

编号: 0258-7106(2012)01-0065-18

江西相山矿田典型铀矿床流体包裹体特征及意义*

张树明^{1~4}, 曹寿孙^{1,4}, 曾文乐⁴, 饶泽煌¹, 谢国发⁴, 方欣², 张莹²,
王蕾², 张鑫³

(1 东华理工大学放射性地质与勘探技术国防重点学科实验室, 江西 抚州 344000; 2 核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地(东华理工大学), 江西 南昌 330013; 3 东华理工大学江西省数字国土重点实验室, 江西 抚州 344000; 4 江西省核工业地质局 261 大队, 江西 鹰潭 335001)

摘要 对江西相山铀矿田 3 个典型铀矿床邹家山、横涧和沙洲矿床铀矿石中的萤石矿物进行了系统流体包裹体研究。结果表明, 邹家山矿床 -130 m 标高和 206 m 标高流体包裹体的均一温度平均值为 266.1℃ 和 159.9℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 11.61% 和 13.16%, 密度为 0.88 g/cm³ 和 1.00 g/cm³, 均一温度与盐度之间呈抛物线型关系, 密度与均一温度为负相关, 而密度与盐度正相关。横涧矿床 -3 m 标高和 92 m 标高流体包裹体的均一温度平均值为 259.9℃ 和 291.7℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 13.45% 和 7.95%, 密度为 0.91 g/cm³ 和 0.79 g/cm³, 均一温度与盐度正相关, 密度与均一温度负相关, 与盐度关系不明显。沙洲矿床 -138 m 标高和 -98 m 标高流体包裹体的均一温度平均值为 297.3℃ 和 272.9℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 13.73% 和 11.62%, 密度为 0.86 g/cm³ 和 0.87 g/cm³, 均一温度与盐度之间规律性不明显, 密度与均一温度负相关, 与盐度之间关系不明显。计算获得邹家山矿床 -130 m 标高和 206 m 标高铀成矿平均深度是 860 m 和 550 m, 横涧矿床 -3 m 标高和 92 m 标高平均深度是 930 m 和 950 m, 沙洲矿床 -138 m 标高和 -98 m 标高平均深度为 578 m 和 537 m。与地表标高对比获得, 邹家山、沙洲和横涧铀矿床形成后的剥蚀程度分别在 320~416 m、190~240 m、727~902 m 之间。相山西北部地区的抬升剥蚀程度强于东南部地区, 显示东部和南部地区在深部有较好的找矿前景。

关键词 地球化学 流体包裹体 铀矿床 相山 江西

中图分类号 P619.14

文献标志码 A

Fluid inclusion characteristics of typical uranium deposits in Xiangshan orefield, Jiangxi Province

ZHANG ShuMing^{1~4}, CAO ShouSun^{1,4}, Zeng WenLe⁴, RAO ZeHuang¹, XIE GuoFa⁴,
FANG Xin², ZHANG Ying², WANG Lei² and ZHANG Xin³

(1 Key Laboratory of Radioactive Geology and Exploration Technology Fundamental Science for National Defense, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China; 2 State Key Laboratory Breeding Base of Nuclear Resources and Environment, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3 Digital Land Key Laboratory of Jiangxi Province, East China Institute of Technology, Fuzhou 344000, Jiangxi, China; 4 No. 261 Geological Party, Jiangxi Bureau of Geology for Nuclear Industry, Yingtan 335001, Jiangxi, China)

Abstract

Based on a study of the fluid inclusions in fluorite from the Zoujianshan, Hengjian and Shazhou uranium de-

* 本文得到国家自然科学基金项目(编号:41172079)、江西省数字国土重点实验室开放基金(编号:DLLJ201104)和江西省教育厅科研项目(编号:GJJ08307)的联合资助

第一作者简介 张树明,男,1965年生,博士,教授,主要从事铀矿床学和岩石学的科研与教学工作。Email: zsmfjxy@hotmail.com
收稿日期 2010-12-15; 改回日期 2011-10-14。秦思婷编辑。

posits in the Xiangshan uranium orefield of Jiangxi, the authors have drawn the conclusions as follows: In the Zoujiashan uranium deposit, the average homogenization temperatures of fluid inclusions are 266.1°C and 159.9°C at the elevations of -130 m and 206 m, the average salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ are 11.61% and 13.16%, and the mean densities of fluorite inclusions are 0.88 g/cm³ and 1.00 g/cm³, suggesting that the regularity of homogenization temperature and salinity is of the parabola type; the density and homogenization temperature are significantly of negative correlation, and the density and salinity are of positive correlation. In the Hengjian uranium deposit, the average homogenization temperatures of fluid inclusions at the elevations of -3 m and 92 m are 259.9°C and 291.7°C respectively, the average salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ are 13.45% and 7.95%, and the mean densities are 0.91 g/cm³ and 0.79 g/cm³. The density and homogenization temperature are obviously of negative correlation, and the density and salinity do not show obvious correlation. In the Shazhou uranium deposit, the average homogenization temperatures of fluid inclusions are 297.3°C and 272.9°C at the elevations of -138 m and -98 m, the average salinities $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ are 13.73% and 11.62%, and the mean densities of fluorite inclusions are 0.86 g/cm³ and 0.87 g/cm³, suggesting that the regularity of homogenization temperature and salinity is inconspicuous, the density and homogenization temperature are significantly of negative correlation, and the relationship between density and salinity is not obvious. In the Zoujiashan ore deposit, the average uranium metallogenic depths at the elevations of -130 m and 206 m are 860 m and 550 m, measured by the fluid inclusion method. In the Hengjian ore deposit, the average uranium metallogenic depths at the elevations of -3 m and 92 m are 930 m and 950 m. In the Shazhou ore deposit, the average uranium metallogenic depths at the elevations of -138 m and -98 m are 578 m and 537 m. A comparison with the surface elevation shows that the denudation depths after the formation of the Zoujiashan, Hengjian and Shazhou uranium deposits are respectively 320~416 m, 190~240 m, and 727~902 m. The extent of uplift and erosion in northwestern Xiangshan is more serious than that in southeastern Xiangshan area, and the deep areas of eastern and southern Xiangshan have favorable ore-search prospect.

Key words: geochemistry, fluid inclusion, uranium deposit, Xiangshan, Jiangxi

江西相山铀矿田是中国目前已发现最大的火山岩型铀矿田,对它的研究历经了半个多世纪,现已取得了丰硕的成果。已发现矿床集中分布在相山的北部和西部,形成了2个矿集带,在东部仅发现1个矿床(云际矿床),南部至今没有发现。研究表明,相山东部和南部地区具有同西、北部地区类似的成矿背景和成矿条件,理论上具备成大矿、富矿的条件。但是因已有矿床埋藏较深还未被发现(已有勘探深度均小于500 m),还是由于后期地壳运动的抬升使得已有矿床被剥蚀完毕殆尽,是目前众多学者研究的重点,也是困惑所在。相山矿田流体包裹体研究相对较薄弱,近几年才开始报道(王蕾等,2008;黄锡强等,2008;张树明等,2009),且多是针对某单一矿床进行的相关研究。本文选择相山铀矿田中3个典型铀矿床(西部邹家山矿床、北西部横涧矿床和北东部沙洲矿床)主成矿期与铀矿石共生的萤石矿物进行流体包裹体系统研究,综合探讨其流体包裹体特征,并在此基础上估算相山地区不同区域铀矿床中铀的

成矿深度和形成后遭受剥蚀(抬升)的程度,以期为相山东部、南部地区找矿提供参考。

1 区域地质背景

相山铀矿田地处江西乐安、崇仁两县交界处,位于赣杭构造带的西南端。控制矿田的是一个大型塌陷式火山盆地(图1),平面呈椭圆形,东西长约26.5 km,南北宽约16 km,面积约316 km²。火山盆地的基底主要为南华系-震旦系浅变质碎屑岩系,盖层由上侏罗统如意亭组和上侏罗统鹅湖岭组火山岩系组成。矿田内矿床、矿点众多,主要产于相山火山-侵入杂岩体的内部及外侧。按含矿主岩区分,矿田西部矿床多为熔岩脉型(如邹家山、居隆庵等),北部矿床则多为次火山岩型(如横涧、沙洲等),个别为爆发角砾岩筒型(如巴泉)。熔岩脉型的含矿主岩主要是碎斑熔岩和流纹英安(斑)岩,次火山岩型的含矿主岩除花岗斑岩外,还有变质岩和紫红色粉砂岩等围

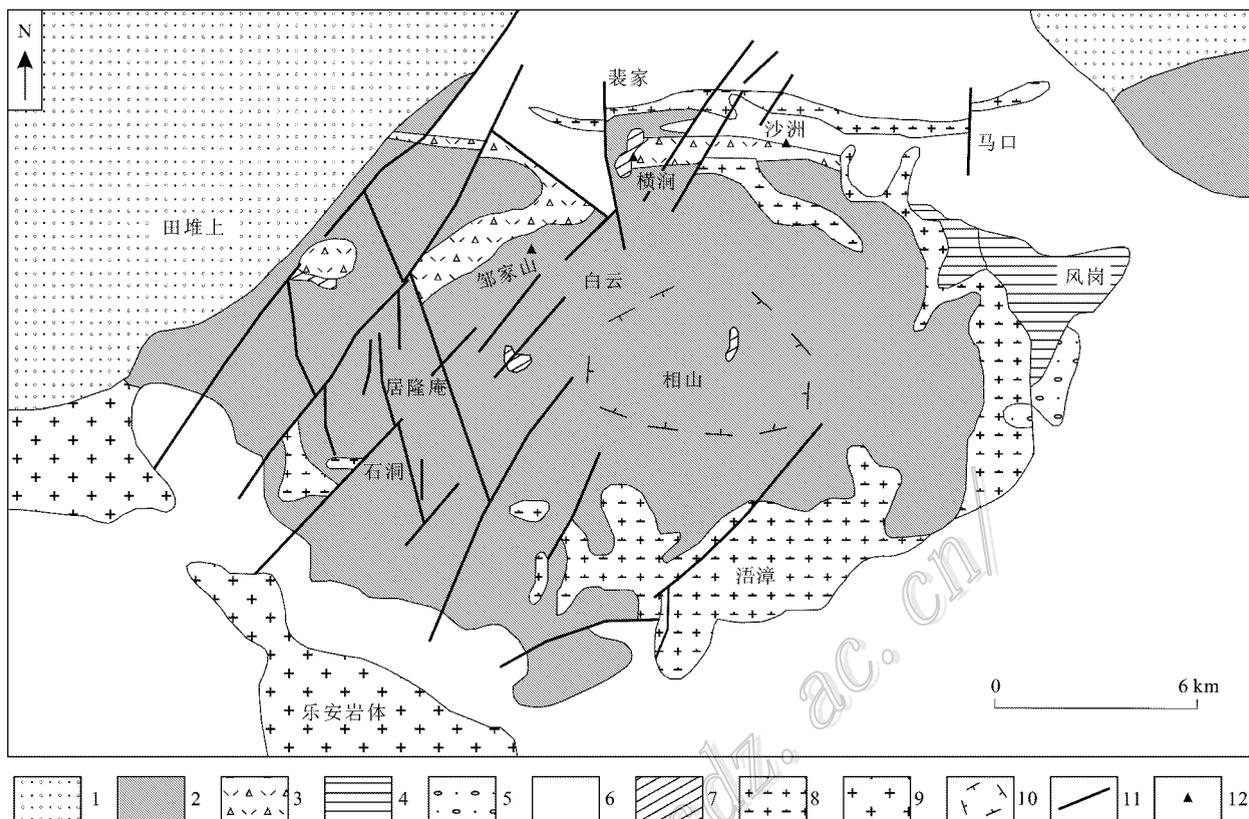


图 1 相山火山-侵入杂岩地质略图

1—上白垩统砂砾岩；2—上侏罗统鹅湖岭组碎斑熔岩；3—上侏罗统如意亭组（火山）碎屑岩、流纹英安岩；4—上三叠统安源组砂（砾）岩；5—下石炭统黄龙组砂（砾）岩；6—下元古界变质岩；7—次花岗斑岩；8—次斑状花岗闪长岩；9—花岗岩；10—火山颈（推测）；11—断裂；12—取样位置

