775.2~777.6 Ma),并形成相应的蚀变矿物组合(图 4f,图 8c)。在铀成矿过程中,主量及稀土元素亦发生相应的迁移富集。而后期细晶花岗岩脉侵位(760~770 Ma),对已形成的铀矿体起破坏作用,形成角砾状铀矿石(图 8d)。

至于为什么大田铀矿床矿区内,只有侵位于构造蚀变带内辉长岩脉变质而成的斜长角闪岩成矿,而地层中由玄武岩变质而成的斜长角闪岩不成矿的问题。笔者等认为,斜长角闪岩本身铀含量较低,不含矿,而只是作为一种赋矿岩石而已。而后期构造改造(液爆使斜长角闪岩碎裂)、热液蚀变(钠交代)才是铀成矿的关键因素。地层中由玄武岩变质而成的斜长角闪岩未遭受后期构造改造(图 3a、3b),岩石致密完整,不利于热液流动,未发生热液蚀变(钠交代),因而未成矿。

5 结论

(1)在新元古代青白口纪晋宁—澄江期(1000~700 Ma 之间),康滇古陆中南段地质构造演化发生了由古陆碰撞—裂解的重大转折(约 820 Ma 左右),这一地质作用过程与全球 Rodinia 大陆汇聚—裂解相耦合。大田铀矿床的成矿年龄(775.2~777.6 Ma)同古陆裂解时限大致相吻合。因此,大田铀矿床的形成是 Rodinia 大陆裂解拉张背景下构造热液作用的产物。

(2)已探明铀矿(化)体定位于 F₁、F₂、F₄ 三条构造蚀变带内。构造蚀变带内普遍发育了钾交代作用,而钠交代作用与铀成矿关系最为密切。赋矿岩石为斜长角闪岩,其原岩为侵位于构造蚀变带内的辉长岩脉。

(3)就铀矿找矿工作而言。一方面,在矿床普查过程中,Ⅲ号铀矿带内仅施工钻孔 2 个,控制精度不够;Ⅰ、Ⅱ号铀矿带内矿体向西未封边,矿床西部尚有发展空间。因此,下一步可在矿区外围开展铀矿普查工作,力争发现深部铀矿体。另一方面,大田复式背斜北翼中坝地区存在与大田铀矿床相似的成矿地质环境。前人在区内开展过小比例尺伽玛能谱面积测量工作,发现了一批铀异常点(带)。建议在区内开展 1:50000~1:10000 铀资源潜力评价工作,圈定找矿靶区。

致谢:研究过程中,得到成都理工大学钟康惠教授的悉心指导;核工业北京地质研究院分析测试研究所为本研究提供了大量分析测试数据,在此一并表示谢意。

参 考 文 献 / References

(The literature whose publishing year followed by a “&” is in Chinese with English abstract; The literature whose publishing year followed by a “#” is in Chinese without English abstract)

常丹,陈友良,袁为,廖敏,刘凯鹏,张静思. 2015. 四川米易海塔地区混合岩型铀矿微量元素地球化学特征. 矿物学报, 35(增刊 1): 272~273.

康建书,代雅然,唐烽,彭成龙,张嘉玮,朱和书,陈兴,王文明,龚桂源. 2020. 扬子地块周缘中元古代末—新元古代主要构造运动梳理与探讨. 地质论评, 66(3): 533~554.

柏勇,徐争启,秦琪瑞,张成江,陈友良. 2019. 攀枝花大田地区辉绿岩脉/花岗质岩脉年代学特征及其地质意义. 铀矿地质, 35(2): 80~87+128.

杜利林,耿元生,杨崇辉,王新社,周喜文,任留东,王彦斌,杨铸生. 2007. 扬子地台西缘康定群的再认识:来自地球化学和年代学证据. 地质学报, 81(11): 1562~1577.

郭锐,陈友良,刘凯鹏,郑玉文,胡漾. 2019. 四川米易海塔地区混合岩型铀矿流体包裹体特征. 矿物学报, 40(2): 137~148.

李玉琼,杜雪亮,马蓁,王金荣. 2017. 全球大陆裂谷玄武岩数据挖掘的初步结果. 矿物岩石地球化学通报, 36(6): 912~919.

刘云鹤,陈友良,常丹,李巨初,李文贤,周君. 2016. 米易海塔地区混合岩型铀矿微量元素特征. 四川地质学报, 36(1): 38~41.

冯娟萍,欧阳征健,马海勇,范萌萌,马静. 2020. 华北克拉通东南缘中条山陶家窑基性岩墙群 U-Pb 定年、地球化学特征及其构造环境. 地质学报, 94(2): 573~586.

莫帮洪,赵剑波,刘秀林,齐清林,解波. 2013. 康滇地轴中段横山岩体的铀矿化类型与找矿方向. 地质与勘探, 49(6): 1070~1077.

