

庐枞盆地科学深钻 ZK01 孔流体包裹体研究

熊欣¹⁾, 徐文艺¹⁾, 杨竹森¹⁾, 贾丽琼²⁾, 李骏^{1,2)}

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

2) 中国地质大学地球科学学院, 北京, 100083

内容提要: 砖桥科学深钻 ZK01 孔位于庐枞盆地中部, 孔内自上到下包括第四系砾石层(0~17 m)、砖桥组火山-沉积岩系(17~1488 m)、正长岩(1488~1848 m)和二长岩(1848~2011.95 m)四个岩性段。钻孔深部(1500~1900 m)的正长岩和二长岩内发育强烈的热液蚀变及铀钍矿化(铀钍矿、铀钍矿), 向上(300~1580 m)蚀变逐渐减弱并伴有磁铁矿、黄铁矿、黄铜矿化。详细研究表明, 流体活动包括五个阶段, 即 I 绿色电气石+钾长石+硬石膏阶段, II 粉红色电气石+硬石膏+铀钍矿化阶段, III 黑色电气石+硬石膏+磁铁矿化+铀钍矿化阶段, IV 硬石膏+黄铁矿+黄铜矿阶段, V 石膏+方解石+石英阶段。电气石、硬石膏和石英中流体包裹体可划分为富液相(L 型)、富气相(V 型)、含子晶(S 型)三种类型, 其中 S 型流体包裹体中子矿物主要为石盐和钾盐。第 I 阶段均一温度峰值为 540~560℃, 盐度峰值由高盐度和低盐度两部分组成, 分别为 65%~70% NaCl eq 和 0~5% NaCl eq; 第 II 阶段均一温度峰值为 320~340℃, 盐度峰值为 0%~5% NaCl eq; 第 III 阶段均一温度范围为 380~400℃, 盐度峰值为 0%~5% NaCl eq; 第 IV 阶段均一温度峰值为 240~260℃, 盐度峰值为 0~5% NaCl eq; 第 V 阶段均一温度范围为 160~180℃, 盐度峰值为 0%~5% NaCl eq。根据成矿阶段沸腾包裹体群估算的成矿深度约 0.73 km 左右, 显示庐枞盆地自铀钍矿化成矿以来剥蚀作用不强, 指示庐枞盆地存在较好的矿床保存条件。深部钻孔内成矿流体性质、温度范围与庐枞盆地内其他矿区类似, 为庐枞盆地成矿流体系统的一部分。庐枞盆地成矿流体系统成矿流体演化过程中发生过多次沸腾, 沸腾所引起的物理化学状态的改变可能是导致区域矿床矿质迁移与沉淀的主要因素之一。

关键词: 庐枞盆地; 流体包裹体; 深部钻孔; 铀钍矿化

庐枞矿集区位于长江中下游成带中段的安徽省境内, 为长江中下游断拗区的典型代表之一(常印佛等, 1991; 任启江等, 1991; 翟裕生等, 1992; 周涛发等, 2008)。庐枞矿集区内主要发育有两套成矿系统: ①与橄欖安粗岩系(135~127 Ma)有关的“玢岩铁矿型”成矿系统(周涛发等, 2008, 2010, 2011), 产生了以著名的“玢岩铁矿”组合为特征的火山-潜火山热液型和沉积改造型等铁矿床及硫铁矿、硬石膏和明矾石矿床(周涛发等, 2008, 2011; 张乐骏, 2011); ②与 A 型花岗岩(126~124 Ma)有关的氧化物-铜-金(铀)成矿系统(周涛发等, 2008; 范裕等, 2008)。

2012 年, 国家深部探测专项(Sino Probe)第三项目“深部矿产资源立体探测技术及实验研究”第六课题在庐枞盆地的砖桥地区完成了 ZK01 科学深

钻, 并首次发现钻孔深部(1500~2012 m)伴随强烈的热液蚀变发育铀钍矿化(局部达到边界品位), 为深入研究盆地深部流体系统的性质、演化及矿化特征提供了难得的研究对象。本文试图通过对岩芯内蚀变矿物中流体包裹体的系统研究, 查明钻孔内与铀钍矿化相关的流体性质及演化等特征, 以期为整体认识庐枞盆地深—浅部流体系统与成矿特征提供有益信息。

1 区域地质背景

长江中下游成矿带位于扬子板块东北缘, 北侧以襄樊-广济断裂和郟庐断裂与秦岭-大别造山带和华北板块相邻, 南侧以阳新-常州断裂与扬子板块的下扬子古陆相接(常印佛等, 1991; 翟裕生等, 1992), 带内自西向东包括鄂东南、九瑞、安庆-贵池、庐枞、

注: 本文为国家“深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe)”第三项目“深部矿产资源立体探测技术及实验研究”第六课题(编号 SinoProbe-03-06)资助的成果。

收稿日期: 2014-02-15; 改回日期: 2014-03-12; 责任编辑: 周健。

作者简介: 熊欣, 女, 1989 年生。硕士研究生, 矿床地球化学专业。Email: XiongXin_1989@163.com。

铜陵、宁芜和宁镇七个矿集区。庐枞矿集区位于长江中下游成矿带中段的安徽庐江县和枞阳县之间,受北西侧的郟庐深断裂和南东侧的长江构造带控制(周涛发等,2008;李朝长,2010),为一东浅西深继承

式的中生代陆相断陷盆地(任启江等,1991;周涛发等,2008,2011),被罗河、罗岭—黄屯、头坡 3 条Ⅱ级主干断裂围限(图 1)。

庐枞盆地基底由奥陶系白云岩、志留系砂岩、上

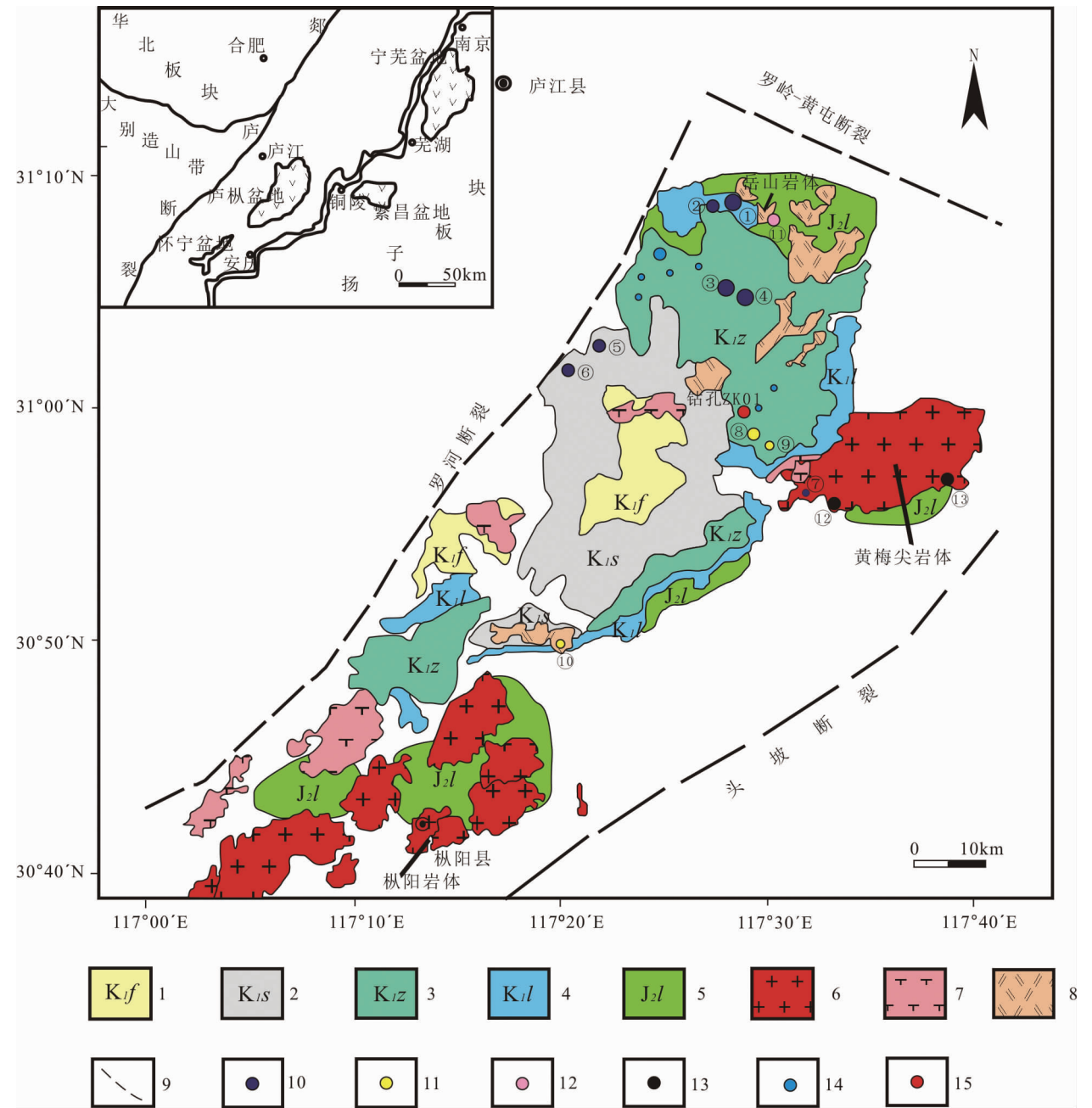


图 1 庐枞盆地地质与铀矿床略图(据周涛发等,2010 修改)