Fig. 1 Geological sketch map of Xiangshan volcanic-intrusive complex

1—Upper Cretaceous sandy conglomerate；2—Porphyroclastic lava of Upper Jurassic Ehuling Formation；3—Pyroclastic rock, rhyodacite of Upper Jurassic Ruyiting Formation；4—Sandy conglomerate of Upper Triassic Anyuan Formation；5—Sandy conglomerate of Upper Carboniferous Huanglong Formation；6—Lower Proterozoic metamorphic rock；7—Subgranite porphyry；8—Subporphyritic granodiorite；9—Granite；10—Inferred volcanic neck；11—Fault；12—Sampling location

岩相山花岗斑岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄为 135.4 Ma(陈小明等,1999)。

2 矿床地质特征

2.1 邹家山矿床

邹家山矿床位于相山矿田西部,邹家山-石洞断裂带的中段,是矿田内最大的铀钍混合型矿床。矿区内地层出露简单,主要以上侏罗统鹅湖岭组碎斑熔岩为主,外围有中元古界基底黑云母石英片岩,上侏罗统如意亭组砂岩、砂砾岩夹杂熔结凝灰岩、流纹英安岩等。矿床内断裂构造主要是 NE 向的邹-石断裂,该断裂带全长约 10 km,宽 200~300 m,由一系

列平行的裂隙带组成,主断裂走向为 30~60°,倾向 NW,倾角 70~80°。

矿体主要分布在上侏罗统如意亭组流纹英安(斑)岩内外接触带和断裂构造通过的碎斑熔岩中,形态多呈脉状、细脉状和群脉状(图 2)。其组成在相山矿田所有的矿床中最为复杂,按矿物共生关系可归为 3 类:沥青铀矿-钠长石-磷灰石、沥青铀矿-萤石和沥青铀矿-钽铀矿-钍钍石-水云母,它们依次代表了 3 个成矿阶段。围岩蚀变分带明显,由中心向两侧依次为萤石带、红化带、水云母带、灰色蚀变带,即早期灰色蚀变范围最宽,其次是水云母化和红化蚀变,萤石化为最晚阶段的蚀变。

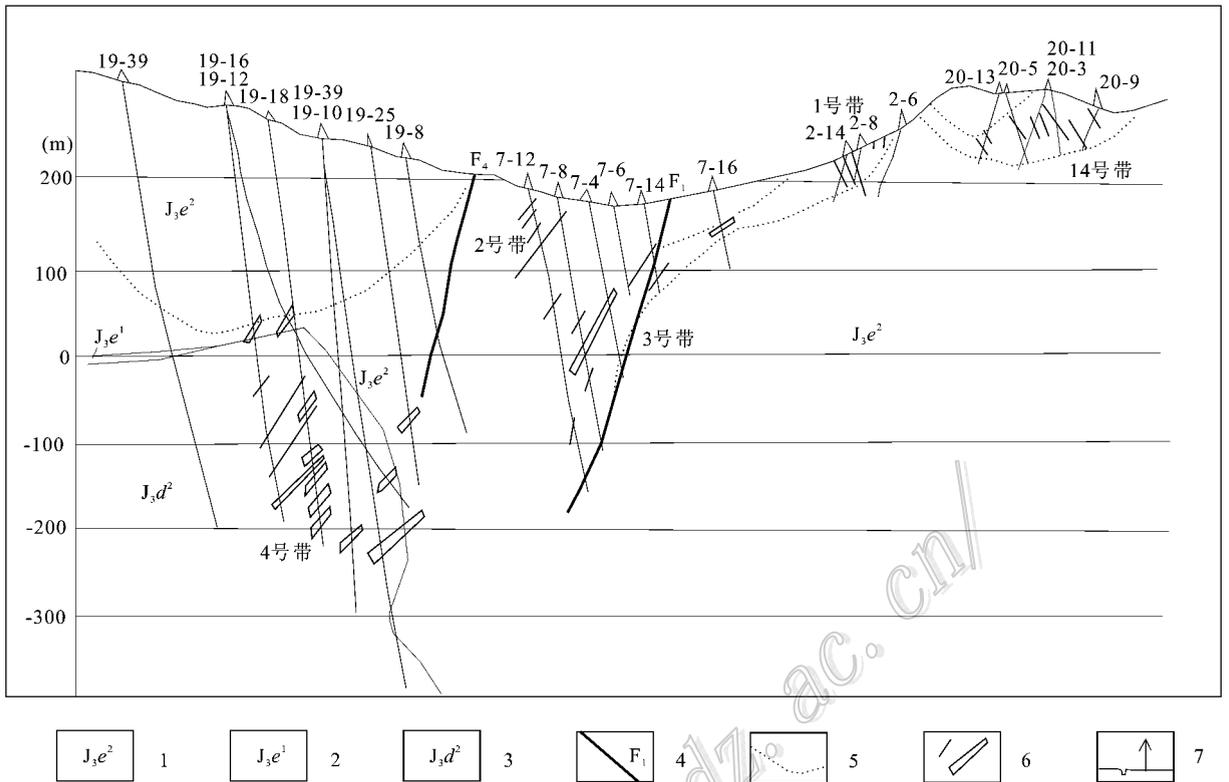


图2 邹家山矿床综合剖面图(据沈锋等,1995)

1—上侏罗统碎斑熔岩;2—上侏罗统爆发碎屑岩;3—上侏罗统流纹英安岩(含流纹英安斑岩);4—断裂构造;5—灰色蚀变带线;6—矿体;7—钻孔及编号

Fig. 2 Composite geological section of the Zoujiashan ore deposit(after Shen et al., 1995)

1—Upper Jurassic porphyroclastic lava;2—Upper Jurassic explosive clastic rock;3—Upper Jurassic rhyodacite;4—Faulted structure;5—Gray alteration zone line;6—Ore body;7—Drill hole and its serial number

2.2 横涧矿床

横涧矿床位于相山火山盆地北缘,邹家山-石洞断裂带北东段,与邹家山矿床同属铀-钍-钼-磷-稀土元素建造,也是铀钍型矿床。其中心部位发育沿邹石断裂侵入的花岗斑岩体,花岗斑岩地表出露南北长约1 500 m、东西宽约210 m,其形态沿走向自北向南由NE向转为EW向,西侧与变质岩接触,东侧与如意亭组砂岩、砂砾岩相邻,局部有英安玢岩岩脉(图3)。

矿体受裂隙构造控制明显,呈脉状、群脉状,产状陡倾。与裂隙带及斑岩体的展布类似,矿体走向自北向南由NE向逐渐转为近EW向再转为NE向。单个矿体一般规模小,长度较短、厚度较薄,但由于矿体成群出现,呈现的总体规模较大。矿床的铀平均品位为0.1%~0.2%。矿石矿物以沥青铀矿为主,钍铀矿和铀钍石次之,其他金属矿物常见有辉钼矿、黄铁矿、赤铁矿及少量方铅矿和闪锌矿,脉石矿物主要是萤石、

水云母、钠长石、方解石、绿泥石和磷灰石等。

2.3 沙洲矿床

沙洲矿床位于相山火山盆地东北角,主要产于沙洲花岗(斑)岩体内部。矿区内出露的岩性较为简单,包括有基底变质岩、花岗斑岩、如意亭组凝灰岩及流纹英安岩、鹅湖岭组碎斑熔岩(图4A)。花岗斑岩体呈近东西向展布,受控于芜头-中华山基底断裂、火山环状断裂和推覆体构造,侵位于基底变质岩之中。

已采铀矿体均分布在花岗斑岩内,矿体严格受控于一系列走向280~330°、倾向南西、倾角60~80°的平行裂隙带(图4B)。铀矿的物质成分较复杂,除铀矿化外,还有铅、锌、银等多种金属矿化。矿床东部主要金属矿物有沥青铀矿、方铅矿、闪锌矿和黄铁矿,次要矿物有黄铜矿、辉钼矿、赤铁矿、磁铁矿等,非金属矿物以方解石、铁锰白云石、白云石、钠长石和磷灰石为主,铀矿物与方解石关系密切;矿床西部的工业铀矿也主要是沥青铀矿,但方铅矿和闪锌

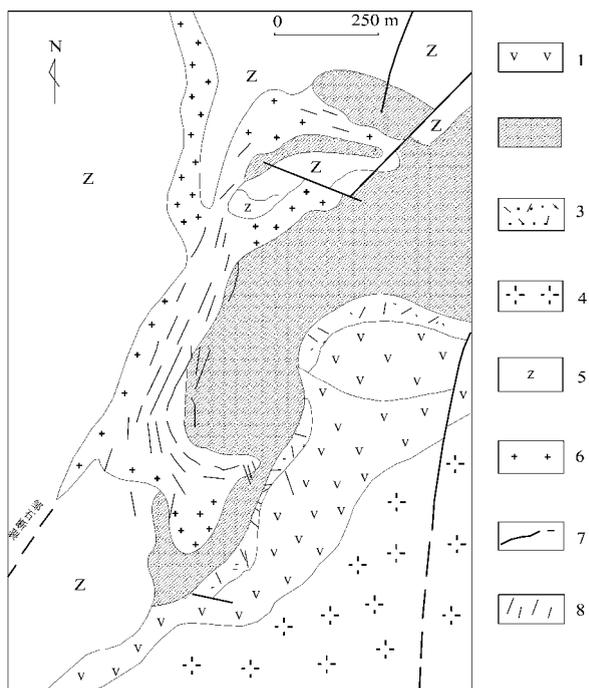


图 3 横涧矿床地质构造与矿化示意图

1—上侏罗统如意亭组流纹英安斑岩、流纹英安岩;2—上侏罗统如意亭组砂岩、砾岩及含砾砂岩;3—上侏罗统如意亭组砂岩、砾岩及晶玻凝灰岩;4—上侏罗统鹅湖岭组碎斑熔岩;5—震旦系基底变质岩;6—白垩纪花岗岩斑岩;7—断裂;8—铀矿体