欧阳鑫东. 2017. 四川攀枝花大田 505 铀矿地球化学特征及成因探讨. 导师:徐争启. 成都:成都理工大学硕士学位论文: 1~84.

彭渤海,陈友良,刘堃,张龙,梁家山. 2017. 攀枝花大田 505 铀矿区混合岩主量元素特征及其意义. 四川冶金, 39(6): 32~38.

王凤岗,孙悦,姚建,叶锦林. 2017. 四川省米易县海塔地区石英脉中巨粒晶质铀矿特征研究. 世界核地质科学, 34(4): 187~193+216.

王奖臻,陆彦,肖渊甫,温春齐. 1998. 会理小青山铜(金)矿区钠长石岩的地质地球化学特征及交代作用机制. 四川地质学报, 18(3): 196~205.

汪来,张伟,刘珊珊,武永强,焦智伟. 2016. 综合物探法在攀枝花大田

地区铀矿勘查中的应用. 现代矿业, 570(10):108~111.

武勇, 秦明宽, 郭冬发, 蔡煜琦, 王凤岗, 吴玉, 郭国林, 刘章月. 2020. 康滇地轴中南段牟定 1101 铀矿区沥青铀矿成矿时代及成因. 地球科学, 45(2):419~433.

徐争启, 陈欢, 宋昊, 李涛, 田建民. 2019. 云南牟定戌街地区铀矿化特征及成因探讨. 物探化探计算技术, 41(2):241~249.

徐争启, 欧阳鑫东, 张成江, 姚建, 汤曼. 2017. 电子探针化学测年在攀枝花大田品质铀矿中的应用及其意义. 岩矿测试, 36(6):641~648.

徐争启, 张成江, 欧阳鑫东, 姚建, 孙康, 尹明辉. 2017. 攀枝花大田铀矿床年代学特征及其意义. 铀矿地质, 33(5):280~287.

徐争启, 张成江, 陈友良, 李巨初, 汪刚, 欧阳鑫东. 2015. 攀枝花大田含铀滚石特征及其意义. 矿物学报, 35(增刊 1):356.

姚建, 周君. 2014. 五马箐组变质杂岩岩石化学特征及地质意义. 四川地质学报, 34(2):179~181+186.

姚建, 李巨初, 周君, 陈志国, 姚海平. 2017. 四川攀枝花大田地区混合岩 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 测年及其地质意义. 地质通报, 36(2~3):381~391.

姚建, 李巨初, 孙泽轩, 周君, 赵剑波, 陈志国. 2015. 四川攀枝花大田地区混合岩锆石 LA-ICP-MS 年龄及岩石地球化学特征. 地质论评, 61(增刊):414~415.

姚建. 2014. 攀枝花市大田地区混合岩成因研究. 导师:张成江. 成都:成都理工大学硕士学位论文:1~75.

张成江, 陈友良, 李巨初, 徐争启, 姚健. 2015. 康滇地轴巨粒品质铀矿的发现及其地质意义. 地质通报, 34(11):2219~2226.

张克信, 徐亚东, 何卫红, 于洋, 王丽君, 王嘉轩, 寇晓虎, 骆满生. 2018. 中国新元古代青白口纪早期(1000~820 Ma)洋陆分布. 地球科学, 43(11):3837~3852.

张航, 柏勇, 徐争启, 姚建, 秦琪瑞. 2018. 攀枝花大田地区辉绿岩脉岩石地球化学特征及其地质意义. 矿物岩石, 38(4):30~38.

郑玉文, 陈友良, 彭渤海, 胡漾, 郭锐, 邓舟. 2019. 攀枝花大田地区前震旦纪斜长角闪岩地球化学特征及构造意义[J/OL]. 地球科学:1~27; [2020-07-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20191207.1004.004.html>

Chang Dan, Chen Youliang, Yuan Wei, Liao Min, Liu Kaipeng, Zhang Jingsi. 2015#. Trace element geochemical characteristics of migmatite type uranium deposits in Haita area, Miyi county, sichuan province. Acta Mineralogica Sinica, 35 (S1):272~273.

Chen Jianshu, Dai Yaran, Tang Feng, Peng Chenglong, Zhang Jiawei, Zhu Heshu, Chen Xing, Wang Wenming, Gong Guiyuan. 2020#. Discussion on the Mesoproterozoic and Neoproterozoic major tectonic events in marginal area of the Yangtze Block. Geological Review, 66 (3):533~554.

Bai Yong, Xu Zhengqi, Qin Qirui, Zhang Chengjiang, Chen Youliang. 2019#. Chronological characteristics and geological significance of diabase vein / granitic vein in Datian area, Panzhihua. Uranium Geology, 35 (2):80~87+128.