Fig. 1 Geology and U deposits in the Luzong basin (modified from Zhou et al. , 2010)

1—浮山组;2—双庙组;3—砖桥组;4—龙门院组;5—罗岭组;6—A 型花岗岩;7—正长岩;8—二长岩;9—断裂;10—铁矿床;①—龙桥铁矿, ②—盘石岭铁矿, ③—大岭铁矿, ④—小岭疏铁矿床, ⑤—泥河铁矿, ⑥—罗河铁矿, ⑦—马口铁矿;11—铜矿床;⑧—井边铜矿, ⑨—石门庵铜矿, ⑩—拔茅山铜矿;12—Pb、Zn 矿床(⑪—岳山铅锌矿);13—铀矿床(⑫—34 铀矿床, ⑬—3440 铀矿床);14—明矾石矿床;15—科学钻位置

1—Fushan Formation; 2—Shuangmiao Formation; 3—Zhuanqiao Formation; 4—Longmenyuan Formation; 5—Luoling Formation; 6—A-type granite; 7—syenite; 8—monzonite; 9— fault; 10—Fe deposits; ①—Longqiao iron deposit, ②—Panshiling iron deposit, ③—Daling iron deposit, ④—Xiaoling Longqiao iron deposit, ⑤—Nihe iron deposit, ⑥—Luohe iron deposit, ⑦—Makou iron deposit; 11—copper deposits; ⑧—Jingbian copper deposit, ⑨—Shimenan copper deposit, ⑩—Bamaoshan copper deposit; 12—Pb、Zn deposits (⑪—Yueshan Zn-Pb deposit); 13—U deposits(⑫—34 uranium deposit, ⑬—3440 uranium deposit); 14—alunitic deposits; 15—deep drilling

泥盆统砂岩、上石炭统灰岩、中—上二叠统灰岩、硅质岩和含煤砂页岩、下一中三叠统灰岩、页岩和砂岩等构成,属稳定浅海相和局限海盆沉积,呈整合或平行不整合接触。盆地下部首先接收下一中侏罗统磨山组和罗岭组陆相砂岩沉积,角度不整合覆于下伏地层之上。其后接收盆地上部的下白垩统以橄榄安粗岩系为特征的陆相火山-沉积岩系,自下向上包括龙门院、砖桥、双庙和浮山四个组(常印佛等,1991;任启江等,1991;翟裕生等,1992;周涛发等,2008,2011),角度不整合覆盖于下一中侏罗统和盆地基底之上,各组之间均为喷发不整合接触,年龄分别为 134.8 ± 1.8 Ma、 134.1 ± 1.6 Ma、 130.5 ± 0.8 Ma、 127.1 ± 1.2 Ma(周涛发等,2009),构成四个火山喷发旋回(任启江等,1991;袁峰等,2008;周涛发等,2009)。与强烈的火山喷发相伴,盆地内发育早晚两期侵入岩,早期侵入岩主要为二长岩和闪长岩类(时代为 $134 \sim 130$ Ma;周涛发等,2010),晚期侵入岩主要为正长岩类(时代为 $129 \sim 123$ Ma;周涛发等,2010)和A型花岗岩(时代为 $126 \sim 124$ Ma;邢凤鸣等,1994;曹毅等,2008;袁锋等,2008;文帅等,2009)。

庐枞盆地中生代强烈的构造-岩浆活动形成有丰富多样的铁、铜、金、铀等矿床(图1),盆地内矿床类型主要有:①潜火山热液脉型铅锌矿床(如岳山铅锌银矿床),主要分布于盆地西北缘,与龙门院火山-岩浆旋回有关;②火山沉积型铁矿床(如盘石岭铁矿床),主要分布在盆地北部,形成时代为 134 Ma左右,高硫型矿床(如矾山明矾石矿床),分布于盆地中东部,以及中温热液脉型铜金矿床(如井边石门庵、拔茅山铜金矿床),分布于盆地的中部,成矿时代为 $133 \sim 132$ Ma左右,与砖桥火山-岩浆旋回相关;③玢岩型铁矿床(如罗河、龙桥、泥河铁矿床和小岭硫铁矿床),主要分布在盆地西部和西北部边缘,成矿时代为 130 Ma左右,与双庙火山-岩浆旋回形成的闪长玢岩有关;④铁、金、铀矿床(如马口铁矿、3440和34号铀矿床),主要分布在盆地的南东部,成矿年龄为 127.3 ± 0.8 Ma(周涛发等,2012),与浮山火山-岩浆旋回形成的正长岩类侵入岩有关。

2 科学深钻岩石与蚀变矿化特征

2012年,国家深部探测专项(Sino Probe)第三项目“深部矿产资源立体探测技术及实验研究”第六课题在庐枞盆地中部的砖桥地区完成了ZK01科学深钻,钻孔开孔于砖桥组(K_1z)火山岩,东距黄梅

尖岩体约 15 km(图1),孔位坐标: $117^{\circ}28'45.47''E$, $31^{\circ}0'4.09''N$,孔深 2011.95 m。

2.1 岩石特征

砖桥科学深钻ZK01孔岩芯自上到下可归纳为四套岩石组合:

(1)砾石层:孔深 $0 \sim 17$ m,属第四系松散堆积物,砾石成分主要为粗安岩。

(2)火山-沉积岩:孔深 $17 \sim 1488$ m,属下白垩统砖桥组,岩性以粗安岩、辉石粗安岩为主,夹晶屑凝灰岩、凝灰质砂岩、石英砂岩和粉砂岩,局部有闪长玢岩脉穿插。

(3)正长岩:孔深 $1488 \sim 1848$ m,属晚期侵入的正长岩体,局部有粗安岩和薄层砂岩捕虏体。

(4)二长岩:孔深 $1848 \sim 2011.95$ m,属早期侵入的二长岩体。

2.2 蚀变矿化特征

砖桥科学深钻ZK01孔岩芯中发育的蚀变类型主要有钾长石化、钠长石化、硬石膏化、电气石化、水云母化和绿泥石化,其次为黑云母化、阳起石化、绿帘石化、硅化、碳酸盐化,偶见透闪石化、金红石化、磷灰石化和萤石化等。其中钾长石化和钠长石化主要发育于钻孔深部二长岩和正长岩内,呈蚀变晕产于绿色电气石+硬石膏脉两侧,或呈弥散状不均匀分布于蚀变岩石中;电气石化在 $1500 \sim 1800$ m深度的二长岩和正长岩内最为强烈,向上在火山-沉积岩内局部发育,常呈充填裂隙的脉状产出,局部呈团块状产出;硬石膏化在整个钻孔中均有发育,尤以深部最为强烈,主要呈充填裂隙的脉状产出,局部呈不规则团块状分布。与蚀变相关的铀钍矿化主要形成铀铀矿、铀钍石和晶质铀矿,产于电气石硬石膏脉内,此外还伴有磁铁矿、黄铁矿和黄铜矿化。

根据钻孔内蚀变矿化的矿物共生、蚀变交代和脉体穿切关系,将蚀变矿化分为五个阶段:

(I)绿色电气石+钾长石+硬石膏阶段:形成绿色电气石脉体和团块,含少量硬石膏,电气石脉两侧伴有钾长石化(图2a)。

(II)粉红色电气石+硬石膏+铀钍矿化阶段:形成大量粉红色电气石+硬石膏脉体和团块,交代绿色电气石,共生矿物还有金红石、磷灰石、黄铁矿、铀铀矿和铀钍石等(图2b,c)。

(III)黑色电气石+硬石膏+铀钍矿化阶段:形成少量黑色电气石+硬石膏脉体和团块,共生矿物还有铀钍石、晶质铀矿、磁铁矿、钛铁矿等(图2d)。

(IV)硬石膏+黄铁矿+黄铜矿阶段:形成硬石

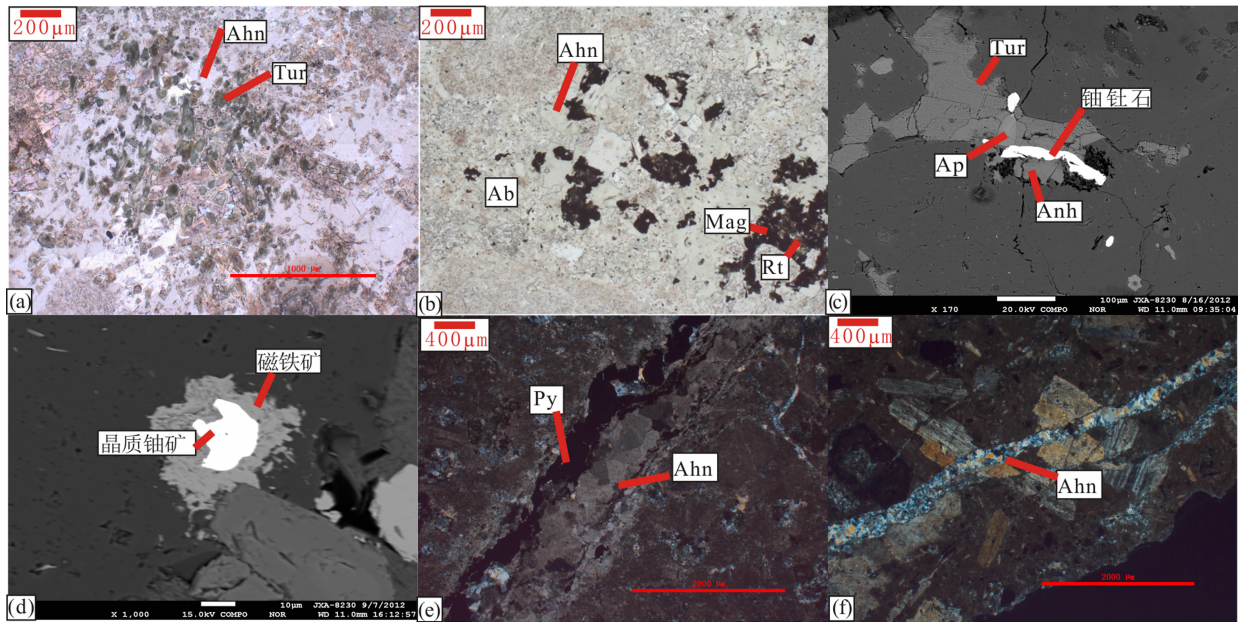


图 2 砖桥科学深钻 ZK01 镜下与背散射照片

Fig. 2 Microscope and BSE photos of deep drilling ZK01, Zhuangqiao (polarized light 10×10)