Fig. 3 Schematic map of geological structure and mineralization of the Hengjian ore deposit

1—Rhyodacite of Upper Jurassic Ruyiting Formation; 2—Sandstone, conglomerate and pebbly sandstone of Upper Jurassic Ruyiting Formation; 3—Sandstone, conglomerate and crystal-vitric tuff of Upper Jurassic Ruyiting Formation; 4—Porphyroclastic lava of Upper Jurassic Ehuling Formation; 5—Sinian basement metamorphic rock; 6—Cretaceous granite-porphry; 7—Fault; 8—Uranium ore body

矿含量明显减少,主要非金属矿物为萤石、水云母和磷灰石。矿床矿化蚀变发育、分带明显,中心为强萤石化(含矿),两侧依次为碳酸盐化和绿泥石化。

3 流体包裹体测试与结果

本次研究的样品分别采自邹家山矿床、横涧矿床和沙洲矿床,具体采样位置和样品岩性描述见表 1、表 2 和表 3。包裹体的测试是在东华理工大学核资源与环境省部共建国家重点实验室培育基地完成。测试仪器为英国 Linkam THMSG600 型冷热台,测温范围为 $-196 \sim 600^{\circ}\text{C}$ 。均一法测定均一温度,冷冻法测定冰点,具体测试方法和原理参见卢焕

章等(2004)。

样品中气-液两相包裹体为 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系,由冷热台测定获得冰点和均一温度,包裹体密度是利用 Bischoff(1991) $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系 $T-\rho$ 相图求得,包裹体盐度则是通过 Hall 等(1988)的 $\text{NaCl-H}_2\text{O}$ 体系盐度-冰点公式 $W = 0.00 + 1.78 T_m - 0.0442 T_m^2 + 0.000557 T_m^3$ (W 为 NaCl 的质量分数, T_m 为冰点温度)获得。

3.1 测试结果

本次研究共测得流体包裹体数据邹家山矿床 49 组(表 1)、横涧矿床 57 组(表 2)、沙洲矿床 42 组(表 3),各矿床流体包裹体参数变化范围及平均值见表 4。

3.2 流体包裹体岩相学

测试的包裹体均为萤石中的原生包裹体,包裹体与萤石晶体为同期生长,其均一温度与萤石的结晶温度相近(卢焕章等,2004),且萤石矿物与铀成矿关系密切,故所测温度可作为推测铀成矿温度的依据。

3.2.1 邹家山矿床(图 5)

-130 m 标高:气-液两相原生包裹体,气相分数 5%~35%,均值 25%左右,偶见含石盐(固相)包裹体,包裹体多呈六边形或椭圆形, $5 \sim 8.3 \mu\text{m}$,均值 $7 \mu\text{m}$ 左右,包裹体分布较为集中,规律性不强,多不规则分布,偶见条带状分布。

206 m 标高:气-液两相原生包裹体,气相分数 3%~8%,均值 5%左右,未见含固相包裹体,包裹体形态各异,有椭圆形、长条形等,大小一般在 $8 \sim 10 \mu\text{m}$,包裹体较为集中,分布规律性不强,偶见条带状分布。

3.2.2 横涧矿床(图 6)

-3 m 标高:气-液两相原生包裹体,气相分数变化较大,10%~30%,均值 20%左右,未见含固相包裹体,包裹体形态多呈不规则四边形或椭圆形,大小较均一,多在 $6 \sim 8 \mu\text{m}$,包裹体分布较集中,分布有一定的规律,部分呈环带状。

92 m 标高:气-液两相原生包裹体,气相分数均值 10%左右,未见含固相包裹体,气泡呈深紫色,包裹体形态多呈椭圆状, $5 \sim 7 \mu\text{m}$,包裹体较为集中,丰度约为 0.03‰。

3.2.3 沙洲矿床(图 7)

-138 m 标高:气-液两相原生包裹体,包裹体气

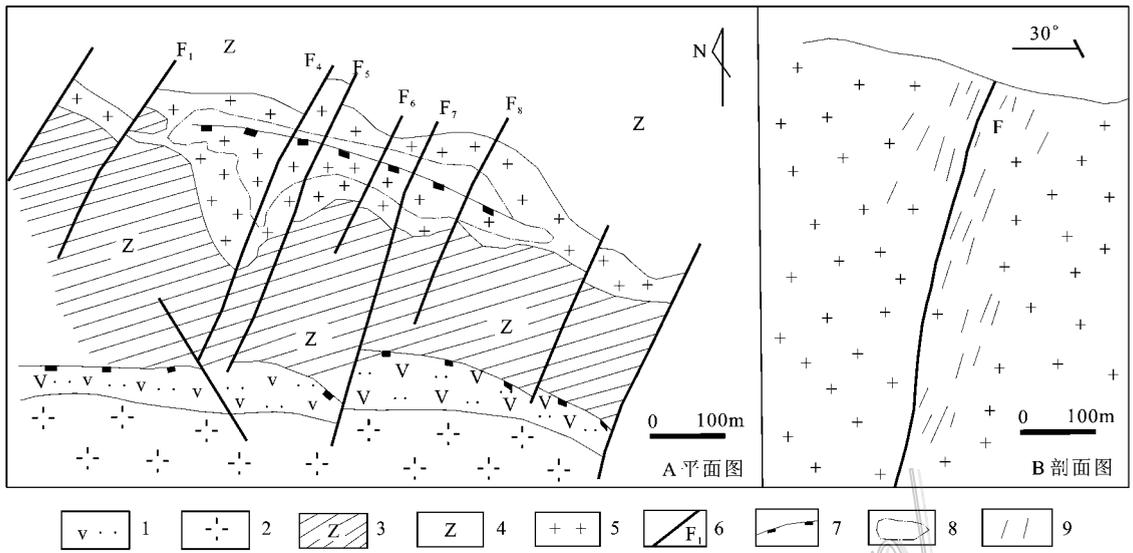


图4 沙洲矿床地质构造与矿化示意图

1—上侏罗统如意亭组凝灰岩及流纹英安岩；2—上侏罗统鹅湖岭组碎斑熔岩；3—变质岩推覆体；4—震旦系基底变质岩；
5—白垩纪花岗岩斑岩；6—断裂构造；7—火山环状断裂；8—钻孔见矿范围；9—铀矿体

Fig. 4 Geological structure and mineralization sketch map of the Shazhou ore deposit

1—Tuff and rhyodacite of Upper Jurassic Ruyiting Formation；2—Porphyroclastic lava of Upper Jurassic Ehuling Formation；3—Metamorphic rock nappe；4—Sinian basement metamorphic rock；5—Cretaceous granite-porphry；6—Faulted structure；7—Volcanic ring fracture；
8—Ore intersected by drill hole；9—Uranium ore body

表1 邹家山矿床流体包裹体测试数据与处理结果

Table 1 Analytical data and processing results of fluid inclusions from the Zoujiashan ore deposit

样号及岩性 和样品位置	包裹体特征		冰点/°C	均一温度/°C	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	密度/(g/cm ³)	深度/m
	类型	大小/ μm 气相分数/%					
ZJS-05 弱蚀变碎斑熔岩 A号带-130 m中段							
1	V-L	8	5	—	165.9	—	—
2	V-L	7	5	—	190.5	—	—
3	V-L	6	5	—	178.6	—	—
4	V-L	15	8	—	192.7	—	—
5	V-L	6	4	-6.3	132.9	9.60	0.99
6	V-L	8	5	—	179.1	—	—
ZJS-06 矿化碎斑熔岩 邹家山露天采场 206 m 标高							
7	V-L	12	2	-12.0	115.7	15.96	1.06
8	V-L	5	3	-10.0	136.4	13.94	1.03
9	V-L	6	3	-9.3	115.1	13.18	1.04
10	V-L	6	4	-9.7	157.4	13.62	1.01
11	V-L	8	5	—	163.5	—	—
12	V-L	5	7	-6.9	196.8	10.36	0.94
13	V-L	15	2	-15.6	154.4	19.13	1.05
14	V-L	7	6	-6.5	186.9	9.86	0.95
15	V-L	8	6	-7.6	194.2	11.22	0.96
ZJS-07 矿化碎斑熔岩 邹家山露天采场 206 m 标高							
16	V-L	10	4	-8.0	129.9	11.70	1.01

续表 1
Cont. Table 1

样号及岩性 和样品位置	包裹体特征			冰点/℃	均一温度/℃	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	密度/(g/cm ³)	深度/m
	类型	大小/ μm	气相分数/%					
17	V-L	12	4	-9.2	154.5	13.07	1.00	32
18	V-L	8	6	-4.3	168.3	6.88	0.95	50
19	V-L	11	10	—	202.8	—	—	—
20	V-L	11	8	—	188.2	—	—	—
21	V-L	12	3	-6.8	92.4	10.24	1.03	3
22	V-L	10	7	-1.5	129.7	2.57	0.96	17
23	V-L	7	8	-6.4	213.5	9.73	0.93	220
24	V-L	8	6	-9.8	192.3	13.72	0.96	150
25	V-L	14	3	-8.4	129.1	12.16	1.02	14
26	V-L	8	3	-9.7	138.5	13.62	1.02	21
27	V-L	10	2	-12.3	113.6	16.24	1.06	4
28	V-L	10	5	—	163.8	—	—	—
29	V-L	7	2	-16.7	136.4	19.99	1.07	17
30	V-L	6	8	-18.2	223.3	21.11	0.98	210
31	V-L	7	4	-14.3	199.7	18.04	1.00	150
ZJS-09 矿化碎斑熔岩 A 号带 - 130 m 中段								
32	V-L	5	8	-5.5	193.9	8.55	0.93	160
33	V-L	7	10	-14.3	237.1	18.04	0.97	300
34	V-L	5	35	-7.9	367.6	11.58	0.76	—
ZJS-11 矿化碎斑熔岩 A 号带 - 130 m 中段								
35	V-L	7	40	—	311.7	—	—	—
36	V-L	6	35	—	323.8	—	—	—
37	V-L	7	35	-9.6	370.9	13.51	0.75	—
38	V-L	14	13	-7.8	247.3	11.46	0.90	380
39	V-L	10	40	-10.4	418.3	14.36	—	—
40	V-L	7	35	-6.4	278.6	9.73	—	660
41	V-L	5	35	-6.9	356.1	10.36	0.75	—
42	V-L	7	30	-10.7	342.8	14.67	0.81	1400
43	V-L	6	5	-16.7	241.3	19.99	0.98	280
44	V-L	5	15	-8.4	265.2	12.16	0.88	500
45	V-L	5	13	-7.4	253.7	10.98	0.90	420
46	V-L	8	15	-6.0	248.9	9.21	0.89	400
47	V-L	3	20	-4.9	266.9	7.73	0.84	540
48	V-L	5	30	-5.2	307.9	8.14	0.78	980
49	V-L	3	35	-4.6	314.8	7.31	0.75	1150