Boynton W V. 1984. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. In: Henderson P. ed. Rare Earth Element Geochemistry. Amsterdam: Elsevier, 63~114.

Du Lilin, Geng Yuansheng, Yang Chonghui, Wang Xinshe, Zhou Xiwen, Ren Liudong, Wang Yanbin, Yang Zhusheng. 2007#. New understanding on Kangding group on the western margin of Yangtze block: evidence from geochemistry and chronology. Acta geologica Sinica, 81 (11):1562~1577.

Guo Rui, Chen Youliang, Liu KaiPeng, Zheng Yuwen, Hu Yang. 2019#. Characteristics of fluid inclusions in migmatite type uranium deposits in Haita area, Miyi county, Sichuan Province. Acta Mineralogica Sinica, 40(02):137~148.

Li Yuqiong, Du Xueliang, Ma Zhen, Wang Jinrong. 2017#. Preliminary results of data mining of global continental rift. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 36 (6):912~919.

Liu Yunhe, Chen Youliang, Chang Dan, Li Juchu, Li Wenxian, Zhou Jun. 2016#. Trace element geochemistry of chorismite type uranium ore in Haita area, Miyi county, Sichuan Province. Acta Geologica Sichua, 36 (1):38~41.

Feng Juanping, Ouyang Zhengjian, Ma Haiyong, Fan Mengmeng, Ma Jing. 2020#. U-Pb chronology geochemical characteristics and significance of the Taojiayao basic dike swarms in the Zhongtiao mountain, southeast margin of North China Craton. Acta Geologica Sinica, 94 (2):573~586.

Mo Banghong, Zhao Jianbo, Liu Xiulin, Qi Qinglin, Jie Bo. 2013#. The uranium mineralization type and prospecting direction of the Hengshan intrusive body in Miyi county, Sichan province. Geology and Exploration, 49 (6):1070~1077.

Ouyang Xindong. 2017#. Geochemical characteristics and meanings of migmatite rocks in Datian area, Panzhihua, Sichuan province. Instructor: Xu Zhengqi . Chengdu: Master 's thesis, Chengdu University of technology:1~84.

Peng Boyang, Chen Youliang, Liu Kun, Zhang long, Liang Jianshan. 2017#. Characteristics and significance of major elements of migmatites in uranium mining area No. 505, in Datian area, Panzhihua. Sichuan Metallurgy, 39 (6):32~38.

Wang Fenggang, Sun Yue, Yao Jian, ye Jinlin. 2017#. Study on characteristics of gaint grain uraninite in Haita area of Miyi County, Sichuan. World Nuclear Geosciences, 34 (4):187~193 + 216.

Wang Yingzhen, Lu Yan, Xiao Yuanfu, Wen Chunqi. 1998#. Geological and geochemisty of metasomatic albite in the Xiaoqingshan copper (gold) deposit, Huili. Acta Geologica Sichua, 18 (3):196~205.

Wang Lai, Zhang Wei, Liu Shanshan, Wu Yongqiang, Jiao Zhiwei. 2016#. Application of comprehensive geophysical methods in uranium exploration in Datian area, Panzhihua. Modern mining, 570 (10):108~111.

Wu Yong, Qin Mingkuan, Guo Dongfa, Cai Yuqi, Wang Fenggang, Wu Yu, Guo Guolin, Liu Zhangyue. 2020#. Metallogenic chronology of the pitchblende of 1101 uranium ore area in Mouding, middle—south part of the Kangdian axis and its geological significance (first in the network). Earth Science, 45(2):419~433.

Xu Zhengqi, Chen Huan, song Hao, Li Tao, Tian Jianmin. 2019#. Uranium mineralization characteristics and genesis in Xujie area, mouding, Yunnan Province. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 41 (2):241~249.

Xu Zhengqi, Ouyang Xindong, Zhang Chengjiang, Yao Jian, Tang man. 2017#. Application of electron microprobe chemical dating to Datian uraninite in Panzhihua and its significance. Rock and Mineral Analysis, 36 (6):641~648.

Xu Zhengqi, Zhang Chengjiang, Ouyang Xindong, Yao Jian, Sun Kang, Yin Minghui. 2017#. Chronological characteristics and significance of Datian uranium deposit, in Panzhihua area. Uranium Geology, 33 (5):280~287.

Xu Zhengqi, Zhang Chengjiang, Chen Youliang, Li Juchu, Wang Gang, Ouyang Xindong. 2015#. Characteristics and significance of uranium bearing rolling stones in Datian area, Panzhihua. Acta Mineralogica Sinica, 35 (S1):356.

Yao Jian, Zhou jun. 2014#. Petrogeochemistry and its geological significance of metamorphic complex of the Wumaqing formation. Acta Geologica Sichua, 34 (2):179~181+186.