(a) — 钻孔内粗安岩 (ZK01—830m) 存在电气石、硬石膏共生, 呈脉状充填 (单偏光 10×10); (b) — 正长岩 (ZK01—1512m) 内硬石膏脉内可见磁铁矿与金红石共生 (单偏光 10×10); (c) — 电气石—硬石膏脉内可见磷灰石和不规则的铀钍石; (d) — 磁铁矿与不规则的晶质铀矿共生 (熊欣等, 2013); (e) — 黄铁矿沿着硬石膏脉边界充填, 局部穿插硬石膏脉 (单偏光 5×10); (f) — 晚期石膏脉 (第五期次) 呈网脉状穿插 (单偏光 5×10); Tur—电气石; Kfs—钾长石; Ab—钠长石; Anh—硬石膏; Qtz—石英; Rt—金红石; Ap—磷灰石; Ccp—黄铜矿; Mag—磁铁矿

(a) — Trachyandesite (ZK01—830m) occurs tourmaline and anhydrite are intergrown as a vein (polarized light 10×10); (b) — syenite (ZK01—1512m) occurs anhydrite veins with magnetite and rutile (polarized light 10×10); (c) — tourmaline-anhydrite veins occur apatite and irregular uraninite; (d) — magnetite are intergrown with irregular uraninite (Xiong Xin et al. , 2013); (e) — pyrite veins occur along the border of anhydrite veins and locally cut anhydrite veins (polarized light 5×10); (f) — late anhydrite stockwork veins (at fifth stage) (polarized light 5×10); Tur—tourmaline; Kfs—K-feldspar; Ab—abite; Anh—anhydrite; Qtz—quartz; Rt—rutile; Ap—aplite; Ccp—Chalcopyrite; Mag—magnetite

石膏脉, 脉内共生有绿泥石、黄铁矿、黄铜矿和少量磁铁矿 (图 2e)。

(V) 石膏+方解石+石英阶段: 形成石膏、方解石、石英、水云母细网脉和团块 (图 2f)。

3 流体包裹体研究

3.1 流体包裹体岩相学

本次工作对不同深度、主要不同阶段的硬石膏、电气石和石英进行了流体包裹体研究。样品特征见表 1。按常温下包裹体中各相态成分、比例、组合关系及均一时相态, 将所观察到的流体包裹体分为富液相 (L 型)、富气相 (V 型) 和含子晶 (S 型) 三种类型, 具体描述如下:

L 型: 包裹体的寄主矿物包括硬石膏、石英、电气石。L 型包裹体大小多在 3~20 μm 之间, 液相占包裹体体积为 50%~80%, 均一至液相。电气石、石英 L 型包裹体主要呈椭圆形、不规则态; 硬石膏 L 型包裹体呈长柱状, 少量呈椭圆形 (图 3a、b、e、d、p、

q、s、t)。

V 型: 包裹体的寄主矿物包括硬石膏、电气石。L 型包裹体大小多在 10~25 μm 之间, 气相占包裹体体积为 60%~70%, 均一至气相。电气石 V 型包裹体主要呈椭圆形、不规则态; 硬石膏 V 型包裹体呈长柱状, 少量呈椭圆形 (图 3c、d、i、j、n)。

S 型: 包裹体的寄主矿物包括硬石膏, 子矿物种类复杂, 根据结晶形态、光性以及加热溶解特性可在镜下识别的常见的石盐和钾盐, 含石盐子矿物包裹体最为常见, 呈立方体状; 少量包裹体含钾盐, 子晶颗粒较小, 呈椭圆状。包裹体大小多在 5~10 μm 之间, 呈长柱状, 气相占包裹体体积多为 15%~40%, 均一至液相 (图 3o、r)。

从岩相学观察下, 可以发现从早期到晚期, 流体包裹体大小逐渐变小, 颜色逐渐变浅, 硬石膏包裹体从长柱状逐渐变为不规则的椭圆状, 这可能是流体成矿金属元素逐渐沉淀、减少的缘故 (图 3)。L 型包裹体在第 I、II 阶段内与 V 型包裹体紧密共生并

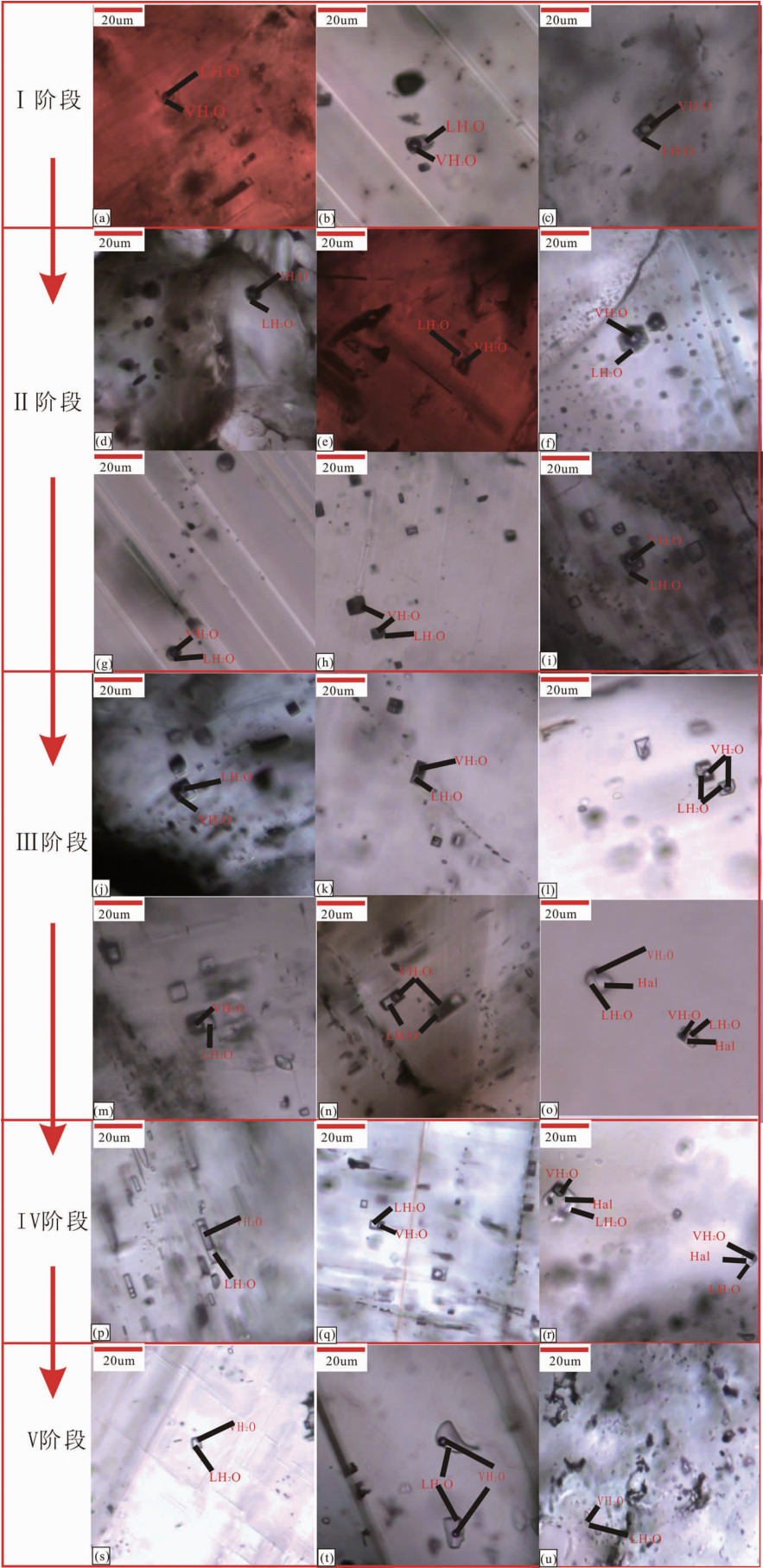


图 3 砖桥科学深钻 ZK01 流体包裹体特征

Fig. 3 Characteristics of fluid inclusions from deep drilling ZK01 in Zhuanqiao

(a)~(c)—阶段Ⅰ内包裹体:(a)—电气石内 L 型包裹体,(b)~(c)—硬石膏内 L 型、V 型包裹体;(d)~(i)—阶段Ⅱ内包裹体:(d)—电气石内 V 型包裹体,(e)—电气石内 L 型包裹体,(f)~(i)—硬石膏内 L 型、V 型包裹体;(j)~(o)—阶段Ⅲ包裹体:(j)~(n)—硬石膏内 V 型包裹体,(o)—硬石膏内 S 型包裹体;(p)~(r)—阶段Ⅳ内包裹体,(p)~(q)—硬石膏内 L 型包裹体,(r)—硬石膏为 S 型包裹体);(s)~(u)—阶段Ⅴ内包裹体:(s),(t)—石膏内 L 型包裹体,(u)为石英内 L 型包裹体。