表2 横涧矿床流体包裹体测试数据与处理结果

Table 2 Analytical data and processing results of fluid inclusions from the Hengjian ore deposit

样号及岩性和样品位置	包裹体特征			冰点/°C	均一温度/°C	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	密度/(g/cm ³)	深度/m
	类型	大小/ μm	气相分数/%					
SN-03 矿化花岗斑岩 2号井-3m中段24号穿脉之2号沿脉								
1	V-L	9	30	—	245.1	—	—	—
2	V-L	6	35	—	367.8	—	—	—
3	V-L	5	35	—	351.4	—	—	—
4	V-L	3	30	—	279.3	—	—	—
5	V-L	7	10	-7.8	233.4	11.46	0.91	300
6	V-L	3	6	-4.4	188.3	7.02	0.95	120
7	V-L	3	15	-11.1	329.7	15.07	0.84	1240
8	V-L	5	35	-10.9	371.4	14.87	0.75	1420
9	V-L	5	6	-6.1	210.2	9.34	0.94	200
10	V-L	6	45	-7.6	425.7	11.22	0.64	—
11	V-L	6	5	-8.3	183.7	12.05	0.96	100
12	V-L	10	4	-8.7	178.4	12.51	0.98	90
13	V-L	3	10	-5.6	234.7	8.68	0.90	320
14	V-L	4	15	-7.5	295.1	11.10	0.85	900
15	V-L	6	14	-8.1	287.8	11.81	0.86	750
SN-05 弱蚀变花岗斑岩 2号井-3m中段24号穿脉之2号沿脉								
16	V-L	8	5	—	—	—	0.96	—
17	V-L	6	6	-8.8	196.8	12.62	0.95	150
18	V-L	7	12	-7.4	274.4	10.98	0.88	600
19	V-L	5	3	-13.2	204.9	17.08	1.00	150
20	V-L	9	10	-10.2	273.1	14.15	0.90	580
21	V-L	7	5	-10.9	225.9	14.87	0.95	250
22	V-L	6	6	-9.7	235.5	13.62	0.94	300
23	V-L	7	10	-7.0	258.6	10.49	0.90	480
24	V-L	11	12	-10.2	293.8	14.15	0.86	780
25	V-L	7	6	-10.0	239.6	13.94	0.94	320
26	V-L	5	3	-15.4	213.5	18.96	1.00	200
27	V-L	3	6	-13.2	278.4	17.08	0.93	620
28	V-L	5	4	-15.2	227.7	18.80	0.97	240
29	V-L	6	5	-12.7	277.3	16.62	0.95	580
30	V-L	8	11	-13.0	298.1	16.89	0.89	810
SN-06 弱蚀变花岗斑岩 2号井-3m中段44号穿脉								
31	V-L	6	5	-15.1	261.7	18.72	0.95	450
32	V-L	7	6	-11.4	248.2	15.37	0.94	360
33	V-L	6	11	-9.7	287.4	13.62	0.89	700
34	V-L	8	10	-12.3	279.1	16.24	0.91	590
35	V-L	6	6	-7.9	228.7	11.58	0.94	280
36	V-L	7	11	-5.6	253.4	8.68	0.88	480
37	V-L	6	5	-10.8	220.5	14.77	0.96	220
38	V-L	10	11	-9.2	288.8	13.07	0.88	740
39	V-L	6	5	-6.4	186.9	9.73	0.95	120
40	V-L	6	6	-5.9	205.4	9.08	0.94	150
41	V-L	8	5	-7.7	221.4	11.34	0.96	280
42	V-L	12	10	—	250.7	—	—	—
43	V-L	11	20	—	245.0	—	—	—
44	V-L	7	5	-12.8	225.1	16.71	0.96	260
45	V-L	10	10	—	311.6	—	—	—
46	V-L	7	4	-14.9	239.2	18.55	0.97	320
47	V-L	8	15	-9.5	318.3	13.40	0.84	1010
48	V-L	10	20	-7.3	311.8	10.86	0.81	1000
SN-07 矿化花岗斑岩 山南露天采场 92m标高								
49	V-L	9	7	—	—	—	0.93	—
50	V-L	7	32	-8.4	361.8	12.16	0.75	—
51	V-L	4	10	-5.0	396.3	7.86	—	—
52	V-L	5	46	-6.6	289.7	9.98	0.64	830
53	V-L	5	13	-3.9	252.8	6.30	0.86	420
54	V-L	5	10	—	251.4	—	—	—
55	V-L	6	15	-3.5	263.0	5.71	0.84	580
56	V-L	7	35	-3.0	325.9	4.96	0.72	1420
57	V-L	5	10	—	287.2	—	—	—

表 3 沙洲矿床流体包裹体测试数据与处理结果

Table 3 Analytical data and processing results of fluid inclusions from the Shazhou ore deposit

样号及岩性 和样品位置	包裹体特征			冰点/℃	均一温度/℃	$w(\text{NaCl}_{\text{eq}})/\%$	密度/(g/cm^3)	深度/m
	类型	大小/ μm	气相分数/%					
SZ-1-2 绢云母化花岗斑岩, -138 m 中段 7 号穿脉之 5 号沿脉								
1	V-L	4	2	-9.9	353.7	13.83	0.80	—
2	V-L	6	25	-12.4	392.3	16.34	0.78	—
3	V-L	3	12	-8.4	280.9	12.16	0.86	600
4	V-L	5	8	-15.8	328.9	19.29	0.90	1175
SZ-2 绢云母化花岗斑岩, -138 m 中段 7 号穿脉之 5 号沿脉								
5	V-L	4	5	—	—	—	0.96	—
6	V-L	7	8	-14.2	292.4	17.96	0.92	730
7	V-L	5	30	-5.6	325.9	8.68	0.77	1425
8	V-L	1	3	-7.8	340.2	11.46	0.78	—
9	V-L	7	35	-8.0	387.5	11.70	0.71	—
10	V-L	5	5	-13.9	248.1	17.70	0.96	325
11	V-L	3	35	-8.7	404.9	12.51	0.72	—
12	V-L	8	16	-7.2	307.2	10.73	0.83	1000
13	V-L	5	3	-17.4	216.4	20.52	1.01	170
14	V-L	7	20	-16.2	401.3	19.60	0.81	—
15	V-L	10	12	-4.3	232.2	6.88	0.86	325
16	V-L	6	5	-6.0	151.1	9.21	0.97	38
17	V-L	4	10	-10.7	255.1	14.67	0.91	450
18	V-L	8	16	-6.2	289.3	9.47	0.83	820
19	V-L	8	6	-7.2	208.1	10.73	0.95	180
SZ-3-1 矿化花岗斑岩, -98 m 中段 1 号穿脉之 1 号沿脉								
20	V-L	4	10	-3.7	185.9	6.01	0.92	120
21	V-L	5	8	—	218.3	—	—	—
22	V-L	4	4	-7.7	174.7	11.34	0.98	50
23	V-L	5	10	—	162.4	—	—	—
24	V-L	8	10	—	206.9	—	—	—
25	V-L	6	8	-4.8	191.3	7.59	0.93	170
SZ-4 绢云母化花岗斑岩, -98 m 中段 1 号穿脉之 1 号沿脉								
26	V-L	12	30	-5.7	334.9	8.81	0.78	—
27	V-L	5	10	-10.6	272.4	14.57	0.91	550
28	V-L	6	35	-8.8	388.2	12.62	0.76	—
29	V-L	8	45	-5.1	392.5	8.00	0.66	—
30	V-L	10	10	-9.7	283.4	13.62	0.87	675
31	V-L	7	12	-13.4	343.2	17.26	0.85	—
32	V-L	5	10	-8.4	276.3	12.16	0.88	610
33	V-L	5	5	-11.7	234.1	15.67	0.96	325
34	V-L	7	15	-3.4	275.4	5.41	0.82	680
35	V-L	7	12	-7.1	301.2	10.61	0.84	925
36	V-L	6	25	—	319.1	—	—	—
37	V-L	5	10	—	358.7	—	—	—
38	V-L	6	12	-8.3	295.3	12.05	0.85	880
39	V-L	5	13	-7.0	300.7	10.49	0.84	975
40	V-L	6	4	-7.5	178.1	11.10	0.97	90
41	V-L	7	8	-11.7	279.5	15.67	0.92	610
42	V-L	6	10	-12.2	303.8	16.15	0.89	860

表4 流体包裹体密度、均一温度、盐度和形成深度的范围和平均值

Table 4 Ranges and average values of density, homogenization temperature, salinity and depth

样号	标高/m	包裹体数	密度/(g/cm ³)		均一温度/℃		$\alpha(\text{NaCl}_{\text{eq}})\%$		形成深度/m	
			区间	均值	区间	均值	区间	均值	区间	均值
邹家山矿床										
ZJS-05	-130	6	0.99	0.99	132.9~192.7	173.3	9.60	9.60	18	18
ZJS-09	-130	3	0.76~0.97	0.89	193.9~367.6	266.2	8.55~18.04	12.72	110~1280	230
ZJS-11	-130	15	0.75~0.98	0.84	241.3~418.3	303.2	7.31~19.99	11.51	160~300	671
ZJS-06	206	9	0.94~1.06	1.01	115.1~196.8	157.8	9.86~19.13	13.41	6~100	58
ZJS-07	206	16	0.93~1.06	1.00	92.4~223.3	161.0	2.57~21.11	13.01	8~200	69
横涧矿床										
SN-03	-3	15	0.75~0.98	0.87	178.4~425.7	278.8	7.02~15.07	11.38	50~1420	534
SN-05	-3	15	0.86~1.00	0.93	196.8~298.1	247.4	10.48~18.96	14.96	110~900	389
SN-06	-3	18	0.81~0.97	0.92	186.9~318.3	254.6	8.68~18.72	13.45	100~1100	444
SN-07	92	9	0.64~0.93	0.79	197.5~396.3	291.7	4.96~12.16	7.95	100~1450	767
沙洲矿床										
SZ-1-2	-138	4	0.78~0.90	0.84	280.9~392.3	339.0	12.16~19.29	15.41	600~1175	888
SZ-2	-138	15	0.71~1.01	0.87	151.1~404.9	286.2	6.88~20.52	13.28	38~1425	522
SZ-3-1	-98	6	0.92~0.98	0.94	162.4~218.3	189.9	6.01~11.34	8.31	50~170	113
SZ-4	-98	17	0.66~0.97	0.85	178.1~392.5	302.2	5.41~17.26	12.28	90~975	653