Yao Jian, Li juchu, Zhou Jun, Chen Zhiguo, Yao Haiping. 2017#.

- LA-ICP-MS zircon U-Pb dating of migmatite in Datian, Panzhihua city and its geological significance, *Geological Bulletin of China*, 36 (2~3):381~391.
- Yao Jian, Li Juchu, Sun Zexuan, Zhou Jun, Zhao Jianbo, Chen Zhiguo. 2015#. Zircon LA-ICP-MS ages and geochemical characteristics of migmatites in Datian area, Panzhihua, Sichuan. province. *Geological Review*, 61 (s):414~415.
- Yao Jian. 2014#. Study on the genesis of migmatite in Datian area, Panzhihua City. Instructor: Zhang Chengjiang. Chengdu: Master's thesis, Chengdu University of technology:1~75.
- Zhang Chengjiang, Chen Youliang, Li Juchu, Xu Zhengqi, Yao Jian. 2015#. The discovery of coarse-grained uraninite in Kangdian Axis and its geological significance. *Geological Bulletin of China*, 34 (11):2219~2226.
- Zhang Kexin, Xu Yadong, He Weihong, Yu Yang, Wang Lijun, Wang Jiaxuan, Kou Xiaohu, Luo Mansheng. 2018#. Oceanic and continental blocks distribution during neoproterozoic early Qingbaikou period (1000~820Ma) in China. *Earth Science*, 43 (11):3837~3852.
- Zhang Hang, Bai Yong, Xu Zhengqi, Yao Jian, Qin Qirui. 2018#. Geochemical characteristics and geological significance of diabase vein rocks in Datian area of Panzhihua. *Mineralogy and Petrology*, 38 (4):30~38.
- Zheng Yuwen, Chen Youliang, Peng Boyang, Hu Yang, Guo Rui, Deng Zhou. 2019#. Geochemical characteristics and tectonic significance of presinian amphibolite in Datian area of Panzhihua [J/OL]. *Earth Science*:1~27; [2020-07-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20191207.1004.004.html>

Basic characteristics and genesis of the Datian uranium deposit in Panzhihua area, Western Sichuan

SUN Zexuan¹⁾, CHEN Youliang²⁾, YAO Jian¹⁾, HAN Wenwen¹⁾, WANG Fenggang³⁾, ZHANG Liang¹⁾

1) *Research Institute No. 280, China National Nuclear Corporation, Guanghan, Sichuan, 618300;*

2) *Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059;*

3) *Beijing Research Institute of Uranium Geology, China National Nuclear Corporation, Beijing, 100029*

Objectives: The Datian uranium deposit is the first one prospected in Xikang—Yunnan oldland. This paper studied the basic characteristics and the genesis of Datian uranium deposit in Panzhihua area.

Methods: In the process of deposit prospection, 29712 m of drilling and 5000 m³ of trenching projects were accomplished. We applied field investigation, core catalogue, profile making, samples analysis and testing research methods.

Results: The uranium orebody and the uranium mineralized body are located in the tectonic alteration belts, and the shape of ore body is lenticular and vein. The primary uranium mineral is mainly uraninite, containing a small amount of brannerite and pitchblende. The ore bearing rock is amphibolites, and its original rock is gabbro vein intruded in the tectonic alteration belt. The characteristics of the major elements show that the content of the major elements of the ore bearing rocks is consistent with that of the gabbros of the basic rocks, and the characteristics of the rare earth elements show that the original rocks of the ore bearing rocks are formed in the tensile tectonic environment. Uranium mineralization is closely related to sodium metasomatism.

Conclusions: The Datian uranium deposit was formed in the process of tectonic—hydrothermal, and under the background of Rodinia continental splitting and extension.

Keywords: tectonic alteration belt; amphibolite vein; sodium metasomatism; uraninite; Datian uranium deposit; Panzhihua area

Acknowledgements: This study was financially supported by NSFC (No. 41472073) and Geological Bureau of China National Nuclear Corporation (No. 201638-1, 201807-1). We would like to express our thanks to professor Zhong Kanghui, Chengdu University of Technology, Institute of analysis and test, Beijing Research Institute of Uranium Geology, China National Nuclear Corporation and commissioning editor

First author: SUN Zexuan, male, born in 1966, Doctor, researcher, mainly engaged in sequence stratigraphy and petroliferous basin analysis, uranium metallogenic geological conditions analysis; Address: No. 180, section 2, east Chengdu road, Guanghan, Sichuan; Email: 270162313@qq.com

Manuscript received on: 2020-02-28; Accepted on: 2020-06-13; Edited by: ZHANG Yuxu

Doi: 10.16509/j.georeview.2020.04.015