(a)~(c)—Fluid inclusion of tourmaline in stageⅠ (type L,V); (d)~(i)—fluid inclusion of anhydrite in stageⅠ (type L,V); (a)~(f)—fluid inclusion of anhydrite in stageⅢ (type L,S); (a)~(c)—fluid inclusion of anhydrite in stageⅣ (type L,S); (a)~(c)—fluid inclusion of quartz in stageⅤ (type L)

表 1 砖桥科学深钻 ZK01 流体包裹体样品采集位置

Table 1 Microthermometric data of fluid inclusions from deep drilling ZK01 in Zhuanqiao				
序号	样品编号	岩性	测试对象	蚀变矿化阶段
1	ZK01—349.14m	晶屑凝灰岩	硬石膏	Ⅲ~Ⅳ
2	ZK01—385.1m	晶屑凝灰岩	硬石膏	Ⅲ~Ⅳ
3	ZK01—457m	晶屑凝灰岩	硬石膏	Ⅳ
5	ZK01—486m	晶屑凝灰岩	石膏,石英	V
6	ZK01—744.9m	粗安岩	石膏,石英	V
7	ZK01—791.6m	粗安岩	硬石膏	Ⅳ
8	ZK01—871.5m	破碎带凝灰岩	硬石膏	Ⅳ
9	ZK01—1098m	粗安岩	硬石膏	Ⅳ
10	ZK01—1098(2)m	粗安岩	硬石膏	Ⅳ
11	ZK01—1426m	粗安岩	硬石膏	Ⅳ
12	ZK01—1476m	硅化砂岩	硬石膏,电气石,石英	Ⅲ~Ⅳ
13	ZK01—1484.5m	硅化砂岩	硬石膏	Ⅲ~Ⅳ
14	ZK01—1487.1m	角砾岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
15	ZK01—1489.5m	正长岩	硬石膏,电气石	Ⅰ~Ⅲ
16	ZK01—1511m	正长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
17	ZK01—1512.7m	正长岩	电气石	Ⅰ~Ⅲ
18	ZK01—1513.1m	正长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
19	ZK01—1526.6m	正长岩	硬石膏,石英	Ⅱ~Ⅳ
20	ZK01—1551.2m	正长岩	硬石膏,电气石	Ⅰ~Ⅲ
21	ZK01—1583m	正长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
22	ZK01—1603m	正长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
24	ZK01—1641.07m	正长岩	硬石膏,石英	Ⅱ~Ⅳ
25	ZK01—1697.2m	正长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
26	ZK01—1729.34m	正长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
27	ZK01—1780.5m	正长岩	电气石	Ⅱ~Ⅲ
29	ZK01—1783.7m	火山熔岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
30	ZK01—1784m	正长岩	硬石膏,电气石	Ⅰ~Ⅲ
31	ZK01—1809.58m	粗安岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
32	ZK01—1817.18m	正长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ
34	ZK01—1825.8m	正长岩	硬石膏,电气石	Ⅰ~Ⅲ
35	ZK01—1945m	二长岩	硬石膏	Ⅱ~Ⅲ

注:样品编号按照采样深度编号。

在相近温度下均一化,为非均匀流体体系以不同的比例捕获所出现的相,指示流体Ⅰ阶段和Ⅱ阶段过程中可能发生过沸腾或相分离(图 4)。

3.2 包裹体的均一温度、盐度

第Ⅰ阶段:该阶段原生包裹体(L 型、V 型、S 型)寄主矿物包括电气石和硬石膏,共得到 46 个均

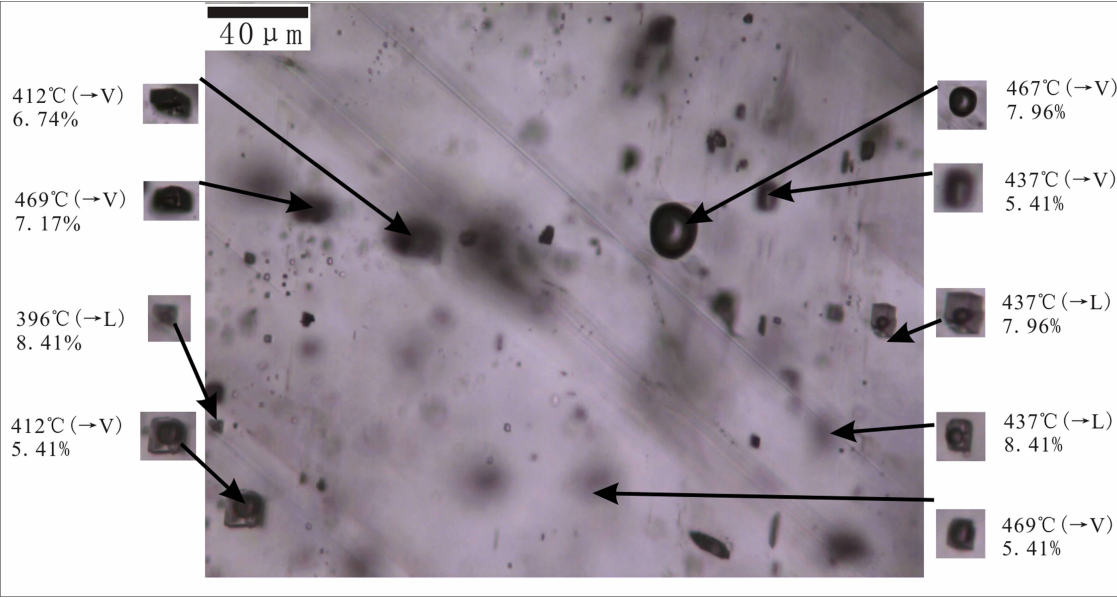


图 4 砖桥科学深钻 ZK01 第 II 阶段脉石英从沸腾流体中捕获的一群流体包裹体及其测温结果
Fig. 4 Thermometric results of boiling fluid inclusions in stage II from deep drilling ZK01 in Zhuanqiao
412℃(→V)为均一温度;6.74%为盐度(NaCl eq);(→V)表示均一到气相;(→L)表示均一到液相

412℃(→V): homogenization temperature;6.74%: Salinity (NaCl eq); (→V): homogenization to vapor; (→L): homogenization to liquid

一温度值。电气石 I 型包裹体均一温度范围为 481~600℃,盐度范围为 1.74%~2.07% NaCl eq;II 型包裹体均一温度范围为 512℃。硬石膏 I 型包裹体均一温度范围为 537℃,盐度范围为 2.24% NaCl eq; II 型包裹体均一温度范围为 551~600℃,盐度范围为 1.74%~11.22% NaCl eq;III 型包裹体均一温度范围为 551~600℃,盐度范围为 34.87%~68.62% NaCl eq,该类包裹体中含有石盐或少量钾盐子晶,子晶包裹体溶解温度范围为 253~532℃。综合该阶段电气石和硬石膏包裹体的测温结果,该阶段流体包裹体均一温度范围为 481~600℃(表 2),平均值为 538.3℃,峰值为 540~560℃(图 5a);盐度范围为 1.74%~68.62% NaCl eq(表 2),平均值为 41.04% NaCl eq,峰值由高盐度和低盐度两部分组成,分别为 65%~70% NaCl eq 和 0%~5% NaCl eq(图 5b)。

第 II 阶段:该阶段原生包裹体(L 型、V 型、S 型)测试对象包括电气石和硬石膏,共得到 108 个均一温度值。电气石 L 型包裹体均一温度范围为 340~474℃,盐度范围为 1.74%~9.21% NaCl eq;电气石 V 型包裹体均一温度范围为 449℃;硬石膏 L 型包裹体均一温度范围为 337~483℃,盐度范围为 1.74%~12.51% NaCl eq;硬石膏 V 型包裹体均一温度范围为 278~484℃,盐度范围为 1.74%~8.41% NaCl eq;硬石膏 S 型包裹体均一温度范围为 335~438℃,盐度范围为 58.28%~70.78%

NaCl eq,该类包裹体中含有石盐或少量钾盐子晶,测得子晶溶解温度范围为 489~578℃,该类型包裹体中部分石盐子晶溶解温度高于气液均一温度,所捕获的流体可能属于过饱和溶液(Calagari,2004)。综合该阶段电气石和硬石膏包裹体的测温结果,该阶段流体包裹体均一温度范围为 278~484℃(表 2),平均值为 402.7℃,峰值为 380~400℃(图 5c);盐度范围为 1.74%~70.78% NaCl eq(表 2),平均值为 10.53% NaCl eq,峰值为 0%~5% NaCl eq(图 5d)。