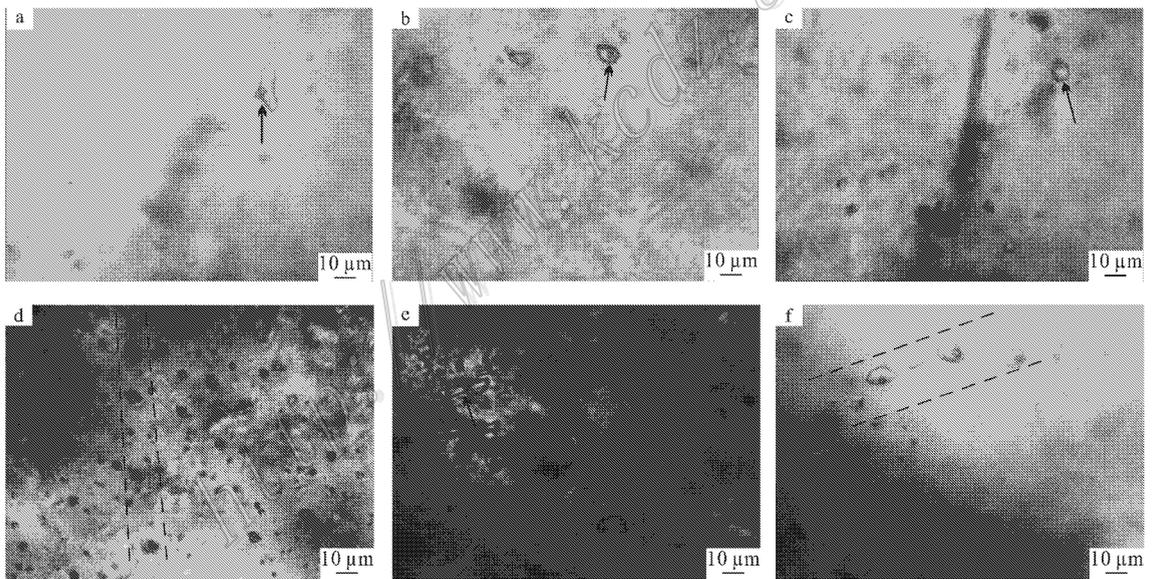


图5 邹家山矿床包裹体显微照片

a. ZJS-05 原生气-液包裹体; b. ZJS-09 原生气-液包裹体; c. ZJS-09 含石盐矿物的包裹体; d. ZJS-11 裂隙中呈条带状分布的包裹体; e. ZJS-06 原生气-液包裹体; f. ZJS-07 裂隙中呈条带状分布的包裹体

Fig. 5 Inclusion microphotographs of the Zoujiashan ore deposit

a. ZJS-05 primary gas-liquid inclusion; b. ZJS-09 primary gas-liquid inclusion; c. ZJS-09 halite-bearing inclusion; d. ZJS-11 banded inclusion in fissure; e. ZJS-06 primary gas-liquid inclusion; f. ZJS-07 banded inclusion in fissure

相分数均值 20% 左右, 未见含固相包裹体, 包裹体多为不规则状, 3~8 μm, 均值 6 μm 左右。

-98 m 标高: 气-液两相原生包裹体, 气相分数

3%~45%, 未见含固相包裹体, 包裹体的形态各异, 有椭圆形、四边形和不规则状等, 大小在 5~7 μm, 均值 6 μm 左右, 包裹体不规则状分布, 且较分散。

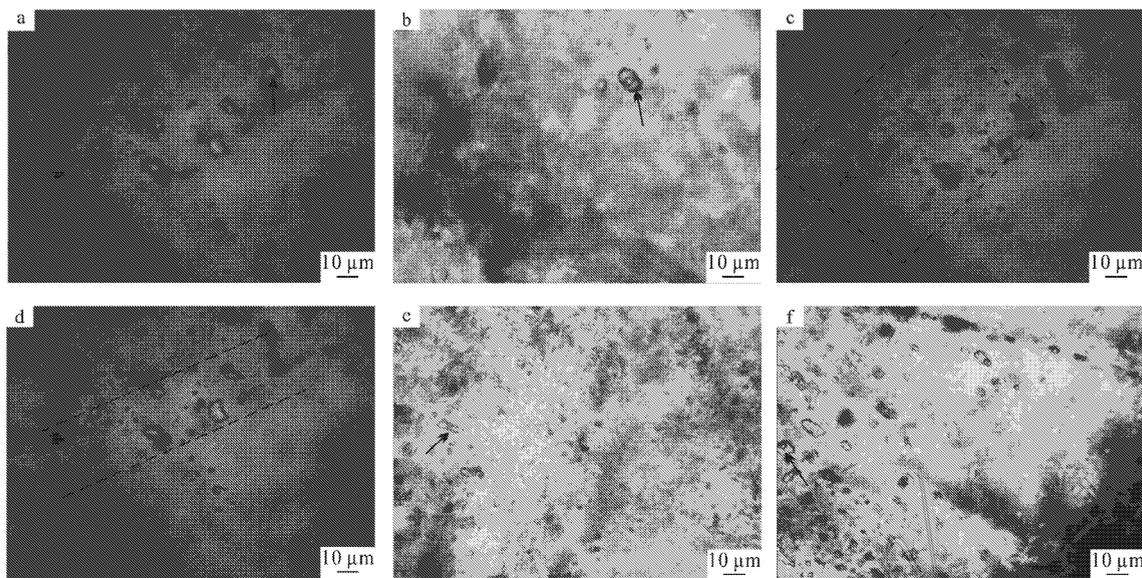


图 6 横涧矿床包裹体显微照片

a. SN-02 原生气-液包裹体 ; b. SN-03 原生气-液包裹体 ; c. SN-02 裂隙中呈环带状分布的包裹体 ; d. SN-06 裂隙中呈条带状分布的包裹体 ; e. SN-07 原生气-液包裹体 ; f. SN-07 原生气-液包裹体

Fig. 6 Inclusion microphotographs of the Hengjian ore deposit

a. SN-02 primary gas-liquid inclusion ; b. SN-03 primary gas-liquid inclusion ; c. SN-02 girdle inclusion in fissure ; d. SN-06 banded inclusion in fissure ; e. SN-07 primary gas-liquid inclusion ; f. SN-07 primary gas-liquid inclusion

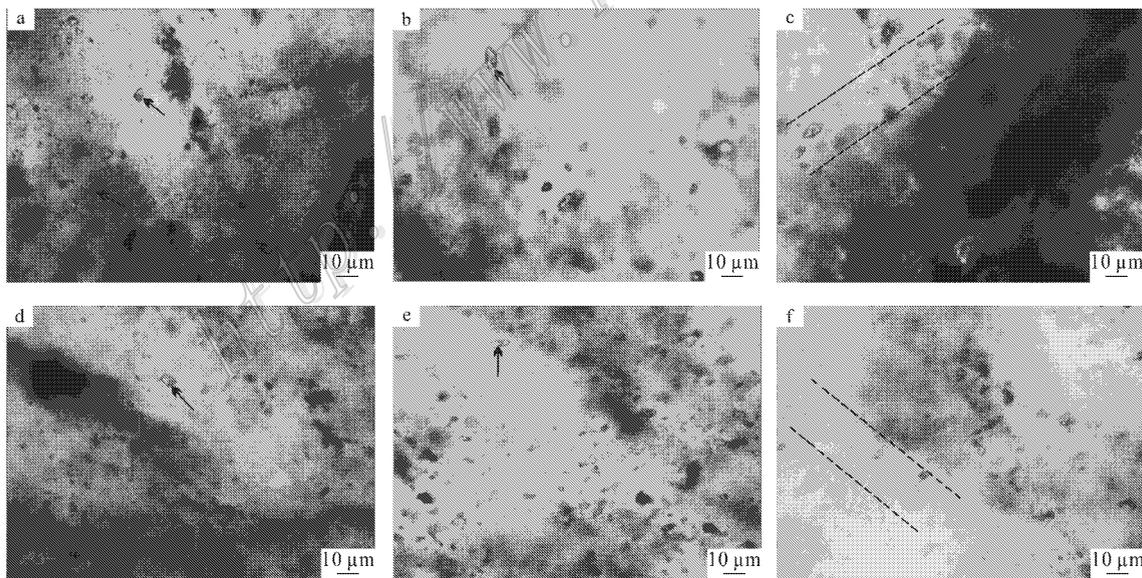


图 7 沙洲矿床包裹体显微照片

a. SZ-1-2 原生气-液包裹体 ; b. SZ-2 原生气-液包裹体 ; c. SZ-2 裂隙中呈条带状分布的气-液包裹体 ; d. SZ-3-1 原生气-液包裹体 ; e. SZ-4 原生气-液包裹体 ; f. SZ-4 裂隙中呈条带状分布的气-液包裹体

Fig. 7 Inclusion microphotographs of the Shazhou ore deposit

a. SZ-1-2 primary gas-liquid inclusion ; b. SZ-2 primary gas-liquid inclusion ; c. SZ-2 banded gas-liquid inclusion in fissure ; d. SZ-3-1 primary gas-liquid inclusion ; e. SZ-4 primary gas-liquid inclusion ; f. SZ-4 banded gas-liquid inclusion in fissure

4 测试结果讨论

4.1 流体包裹体均一温度、盐度和密度基本特征

由表1~表4可知:

邹家山矿床: -130 m 标高均一温度 132.9~418.3℃, 均值 266.1℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 7.31%~19.99%, 均值 11.61%, 密度 0.75~0.99 g/cm³, 均值 0.88 g/cm³; 206 m 标高均一温度 92.4~223.3℃, 均值 159.9℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 2.57%~21.11%, 均值 13.16%, 密度 0.93~1.06 g/cm³, 均值 1.00 g/cm³。

横涧矿床: -3 m 标高均一温度 178.4~425.7℃, 均值 259.9℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 7.02%~18.96%, 均值 13.45%, 密度 0.75~1.00 g/cm³, 均值 0.91 g/cm³; 92 m 标高均一温度 197.5~396.3℃, 均值 291.7℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 4.96%~12.16%, 均值 7.95%, 密度 0.64~0.93 g/cm³, 均值 0.79 g/cm³。

沙洲矿床: -138 m 标高均一温度 151.1~404.9℃, 均值 297.3℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 6.88%~20.52%, 均值 13.73%, 密度 0.71~1.01 g/cm³, 均值 0.86 g/cm³; -98 m 标高均一温度 162.4~392.5℃, 均值 272.9℃, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 5.41%~17.26%, 均值 11.62%, 密度 0.66~0.98 g/cm³, 均值 0.87 g/cm³。

4.2 流体包裹体均一温度、盐度和密度之间的相互关系

由流体包裹体均一温度与盐度关系图(图8)可以看出,邹家山矿床流体包裹体的均一温度与盐度呈抛物线型关系,且两者的交叉值基本分布在抛物线内;沙洲矿床流体包裹体的均一温度与盐度之间的规律性不明显;横涧矿床-3 m 标高包裹体的均一温度与盐度大致成正相关关系,92 m 标高包裹体的均一温度与盐度之间规律性不是很明显。

从流体包裹体的密度与均一温度关系图(图9)可知,邹家山矿床流体包裹体的密度与均一温度成明显的负相关关系,即包裹体的均一温度越高其流体的密度越小;沙洲矿床流体包裹体的密度与均一温度也是明显的负相关关系;横涧矿床-3 m 标高包裹体的密度与均一温度为负相关关系,而92 m 标高包裹体的密度与均一温度之间的规律性则不甚明显。

流体包裹体密度-盐度关系图(图10)显示,除邹家山矿床流体包裹体的密度与盐度呈一定的正相关关系外,沙洲矿床和横涧矿床不同标高流体包裹体的密度与盐度关系都不十分明显。

5 成矿深度与剥蚀程度估算

5.1 成矿深度的估算

成矿深度是成矿作用的重要研究内容,国内外主要是通过测量矿物包裹体的压力,并依据平均静岩压力梯度进行换算来求得成矿深度(卢焕章等,2004;张德会等,2011)。目前在中国金矿的研究中,该方法相对较成熟且应用多(卢焕章等,2004;张德会等,2011),也多用于银、铅、锌、钨、钼等多金属矿床(李诺等,2009;冯佳睿等,2010;翟德高等,2010;文春华等,2011),而在铀矿研究领域则鲜见报道。流体包裹体地质压力计研究成矿深度方法的原理是通过测试分析成矿期矿物流体包裹体样品得出流体静压力,并认为该压力仅产自上覆岩石重力(即静流体压力模型),由于压力与深度是呈线性关系的,因而依据这些压力数据直接用重力/密度方法就能推算出流体包裹体形成的深度,即成矿(矿化)深度。邹家山、横涧和沙洲矿床主成矿期与铀成矿关系密切的萤石均是产在各类裂隙中,其形成时期整个裂隙中的流体处于沸腾状态,所含包裹体为沸腾类型的包裹体。沸腾状态的流体包裹体压力相当于所在深度的流体静压力,不必进行压力校正(Roedder et al., 1980)。

(1) Haas 图解法

利用 Haas(1976)提出的不同盐度 NaCl-H₂O 体系沸腾曲线的深度-温度图解(图11)可以估算出成矿深度,推算得到的成矿深度列于表1~表4。

从表1~表4可以看出,邹家山矿床-130 m 标高推算得到的铀成矿深度范围 110~1 280 m,平均为 553 m,206 m 标高获得的成矿深度范围 6~200 m,平均为 65 m。两者平均成矿深度相差约 448 m,与两者产出的标高差(336 m)相差 110 m 左右,可能主要是测试的包裹体较少而导致的误差。横涧矿床-3 m 标高推算求得的铀成矿深度范围 50~1 420 m,平均为 446 m,92 m 标高获得的成矿深度范围 100~1 450 m,平均为 767 m。两者平均成矿深度相差约 321 m,与两者产出的标高差(95 m)相差较大,表明本次测试的数据误差较大,可能主要是测试误差或推算过程中人为因素所致。沙洲矿床