第 III 阶段:实验测定第 III 阶段的原生包裹体(L 型、V 型、S 型),寄主矿物分别包括电气石和硬石膏,共得到 115 个均一温度值。电气石 I 型包裹体均一温度范围为 212~371℃,盐度范围为 0.18%~9.6% NaCl eq;电气石 II 型包裹体均一温度范围为 197℃;硬石膏 I 型包裹体均一温度范围为 227~362℃,盐度范围为 1.06%~12.62% NaCl eq;硬石膏 II 型包裹体均一温度范围为 247~327℃,盐度范围为 1.74%~9.21% NaCl eq;硬石膏 III 型包裹体均一温度范围为 284~357℃,盐度范围为 55.15%~59.9% NaCl eq,该类包裹体中含有石盐或少量钾盐子晶,测得子晶包裹体溶解温度范围为 465~501℃,属于过饱和溶液(Calagari,2004)。综合该阶段电气石和硬石膏包裹体测温结果,该阶段流体包裹体均一温度范围为 197~371℃(表 2),平均值为 309.6℃,峰值为 320~340℃(图 5e);盐度范围为

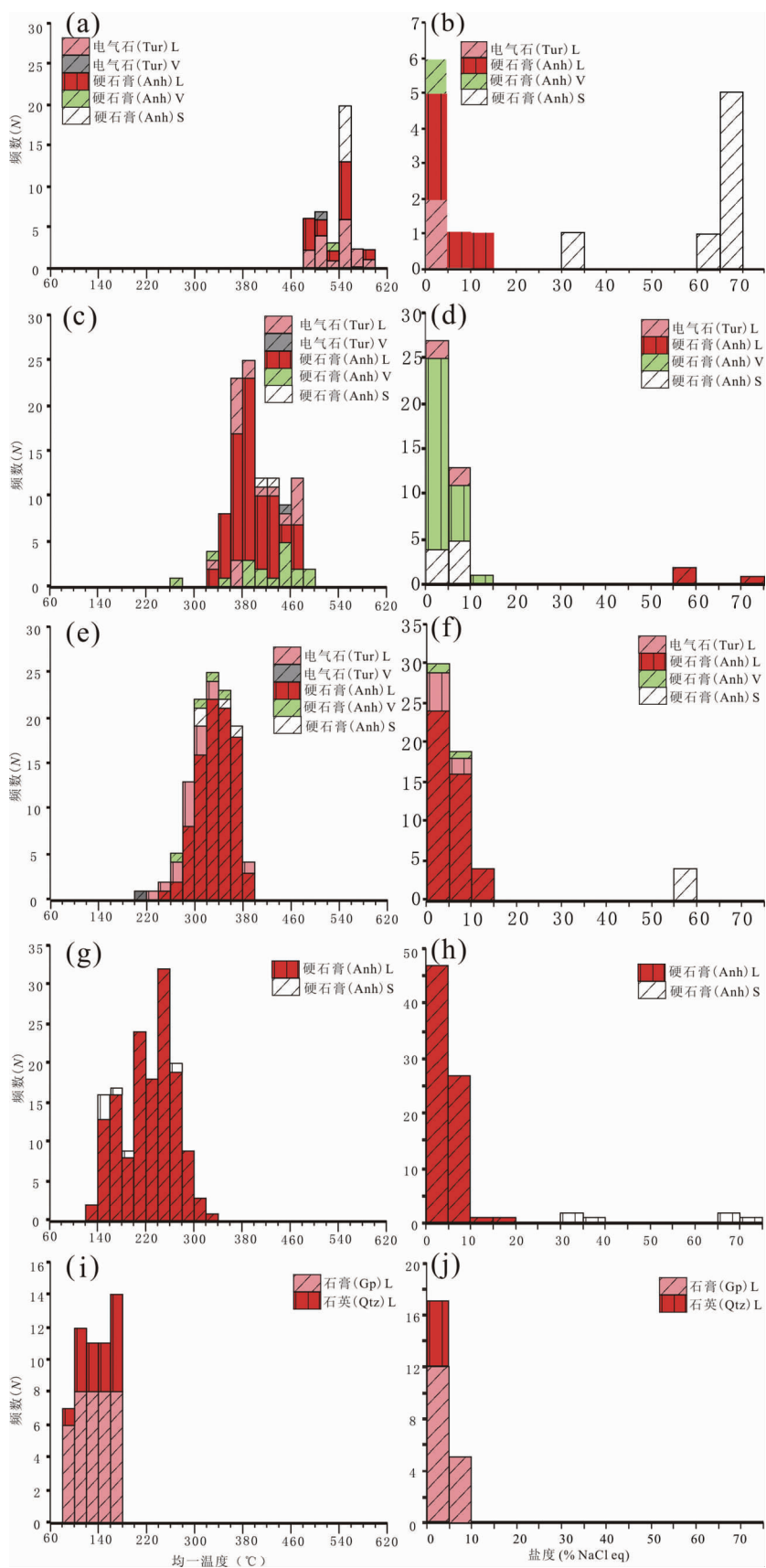


图 5 砖桥科学深钻 ZK01 电气石(Tur)、硬石膏(Anh)、石英(Qtz)、石膏(Gp)流体包裹体均一温度、盐度直方图
Fig. 5 Histogram of homogenization temperatures and salinities of tourmaline (Tur), anhydrite (Anh), quartz (Qtz), gypsum (Gp) fluid inclusions from deep drilling ZK01 in Zhuangqiao

表 2 砖桥科学深钻 ZK01 流体包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric data of fluid inclusions from deep drilling ZK01 in Zhuanqiao

阶段	主矿物	包裹体类型	个数	冰点(℃)	均一温度(℃)	子矿物溶解温度(℃)	盐度范围(%NaCl eq)
I 阶段	电气石	L	15	-1~-1.2	600~481		1.74~2.07
	电气石	V	1		512		
	硬石膏	L	1	-1.3	537		2.24
	硬石膏	V	22	-1~-7.6	600~551		1.74~11.22
	硬石膏	S	7		600~551	253~532	34.87~68.62
II 阶段	电气石	L	17	-1~-6	474~340		1.74~9.21
	电气石	V	1		449		
	硬石膏	L	67	-1~-8.7	337~483		12.51~1.74
	硬石膏	V	20	-1~-4.2	278~484		1.74~8.41
	硬石膏	S	3		335~438	489~578	70.78~58.28
III 阶段	电气石	L	15	-0.1~-6.3	212~371		0.18~9.6
	电气石	V	1		197		
	硬石膏	L	91	-0.6~-7.6	227~362		1.06~12.62
	硬石膏	V	4	-1~-6	247~327		1.74~9.21
	硬石膏	S	4		284~357	465~501	55.15~59.9
IV 阶段	硬石膏	L	146	-0.3~-11.2	139~323		0.88~15.17
	硬石膏	V	6		145~261	56~600	30.8~73.96
V 阶段	硬石膏	L	38	-1.1~-5.6	95~179		1.91~8.68
	石英	L	17	-0.5~-2.3	91~172		0.88~3.87

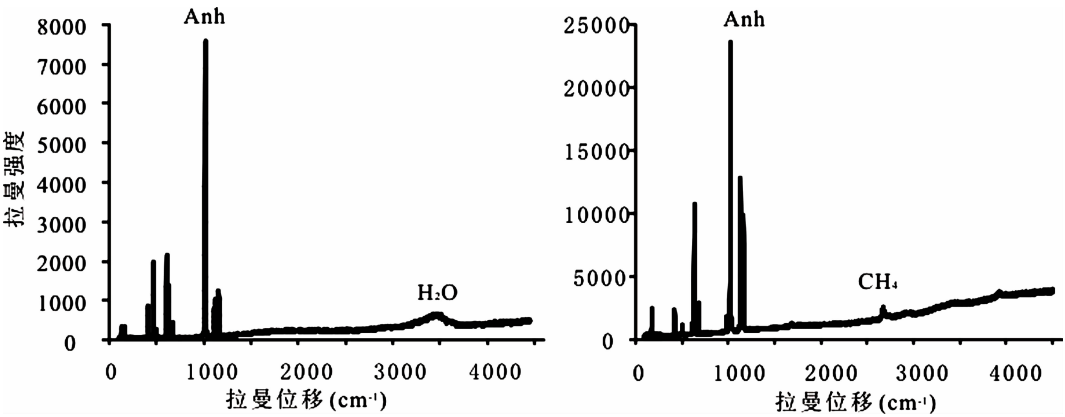


图 6 砖桥科学深钻 ZK01 孔内硬石膏(Anh)流体包裹体激光拉曼图谱

Fig. 6 Laser Raman spectra of fluid inclusions of anhydrite (Anh) from from deep drilling ZK01 in Zhuanqiao

0.18%~59.9% NaCl eq(表 2),平均值为 8.30% NaCl eq,峰值为 0%~5% NaCl eq(图 5f)。

第Ⅳ阶段:实验测定第Ⅳ阶段的原生包裹体(L 型、S 型),寄主矿物为硬石膏,共得到 152 个均一温度值。硬石膏 I 型包裹体均一温度范围为 139~308℃,盐度范围为 0.88%~15.17% NaCl eq;硬石膏Ⅲ型包裹体均一温度范围为 145~261℃,盐度范围为 30.8%~73.96% NaCl eq,该类包裹体中含有石盐或少量钾盐子晶,测得子晶包裹体溶解温度范围为 56~600℃,部分石盐子晶溶解温度高于气液均一温度的流体可能属于过饱和溶液(Calagari, 2004)。综合该阶段硬石膏包裹体测温结果,该阶段流体包裹体均一温度范围为 139~323℃(表 2),平均值为 223.1℃,峰值为 240~260℃(图 5g);盐度范围为 0.88%~73.96% NaCl eq(表 2),平均值为 9.56% NaCl eq,峰值为 0%~5% NaCl eq(图 5h)。