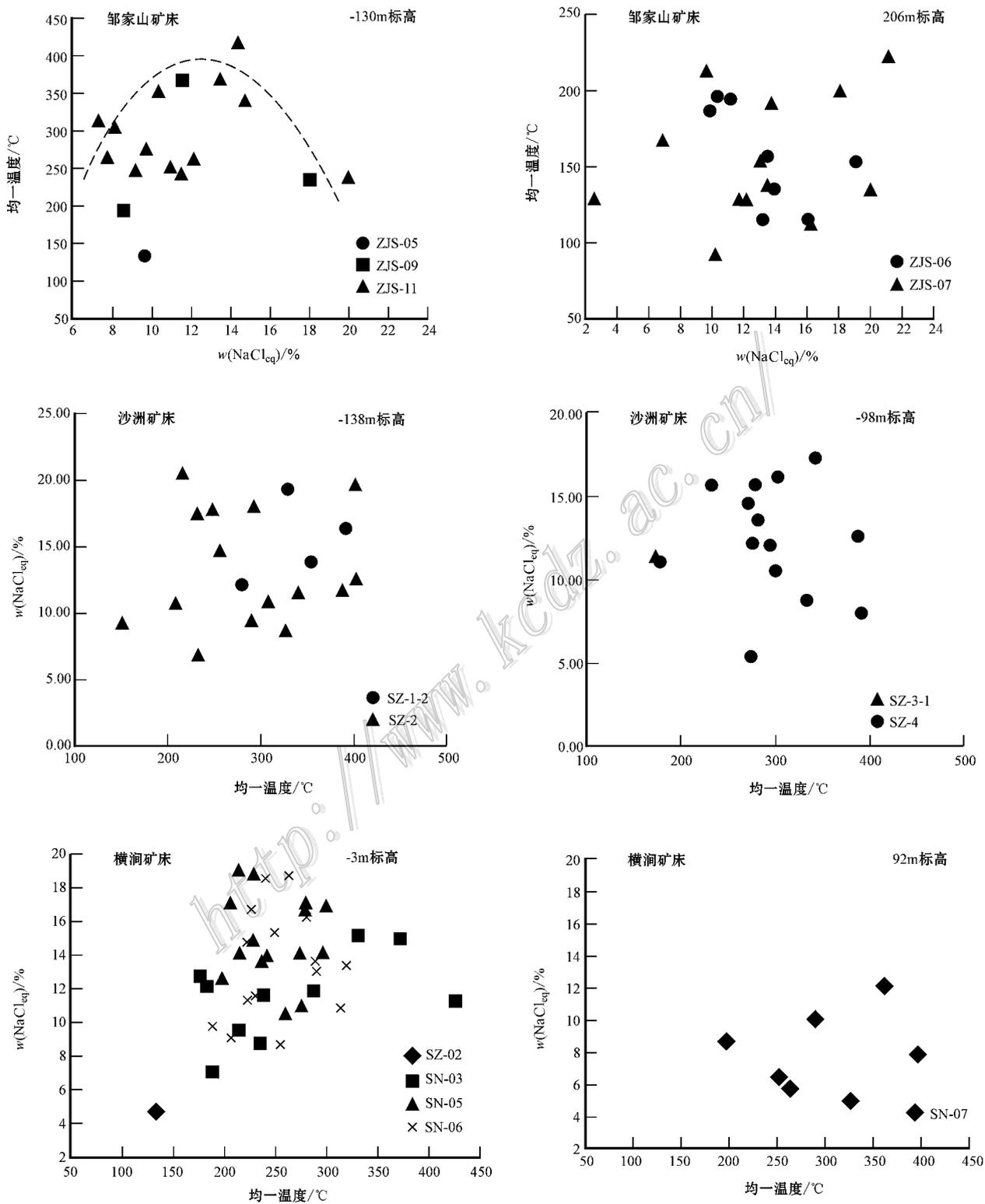


图 8 流体包裹体均一温度-盐度关系图

Fig. 8 Diagram of homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions

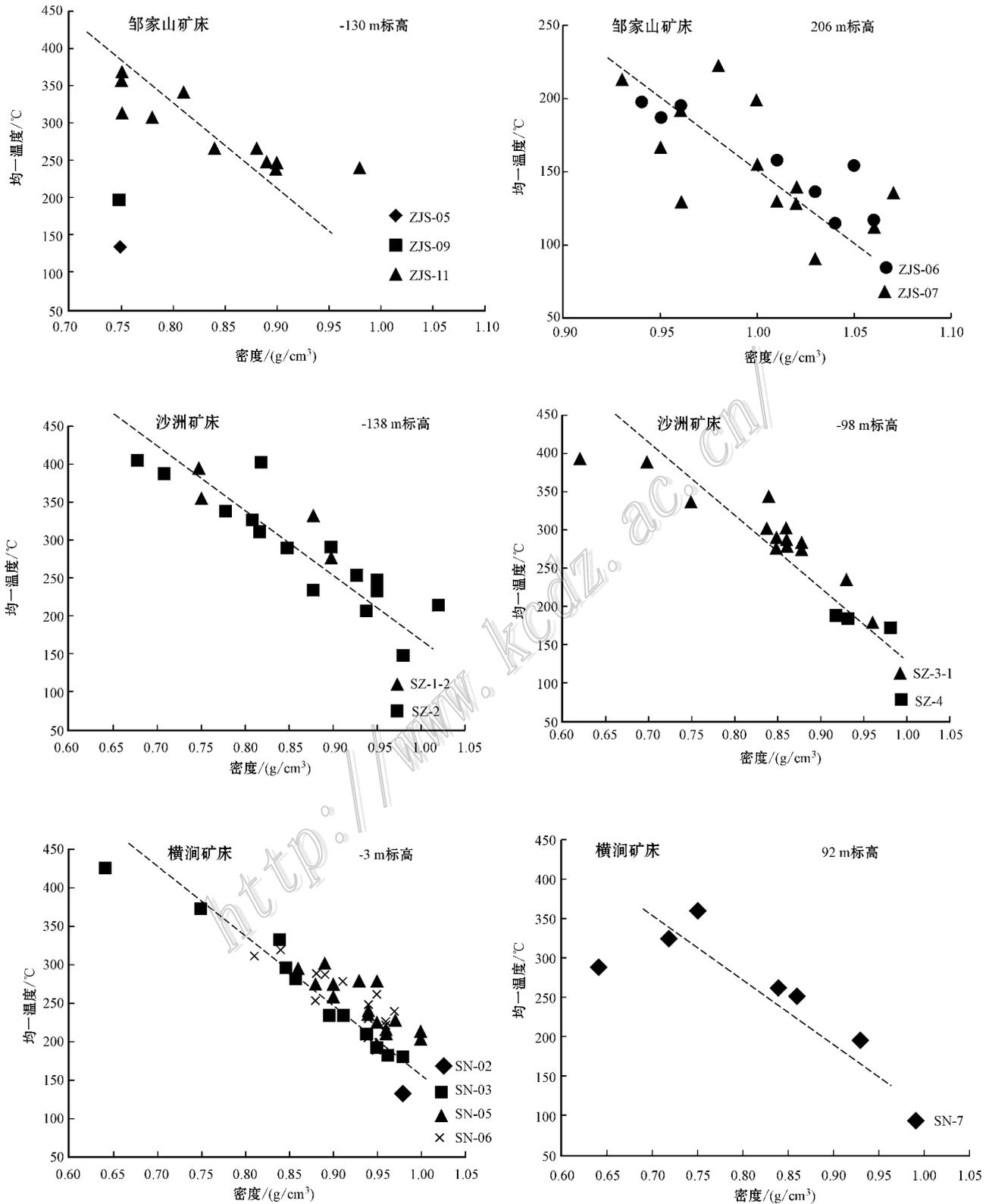


图9 流体包裹体密度-均一温度关系图

Fig. 9 Diagram of density versus homogenization temperature of fluid inclusions

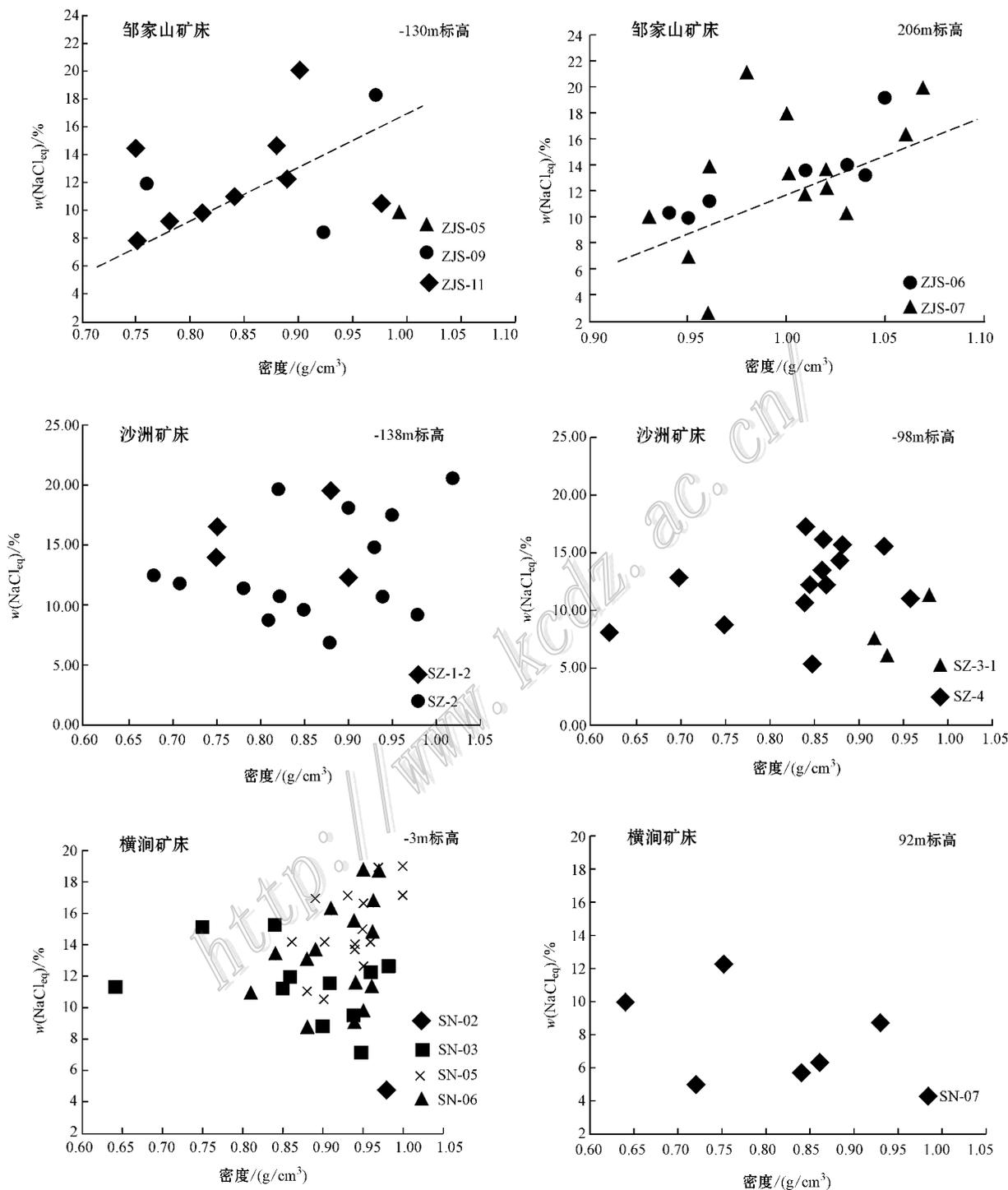


图 10 流体包裹体密度-盐度关系图

Fig. 10 Diagram of density versus salinity of fluid inclusions

-138 m 标高估算获得的铀成矿深度范围 38 ~ 1 425 m, 平均为 578 m; -98 m 标高获得的成矿深度 50 ~ 975 m, 平均为 537 m。两者平均成矿深度相差

约 41 m, 与两者产生的标高差(40 m)基本相当, 表明利用流体包裹体估算得到的铀成矿深度结果较为可靠(王蕾等, 2008)。

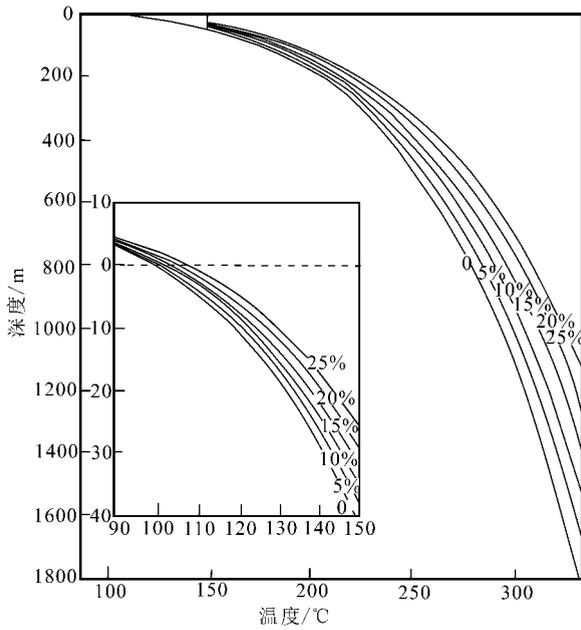


图 11 不同盐度 NaCl-H₂O 体系沸腾曲线的深度-温度图解(据 Haas, 1976)

Fig. 11 Depth-temperature diagram of boiling curves for the NaCl-H₂O system of different salinities (after Haas, 1976)

(2) 邵洁涟经验公式法

依据邵洁涟等(1986)提出的成矿压力和成矿深度经验公式:

$$T_0(\text{初始温度}) = 374 + 920 \times N(\text{成矿溶液的盐度 } \chi(\text{‰}))$$

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

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

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

$$H_1(\text{成矿深度}) = P_1 \times 1/300 \times 10^3(\text{ km})$$

计算获得:邹家山矿床-130 m 标高铀成矿深度 320~1 640 m, 平均为 860 m; 206 m 标高成矿深度 320~1 010 m, 平均为 550 m。横涧矿床-3 m 标高铀成矿深度 640~1 480 m, 平均为 930 m; 92 m 标高成矿深度 650~1 330 m, 平均为 950 m。沙洲矿床-138 m 标高铀成矿深度 510~1 770 m, 平均为 1 140 m; -98 m 标高成矿深度范围 430~1 450 m, 平均为 900 m。对比平均成矿深度差和标高差可知, 该方法在邹家山和横涧矿床成矿深度估算中误差较小, 而沙洲矿床误差较大。

(3) Bischoff 相图法

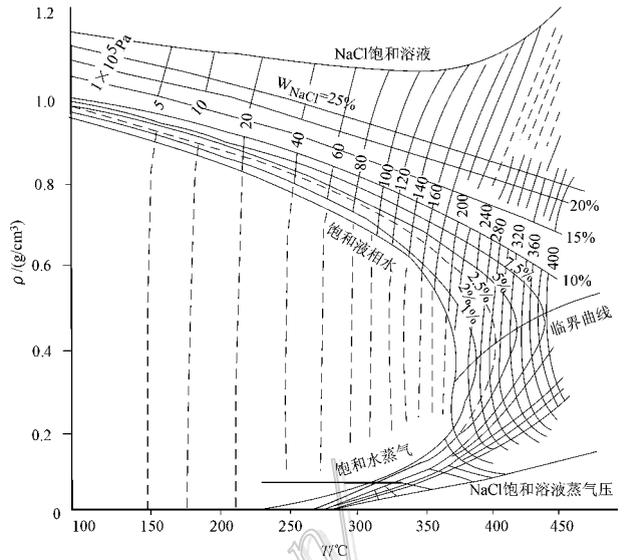


图 12 NaCl-H₂O 体系的 T-ρ 相图(据 Bischoff et al., 1991)

Fig. 12 T-ρ phase of NaCl-H₂O system(after Bischoff et al., 1991)

根据 Bischoff(1991)提出的 NaCl-H₂O 体系 T-ρ 相图(图 12)可获得不同标高的成矿压力,再按静岩压力公式计算: $P = \rho \times g \times H$, 其中 $\rho = 2.7 \text{ g/cm}^3$, g 为重力加速度(m/s^2), H 为上覆岩石厚度(即成矿深度, m)。

据此可估算出:邹家山矿床-130 m 和 206 m 标高的成矿深度分别是 1 730 m、230 m, 两者平均成矿深度相差 1 500 m; 横涧矿床-3 m 和 92 m 的成矿深度分别是 1 660 m、3 020 m, 两者平均成矿深度相差约 1 360 m; 沙洲矿床-138 m 和 -98 m 标高的成矿深度是 2 870 m、2 260 m, 两者平均成矿深度相差约 610 m。