第Ⅴ阶段:实验测定第Ⅴ阶段的原生包裹体(L 型),寄主矿物分别包括石膏和石英,共得到 55 个均一温度值。石膏 I 型包裹体均一温度范围为 95~179℃,盐度范围为 1.91%~8.68% NaCl eq;石英 I 型包裹体均一温度范围为 91~172℃,盐度范围为 0.88%~3.87% NaCl eq。综合该阶段石膏和石英

包裹体测温结果,该阶段流体包裹体均一温度范围为 91~179℃(表 2),平均值为 137.0℃,峰值为 160~180℃(图 5i);盐度范围为 0.88%~8.68% NaCl eq(表 2),平均值为 4.43% NaCl eq,峰值为 0%~5% NaCl eq(图 5j)。

3.3 成矿压力和深度估算

成矿深度是成矿作用的重要研究内容,目前国内主要通过测量包裹体压力,并依据平均静岩压力梯度进行换算,求得成矿深度(卢焕章等,2004;王蕾,2011)。流体包裹体估算成矿深度的方法种类较多,各有优势。根据钻孔内流体包裹体特征,采用以下两种方法进行计算。

3.3.1 图解法

通常均一压力只能反映包裹体捕获压力的可能下限值,但在流体不混溶或沸腾过程中捕获的流体包裹体的均一压力可代表捕获压力(Roedder, 1984)。流体包裹体岩相学特征、测温结果显示流体演化过程中存在沸腾或不混溶,即不同充填度的包裹体、均一到气相和均一到液相包裹体密切伴生,由图 7 可看出成矿阶段存在许多均一温度相近的流体包裹体的盐度沿着等温线分布在临界曲线的两侧。同时图 7 可以得到成矿阶段沿等温线分布的“沸腾”流体包裹体,其捕获压在 15~45 MPa 之间,考虑到该阶段电气石-硬石膏组合形成于封闭环境,流体体

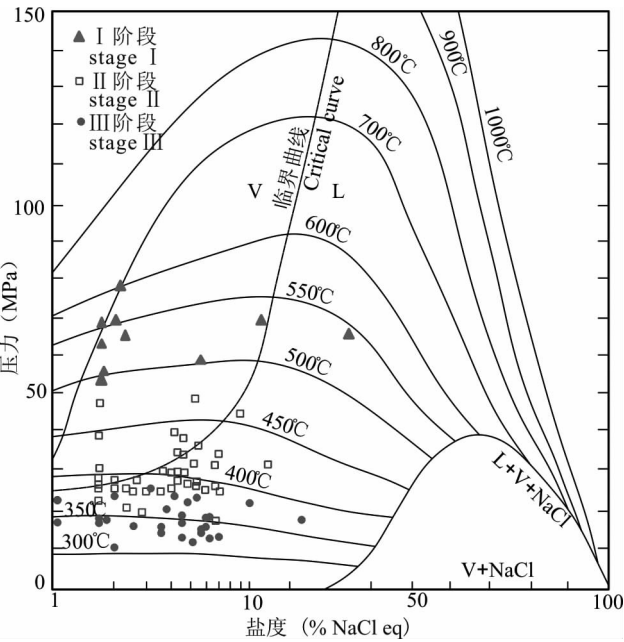


图 7 砖桥科学深钻 ZK01 铀钍矿化流体包裹体压力估计图 (据 Bouzari et al., 2006)

Fig. 7 Pressure estimates for fluid inclusions from deep drilling ZK01 in Zhuangqiao (after Bouzari et al., 2006)

系承受的压力应接近静岩压(26 MPa/km),深度约 0.6~1.7 km。

3.3.2 经验公式法

根据成矿压力和成矿深度经验公式(据邵洁涟, 1986):

$$T_0(\text{初始温度}) = 374 + 920 \times N(\text{成矿溶液的盐度})(^\circ\text{C}) \quad (1)$$

$$P_0(\text{初始压力}) = 219 + 2620 \times N(\text{成矿溶液的盐度})(\times 10^5 \text{ Pa}) \quad (2)$$

$$H_0(\text{初始深度}) = P_0 \times 1 / (300 \times 10^5) (\text{km}) \quad (3)$$

$$P_1(\text{成矿压力}) = P_0 \times T_1(\text{矿区实测成矿温度}) / T_0(\times 10^5 \text{ Pa}) \quad (4)$$

$$H_2(\text{成矿深度}) = P_1 \times 1 / 300 \times 10^5 (\text{km}) \quad (5)$$

铀钍矿化温度范围为 483~232℃,盐度范围为 0.18%~12.62% NaCl eq,计算出成矿深度 H_2 为 0.58~1.54 km,这与沸腾包裹体计算获得深度 0.6~1.7 km 大体一致。

4 讨论

4.1 流体性质

流体包裹体岩相学、激光拉曼和显微测温分析研究揭示深部钻孔内不同阶段的流体特征如下:

钻孔内 I 阶段包裹体类型有 L 型、V 型、S 型,其中 S 型包裹体中子矿物有石盐、钾盐等,表明成矿流体中富含 Na、K 等元素,包裹体气相成分中有 H_2O 、 CH_4 ,液相成分主要为 H_2O 。说明流体成分体系可能属 NaCl-KCl- H_2O 多元体系。测温结果显示存在高温流体($>600\sim500^\circ\text{C}$),其盐度范围分布在 1.74%~68.62% NaCl eq 之间,揭示早期流体以高温、盐度范围宽、富钾、富钠为特征,这可能与膏盐层中组分的加入有关(张乐骏,2011)。

II 阶段包裹体类型有 L 型、V 型、S 型,S 型包裹体子矿物以石盐、钾盐为主,气相成分中部分包裹体含有 CH_4 ,液相成分主要为 H_2O ,流体体系可能以 NaCl-KCl- H_2O 体系为主。该阶段测温结果显示均一温度范围为 278~484℃,包裹体盐度为 1.74%~70.78% NaCl eq,该阶段流体以中一高温、盐度范围宽为特征。

III 阶段包裹体类型有 L 型、V 型、S 型。气相成分主要为 H_2O ,液相成分为盐水溶液,III 型包裹体子矿物为石盐,流体体系可能以 NaCl- H_2O 体系为主。该阶段测温结果显示均一温度范围为 197~371℃,包裹体盐度为 0.18%~59.9% NaCl eq,该阶段流体以中温、盐度范围宽、流体组成相对简单为

特征。

Ⅳ阶段脉石英中包裹体类型有 L 型、S 型。气相成分主要为 H_2O ，液相成分为盐水溶液，子晶为石盐，流体体系主体上属于 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系。该阶段测温结果显示均一温度范围为 $139\sim 323^\circ\text{C}$ ，盐度为 $0.88\%\sim 73.96\%\text{NaCl eq}$ ，以低—中温，盐度范围宽的热液流体为特征。

Ⅴ阶段脉石英中包裹体类型有 L 型。气相成分主要为 H_2O ，液相成分为盐水溶液，流体体系主体上属于 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系。该阶段测温结果显示均一温度范围为 $91\sim 179^\circ\text{C}$ ，包裹体盐度为 $0.88\%\sim 8.68\%\text{NaCl eq}$ ，该阶段流体以低温、低盐度、流体组成相对简单为特征。

4.2 流体演化过程

第Ⅰ阶段 $600\sim 481^\circ\text{C}$ 之间，少量包裹体均一温度大于 600°C （测温仪上限为 600°C ），这些高温流体包裹体反映钻孔内早期流体特征，属于岩浆—热液过渡阶段（流体温度可达 600°C 以上）。一系列镜下、电子探针工作，揭示深部钻孔正长岩、二长岩铀钍背景值较高，在岩浆晚期阶段，铀钍元素主要以类质同像的形式赋存于岩体榍石、锆石、独居石等副矿物内（熊欣等，2013）。流体包裹体岩相学特征及其测温结果显示在此岩浆—热液过渡阶段流体经历沸腾，沸腾有效地促成了高温、高盐度流体的形成，而高温、高盐度流体具有很强的金属元素携带能力（Diamond et al., 1990; Heinrich et al., 1992），从而使得榍石、锆石、独居石等发生蚀变释放出铀钍元素。

第Ⅱ阶段 $483\sim 335^\circ\text{C}$ 之间，成矿流体携带 Ca、Na、K、Fe、Mg、U、Th 和大量的其他挥发组分（ H_2O 、F、B、 CH_4 、 H_2S 、 SO_2 、 SO_3 ）向上迁移，发生以镁、铝为主的交代作用，交代溶蚀早期绿色电气石形成粉色—浅棕色电气石（富 Mg）。粉色—浅棕色电气石 Fe 元素主要以 Fe^{2+} 形式存在，反映流体处于相对还原的状态，这有利于铀钍元素的沉淀（熊欣等，2014）。此成矿阶段流体同样存在沸腾现象，这是导致成矿物质从热液中沉淀的最重要机制之一（卢焕章等，2004；陈衍景等，2007），流体内大量成矿元素的发生强烈沸腾，流体的相分离导致挥发份的大量逸失，一方面促使体系压力、温度快速降低，另一方面也使流体进一步浓缩甚至过饱和，另外大量酸性组分被带走（到气相中）使得液相 pH 值增大、氧化性降低或还原性增强（Chen et al., 2006），这促使成矿元素在硬石膏脉内沉淀形成大量金红石、磷灰

石、铀钍石、铀钛矿。

第Ⅲ阶段 $232\sim 371^\circ\text{C}$ 之间，在粉色电气石形成后，在其外缘层再生长，形成环带较窄的黑电气石，电气石 Fe^{3+} 的升高表明流体逐渐转变为相对氧化的状态（熊欣等，2014）。这个阶段还有少量的晶质铀矿沉淀，但由于流体氧逸度升高，这为成矿流体铀元素以 U^{6+} 再次迁移提供条件。因此，在铀钍矿化高温热液阶段，铀钍元素发生分离，钍元素大量沉淀，铀元素以 U^{6+} 再次发生迁移，这也是深部钻孔内钍的含量比铀要高得多的原因（熊欣等，2014）。

第Ⅳ阶段存在高盐度、温度低的包裹体，这是流体混合稀释作用的结果，原高盐度的成矿流体演化过程中，由于低盐度流体如大气降水等的加入，使得一部分高盐度流体发生稀释作用，流体被矿物捕获后便同时出现高盐度包裹体和低盐度包裹体。

从Ⅰ阶段到Ⅴ阶段，包裹体类型逐渐减少，成分逐渐变简单，均一温度既连续又相对集中的特点，盐度总体上降低，反映出岩浆热液呈连续的演化趋势。

流体包裹体岩相学、测温结果揭示，钻孔内早期流体、铀钍矿化和磁铁矿化阶段均存在流体的沸腾作用。在沸腾期间流体包裹体的盐度发生剧烈波动，这些沸腾期相当于间歇性“沸腾”的高盐度溶液脉动式地向上流经体系。沸腾过程中产生的低密度气体和高密度液体同时被捕获，在高密度液体中生成子晶矿物，沸腾有效地促成了高温、高盐度流体的形成，而高温、高盐度流体具有很强的金属元素携带能力，从而使成矿元素有效地从岩浆中分离出来。虽然高盐度常被解释为由于沸腾而发生浓集，但除非有一个外部热源有利于流入部分卤水，否则由于浓集而造成的盐度增高效应很小（Bodnar, 1983; Roedder, 1984），这可能与膏盐层关系密切。流体沸腾也是导致成矿物质从热液中沉淀的最重要机制之一（卢焕章等，2004；陈衍景等，2007），流体的相分离导致挥发份的大量逸失，一方面促使体系压力、温度快速降低，另一方面也使流体进一步浓缩甚至过饱和，另外大量酸性组分被带走（到气相中）使得液相 pH 值增大、氧化性降低或还原性增强，沸腾引起的成矿热液系统物理化学条件的变化促使 Fe、U、Th 元素的沉淀与迁移，为深部钻孔成矿的一个重要因素。

4.3 剥蚀程度

估算矿体剥蚀深度目前较为广泛的是地球化学方法，主要用于评价热液矿床的剥蚀深度。本文采用流体包裹体分析法定量研究矿床的剥蚀程度，获

得铀矿床的成矿深度,再与目前矿床所处的标高进行对比,计算二者的差值,获得该矿床形成后所遭受的剥蚀程度(王蕾,2011)。

目前铀钍矿化(局部达到工业品位)离地表深度约为 1500~1900 m,计算获得深度约 0.6~1.7 km。将目前不同标高的实际深度与估算的成矿深度对比,就可以获得该标高矿体形成后上覆岩石遭受的剥蚀厚度,据此得到矿床的剥蚀厚度大致在 0.27~1.02 km 之间,平均值为 0.73 km。由此推算自铀钍矿化(略晚于 130 Ma)以来该区剥蚀了 0.73 km 左右,地区在铀钍矿化形成后剥蚀作用不强。庐-枞一带地处董岭地体之上,剥蚀程度不大,上部火山盆地保留完好(董树文等,2011)这一基本地质现象也与本次估算所获结果相符,显示庐枞盆地具有有利的矿床保存条件。

4.4 庐枞盆地成矿流体系统特征

庐枞盆地砖桥科学深钻的流体性质与盆地内其他矿区的成矿流体性质相似(表 3),就流体温度范围而言,二者磁铁矿矿化温度范围大致相似,主要在 200~400℃之间;就流体成矿过程而言,二者随着成矿的进行,均呈现出温度降低,盐度总体上减小的特征;就流体包裹体类型而言,二者均以气液相包裹体

为主(表 3);就流体成分而言,由于二者均存在硬石膏、磷灰石等热液蚀变矿物,可以推断成矿流体均富含 Ca、Na、K、Fe、Mg、U、Th 和大量的其他挥发组分(H₂O、F、CH₄、H₂S、SO₂、SO₃),这些挥发分与三叠系膏盐层关系密切(张乐骏,2011)。因此,深部钻孔蚀变矿化组合、流体包裹体测温结果、流体包裹体成分分析均揭示本次深部钻孔内成矿流体为庐枞盆地成矿流体系统的一部分(表 3)。

深部钻孔流体包裹体的研究进一步补充完善了盆地成矿流体性质。钻孔内流体包裹体均一温度跨度较大,600~100℃甚至 600℃以上,成矿划分阶段详细,共有五个阶段,填补了前人在庐枞盆地内多个矿区内流体研究均一温度或爆裂温度均小于 500℃,缺失岩浆-热液高温过渡阶段(> 600~500℃)的不足(表 3);钻孔内铀钍成矿流体为中—高盐度、中高温,而磁铁矿化成矿流体为中—低盐度、中温,表明庐枞盆地内铀钍高温阶段成矿略早于磁铁矿成矿;本次通过大量岩相学工作还揭示硬石膏内流体包裹体存在石盐或钾盐子矿物;深部钻孔内首次发现大量不同期次的电气石(化学式为 Na_{1.08}Ca_{0.27}[Mg_{3.52}Fe_{0.39}]Al_{4.55}[Si_{6.33}O₁₈][BO₃]₃(OH_{3.83},F_{0.17}),熊欣等,2014),庐枞盆地成矿作用

表 3 庐枞盆地内部分矿床成矿温度

Table 3 Part of the metallogenic temperature in Luzong basin

矿区	矿床类型	样品编号	测试矿物	包裹体类型	均一温度(℃)	盐度(%NaCl eq)	资料来源
泥河铁矿	玢岩铁矿	磁铁矿阶段	硬石膏、磷灰石	L+G,L	343.8~506.7	11.34~17.26	张乐骏等,2011
		硫化物-次生石英岩	硬石膏	L+G	230.8~363.6	8.00~13.18	张乐骏等,2011
		石英-方解石-硫化物阶段	硬石膏、方解石	L+G	142.2~261.5	1.98~7.31	张乐骏等,2011
龙桥铁矿	玢岩铁矿	磁铁矿阶段	石榴子石-黑云母温度计		350		段超等,2009
			磁铁矿 ^①		350~450		吴明安等,1996
		硫化物阶段	黄铁矿,黄铜矿 ^①		300~350		吴明安等,1996
马口铁矿	磁铁矿-阳起石-磷灰石矿床	硬石膏	硬石膏	L+G	189.1~332.5		张乐骏等,2011
		磁铁矿阶段	磷灰石	L+G	252.2~322.6		周涛发等,2012
		石英硫化物阶段	石英	L+G	120.1~189.2		周涛发等,2012
井边铜矿	脉状铜矿床	石英-硫化物阶段	石英	L+G	峰值 317.8	0.99	张乐骏等,2011
		石英-重晶石阶段	石英	L+G	峰值 210.8	0.83	张乐骏等,2011
矾山明矾石矿床	高硫化型浅成低温热液矿床	成矿阶段	明矾石	L+G	197.3~312.5		张乐骏等,2011
天头山矿区	脉状铜矿床	石英-硫化物	石英	L+G	170~245		任启江等,1991
盘洼矿区	脉状铜矿床	石英-硫化物阶段	石英	L+G	175~270		任启江等,1991
巴家滩矿区	脉状铜矿床	石英-硫化物阶段	磁黄铁矿 ^①		215~275		任启江等,1991
岳山铅锌矿	潜火山热液型脉	铅锌矿化阶段	铅锌矿 ^①		260~310		张乐骏等,2011
	状 Pb、Zn 矿床	银矿石	方铅矿 ^①		287~296		张乐骏等,2011

注:①为爆裂温度,一般情况下高于均一温度的结果,为成矿温度的上限。

有硼元素的参与。

综合庐枞盆地各矿床流体包裹体岩相学、测温结果进行总结发现,多个矿床中均存在不同类型包裹体共生现象,表明庐枞盆地成矿流体几乎均发生过沸腾现象(表 3,张乐骏,2011),从而引起的成矿热液系统物理化学条件的变化,为庐枞盆地成矿的一个重要因素。

5 结论

(1)钻孔内流体包裹体类型单一,包括富液相(I型)、含子晶(II型)、富气相(III型)三类,包裹体类型从早到晚逐渐减少,流体成分由 NaCl-KCl-H₂O 多元体系向以 NaCl-H₂O 为主的盐水体系过渡;

(2)铀钍矿化土磁铁矿化阶段流体包裹体均一温度为 278~484℃,盐度为 1.74%~70.78% NaCl eq,略早于磁铁矿化阶段形成。磁铁矿化土铀钍矿化阶段流体包裹体均一温度范围为 197~371℃,包裹体盐度为 0.18%~59.9% NaCl eq。

(3)流体沸腾引起的成矿热液系统物理化学条件的变化,是成矿物质从成矿流体中沉淀成矿的主要原因。

(4)钻孔内流体包裹体类型、性质与庐枞盆地内其它矿床相似,为庐枞盆地成矿流体系统的一部分。

致谢:衷心感谢国家深部探测专项(Sino Probe)第三项目组成员在室内外工作过程中提供的帮助!感谢中国地质科学院矿产资源研究所的陈伟十专家在流体包裹体测温过程中提供的帮助!感谢审稿专家提供的建议!

参 考 文 献

- 常印佛,刘湘培,吴言昌. 1991. 长江中下游铜铁成矿带. 北京:地质出版社.
- 陈衍景,倪培,范宏瑞, Pirajno F, 赖勇,苏文超,张辉. 2007. 不同类型热液金矿系统的流体包裹体特征. 岩石学报, 23(9): 2085~2108.
- 董树文,马立成,刘刚,薛怀民,施炜,李建华. 2011. 论长江中下游成矿动力学. 地质学报, 85(5): 612~625.
- 段超. 2009. 安徽庐枞盆地龙桥铁矿床地质地球化学特征和矿床成因研究. 合肥工业大学硕士学位论文.
- 范裕,周涛发,袁峰,钱存超,陆三明, David C. 2008. 安徽庐江—枞阳地区 A 型花岗岩的 LA-ICP-MS 定年及其地质意义. 岩石学报, 24(08): 1715~24.
- 刘斌,沈昆. 1999. 流体包裹体热力学. 北京:地质出版社, 1~290.
- 卢焕章,范宏瑞,倪培,欧光习,沈昆,张文淮. 2004. 流体包裹体. 北京:科学出版社, 1~487.
- 娄峰,李宏卫,陈光明,敖文波,赖中信,卢映新,杨燕娜. 2011.

- 花岗岩演化与铀钍元素富集的关系:以粤北贵东岩体为例. 地质学前沿, 18(1): 110~117.
- 任启江,刘孝善,徐兆文. 1991. 安徽庐枞中生代火山构造洼地及其成矿作用. 北京:地质出版社.
- 邵洁涟,梅建明. 1986. 浙江火山岩区金矿床的矿物包裹体标型特征研究及其成因与找矿意义. 矿物岩石, 6(3): 103~111.
- 王蕾. 2011. 流体包裹体分析法在铀矿床研究中的应用——以相山铀矿邹家山、沙洲矿床为例. 铀矿地质, 27(6): 331~336.
- 吴明安,张千明,汪祥云,高昌生,尚世贵,王明华. 1996. 安徽庐江龙桥铁矿. 北京:地质出版社.
- 邢凤鸣,徐祥. 1994. 安徽两条 A 型花岗岩带. 岩石学报, 10(4): 357~369.
- 熊欣,徐文艺,贾丽琼,吕庆田,李骏. 2013. 安徽庐江砖桥科学深钻内的铀钍赋存状态研究. 矿床地质, 32(6): 1211~1220.
- 熊欣,徐文艺,吕庆田,贾丽琼,李骏. 2014. 安徽庐枞盆地砖桥深部钻孔内电气石对铀钍成矿流体在高温阶段的指示意义. 岩石矿物学杂志, 33(2): 263~272.
- 袁峰,周涛发,范裕,陆三明,钱存超,张乐骏,段超,唐敏慧. 2008. 庐枞盆地中生代火山岩的起源、演化及形成背景. 岩石学报, 24(8): 1691~1702.
- 翟裕生,姚书振,林新多. 1992. 长江中下游地区铁铜(金)成矿规律. 北京:地质出版社.
- 张荣华,张雪彤,胡书敏. 2010. 庐枞火山盆地深部岩石与成矿过程. 岩石学报, 26(9): 2665~2680.
- 张乐骏. 2011. 安徽庐枞盆地成岩成矿作用研究. 合肥工业大学. 博士学位论文.
- 周涛发,范裕,袁峰. 2008. 长江中下游成矿带成岩成矿作用研究进展. 岩石学报, 24(8): 1665~1678.
- 周涛发,范裕,袁峰,等. 安徽庐枞(庐江—枞阳)盆地火山岩的年代学及其意义. 2009, 中国科学: (D 辑), 38(11): 1342~1353.
- 周涛发,范裕,袁峰,宋传中,张乐骏,钱存超,陆三明, David RC. 2010. 庐枞盆地侵入岩的时空格架及其对成矿制约. 岩石学报, 26(9): 2694~2714.
- 周涛发,范裕,袁峰,张乐骏,马良,钱兵,谢杰. 2011. 长江中下游成矿带火山岩盆地的成岩成矿作用. 地质学报, 85(5): 712~730.
- 周涛发,王彪,范裕,袁峰,张乐骏,钟国雄. 2012. 庐枞盆地与 A 型花岗岩有关的磁铁矿—阳起石—磷灰石矿床——以马口铁矿床为例. 岩石学报, 28(10): 3087~3098.
- Bodnar R J. 1983. A method of calculating fluid inclusion volumes based of vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids. Economic Geology, 78: 535~542.
- Bouzari F, Clark A H. 2006. Prograde evolution and geothermal affinities of a major porphyry copper deposit: the cerro colorado hypogene protore, I region, northern Chile. Economic Geology, 101: 95~134.
- Diamond L W, Marshall D D, Jackman J A, Skippen G B. 1990. Elemental analysis of individual fluid inclusions in minerals by secondary ion mass spectrometry (SIMS): application to cation ratios of fluid inclusions in an Archaean mesothermal gold-quartz vein. Geochimica et Cosmochimica Acta, 54: 545~552.

Heinrich C A, Ryan C G, Mernagh T P, Eadington P J. 1992. Segregation of ore metals between magmatic brine and vapor: a fluid inclusion study using PIXE microanalysis. *Economic Geology*, 87: 1566~1583.

Mao J W, Xie G Q, Duan C, Pirajno F, Ishiyama D, Chen Y C. 2011. A tectono-genetic model for porphyry-skarn-stratabound Cu-Au-Mo-Fe and magnetite-apatite deposits along the Middle—Lower Yangtze River Valley, eastern China. *Ore Geology Reviews*, 43(1): 294~314.

Roedder. 1984. Fluid inclusions. In: Ribbe P H, ed. *Reviews in Mineralogy*. Washington: Mineralogical Society of America, 644.

Fluid Inclusion Studies of Deep Drilling ZK01, Luzong Basin

XIONG Xin¹⁾, XU Wenyi¹⁾, YANG Zhusen¹⁾, JIA Liqiong²⁾, LI Jun^{1, 2)}

1) *Key Laboratory of Metallogenetics and Mineral Resource Assessment, Institute of Mineral Resources, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*
2) *Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Beijing, 100037*

Abstract

Scientific deep drilling named ZK01 of Zhuanqiao lies in the centre of Luzong, and can be divided into 4 part including the Quaternary gravels (0~17 m), volcanic-sedimentary at Zhuanqiao Formation (17~1488 m), syenite (1488~1848 m) and monzonite (1848~2011. 95 m). Deep drilling named ZK01 conducted in Zhuanqiao of Luzong basin was discovered deep rocks syenite and monzonite associated with a large amount of uranium and thorium mineralization (1500~1900 m) while in the shallow, trachyandesites and diorite-prophyry associated with magnetite and pyrite mineralization (0~1470 m). According to the alteration and mineralization assemblage, mineralization can be divided into five stages, anhydrite-tourmaline veins at stage I, uranium-thorium mineralization at stage II, magnetite mineralization at stage III, sulfide-secondary quartzite at stage IV and quartz-calcite-sulfide at stage V. Three types of fluid inclusions including liquid-rich (I), gas-rich (II) and daughter mineral-bearing (III) fluid inclusions, respectively, have been observed. The daughter minerals mainly include halite and sylvite. The fluid inclusions of stage I are characterized by high temperatures (540~560℃ at peak) and low to high salinity (65%~70% NaCl eq and 0%~5% NaCl eq at peak). The fluid inclusions of stage II exhibit medium to high temperatures (320~340℃ at peak) and low to high salinity (0%~5% NaCl eq at peak). The fluid inclusions of stage III have medium temperatures (380~400℃ at peak) and medium to high salinity (0~5% NaCl eq at peak). The fluid inclusions of stage IV have medium temperatures (240~260℃ at peak) and medium to high salinity (0%~5% NaCl eq at peak). The fluid inclusions of stage V have medium temperatures (160~180℃ at peak) and medium to high salinity (0%~5% NaCl eq at peak). Fluid properties in deep drilling, are similar to other deposits in Luzong basin. It indicates that metallogenic fluid act as a part of the fluid in Luzong basin mineralization system. Boiling are occurred in fluid evolution repeatedly, which cause the change of physical and chemical state that change may be one of the major factors leading to migration and mineral precipitation.

Key words: Luzong basin; fluid inclusions; deep drilling; uranium and thorium mineralization