(4) 讨论

通过以上计算结果的对比可看出, Haas(1976)图解法在沙洲矿床成矿深度研究中最接近合理, 邵洁涟等(1986)的经验公式法在邹家山矿床和横涧矿床成矿深度研究中最合理, 而 Bischoff(1991) T-ρ 相图法误差较大。

综合得出结论, 邹家山矿床-130 m 标高铀成矿深度 320~1 640 m, 平均为 860 m; 206 m 标高成矿深度 320~1 010 m, 平均为 550 m。横涧矿床-3 m 标高铀成矿深度 640~1 480 m, 平均 930 m; 92 m 标高成矿深度 650~1330 m, 平均为 950 m。沙洲矿床-138 m 标高铀成矿深度 38~1 425 m, 平均为

578 m; -98 m 标高成矿深度 50~975 m, 平均为 537 m。

5.2 矿床(体)剥蚀程度的估算

前人在相山矿田虽然开展了大量的矿产勘查和研究工作,但多只是关注矿床的形成过程,对成矿后的改造和保存涉及较少。良好的成矿环境和有利的保矿因素,才是取得找矿突破的必要条件。

相山矿田已发现铀矿床 20 余个,且空间上分布不均匀,南部和东部找矿工作一直没有取得实质性进展。这种不均衡的矿床产出特征长期以来困惑着研究者,部分研究者^①认为,东、南部地区本身可能就不成矿,为相山火山机构内部结构构造的不均一性和不对称性所致;也有研究者(张万良等,2005;2007)通过遥感影像、地貌形态等方法进行对比分析,这种不均衡的矿床产出规律主要是侵蚀程度不同所致,并认为东、南部侵蚀程度大于西、北部,东、南部的铀矿可能遭受过较强烈的侵蚀,已有铀矿可能多已消失,即东、南部基本没有找矿前景。

以上观点都是对相山找矿前景持否定的态度,但笔者认为,东、南部地区理论上具备成大矿、富矿的条件。与西、北部成矿条件对比可发现,南部地区基本具备了有利的成矿地质条件,包括基底构造、断裂构造、火山塌陷构造、赋矿岩体、成矿界面等。其地表除分布着火山岩系地层外,还有大面积的次斑状花岗岩出露(图1)。一直未能取得找矿突破的主要原因可能还是由于投入的工作量少。同样的,东部地区虽已发现了1个中型矿床(云际矿床)和多个矿点和矿化点(如上谿、尧岗、林头等),但是除了围绕云际矿床进行过一些追控外,其他有利部位开展的工作也很少。

流体包裹体方法已成为定量评价矿床剥蚀深度的主要方法之一(李惠,1997)。流体包裹体方法定量估算矿床剥蚀深度的原理是利用流体包裹体方法得出的矿床(体)成矿深度,然后与目前矿床(体)所处的标高进行对比,两者的差值就是矿床(体)形成后遭受的侵蚀深度。

由地形图可知,目前邹家山矿床地表标高约在 340~410 m,即 -130 m 标高实际位置距地表 470~540 m 处,206 m 标高实际位置距地表 130~200 m。将目前不同标高的实际深度与上述估算的成矿时不同标高均值深度对比,就可以获得该标高矿体形成

后上覆岩石遭受的剥蚀厚度,据此得到邹家山矿床的剥蚀厚度在 320~416 m 之间。同理,可以获得横涧矿床矿体遭受的剥蚀深度在 727~902 m,沙洲矿床矿体遭受的剥蚀深度在 190~240 m。

以上研究表明,相山矿田铀矿床形成后均遭受了一定程度的剥蚀,北东部的沙洲矿床剥蚀程度最小,西部的邹家山矿床其次,北西部的横涧矿床剥蚀程度最大。基本可以认为,北西部的抬升和剥蚀的程度强于南东部,北西部发育晚白垩世红盆的事实也证实了这一观点(图1)。

另外,从前面的论述可知,相山地区铀的成矿深度多在 500 m 以上,如果东、南部地区铀成矿后基本没有抬升剥蚀的事实成立,那么,其深部应该就有较好的找矿前景。最近,江西省核工业地质局 261 大队在相山南部的刁元、管家陇和东部的林头实施了钻孔,发现其深部都有较好的矿化蚀变,且深部矿化有变好的趋势,基本可以证实南、东部在深部具备良好的找矿前景。

6 结 论

(1) 相山铀矿田 3 个典型铀矿床的萤石原生包裹体均为气-液两相并富液相,偶见含石盐包裹体,包裹体较小,多在 7 μm 左右,包裹体多呈椭圆状形、四边形和不规则状,包裹体分布规律性不强,偶见条带状和环带状分布。

(2) 相山西部的邹家山铀矿床 -130 m 标高和 206 m 标高包裹体的均一温度分别为 132.9~418.3 $^{\circ}\text{C}$ (平均为 266.1 $^{\circ}\text{C}$)、92.4~223.3 $^{\circ}\text{C}$ (平均为 159.9 $^{\circ}\text{C}$),盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 分别为 7.31%~19.99%(平均为 11.61%)、2.57%~21.11%(平均为 13.16%),密度分别为 0.75~0.99 g/cm^3 (平均为 0.88 g/cm^3)、0.93~1.06 g/cm^3 (平均为 1.00 g/cm^3)。流体包裹体的密度与形成深度成正相关关系,与均一温度为明显的负相关关系,与盐度成正相关关系;流体包裹体的均一温度与盐度为抛物线型关系。

(3) 相山北部的沙洲铀矿床 -138 m 标高和 -98 m 标高包裹体的均一温度变化范围为 151.1~404.9 $^{\circ}\text{C}$ (平均为 297.3 $^{\circ}\text{C}$)、162.4~392.5 $^{\circ}\text{C}$ (平均为 272.9 $^{\circ}\text{C}$),盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 6.88%~20.52%(平

① 核工业 270 研究所、261 大队、266 大队,1995. 相山火山岩型富大铀矿找矿模式及攻深方法技术研究. 49-5-1 成果报告. 内部资料.

均为 13.73%)、5.41% ~ 17.26% (平均为 11.62%) 密度为 0.71 ~ 1.01 g/cm³ (平均为 0.86 g/cm³)、0.66 ~ 0.98 g/cm³ (平均为 0.87 g/cm³) ; 流体包裹体的密度与形成深度、盐度之间的关系不明显, 而与均一温度成明显的负相关关系; 流体包裹体的均一温度与盐度的规律性不甚明显。

(4) 横涧铀矿床 - 3 m 标高和 92 m 标高的萤石包裹体均一温度分别为 178.4 ~ 425.7°C (平均为 259.9°C)、197.5 ~ 396.3°C (平均为 291.7°C), 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 变化范围分别为 7.02% ~ 18.96% (平均为 13.45%)、4.96% ~ 12.16% (平均为 7.95%), 密度为 0.75 ~ 1.00 g/cm³ (平均为 0.91 g/cm³)、0.64 ~ 0.93 g/cm³ (平均为 0.79 g/cm³) ; 流体包裹体的密度与形成深度、均一温度之间成负相关关系, 而与盐度之间关系不明显; 流体包裹体均一温度与盐度大致成正相关关系。

(5) 利用流体包裹体方法获得邹家山铀矿床 - 130 m 标高和 206 m 标高铀成矿平均深度分别为 860 m 和 550 m, 沙洲铀矿床 - 138 m 标高和 - 98 m 标高铀成矿平均深度分别为 578 m 和 537 m, 横涧铀矿床 - 3 m 标高和 92 m 标高铀成矿平均深度分别为 930 m 和 950 m。

(6) 与不同标高实际深度对比, 获得邹家山铀矿床形成后抬升(剥蚀)深度约在 320 ~ 416 m, 沙洲铀矿床抬升(剥蚀)深度为 190 ~ 240 m, 横涧铀矿床形成后抬升(剥蚀)深度最大, 在 727 ~ 902 m。

(7) 利用流体包裹体研究定量得出, 相山矿田东部、南部地区铀成矿后受侵蚀程度小于相山西部和北部地区, 相山东、南部地区主要矿化体应还在较深部位置, 应具有较好的找矿前景。

参考文献/References

陈小明, 陆建军, 刘昌实, 赵连泽, 王德滋, 李惠民. 1999. 桐庐、相山火山-侵入杂岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 15(2): 272-278.

冯佳睿, 周振华, 程彦博. 2010. 云南南秧田钨矿床流体包裹体特征及其意义[J]. 岩石矿物学杂志, 29(1): 50-58.

黄锡强, 陈正乐, 王平安, 杨农, 鄧剑. 2008. 江西相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究[J]. 地质力学学报, 14(2): 176-185.

李惠. 1997. 金矿床地球化学异常模式研究的新进展[J]. 地质与勘探, 33(2): 43-47.

李诺, 陈衍景, 倪智勇, 胡海珠. 2009. 河南省嵩县鱼池岭斑岩钼矿床成矿流体特征及其地质意义[J]. 岩石学报, 25(10): 2509-2522.

卢焕章, 范宏瑞, 倪培, 欧光习, 沈昆, 张文淮. 2004. 流体包裹体[M]. 北京: 科学出版社.

邵洁连, 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[J]. 矿物岩石, 6(3): 103-111.

沈锋, 陈然志, 李方. 1995. 华南相山铀矿田成矿条件及发展前景[J]. 铀矿地质, 11(5): 252-265.

王蕾, 张树明, 蒋振频, 郭国林. 2008. 相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究[J]. 大地构造与成矿学, 32(4): 500-508.

文春华, 徐文艺, 钟宏, 吕庆田, 杨竹森, 田世洪, 刘英超. 2011. 安徽姚家岭锌多金属矿床地质特征与浅部矿化流体包裹体研究[J]. 矿床地质, 30(3): 533-546.

翟德高, 王建平, 刘家军, 吴胜华, 毛光剑, 王守光, 李王玺. 2010. 内蒙古甲乌拉银多金属矿床成矿流体演化与机制分析[J]. 矿物岩石, 30(2): 68-76.

张德会, 徐九华, 余心起, 李健康, 毛世德, 王科强, 李泳泉. 2011. 成岩成矿深度: 主要影响因素与压力估算方法[J]. 地质通报, 30(1): 112-125.

张树明, 王蕾, 蒋振频, 郭国林, 安伟涛, 刘金枝, 邵上. 2009. 相山铀矿田邹家山矿床流体包裹体研究[J]. 铀矿地质, 25(5): 263-269.

张万良, 刘德长, 李子颖, 张静波. 2005. 江西相山铀矿田遥感影像呈现的新构造运动及其意义[J]. 国土资源遥感, 6(3): 52-56.

张万良, 刘德长, 李子颖, 张静波. 2007. 江西相山矿田西北部与东南部矿床侵蚀程度的对比分析[J]. 大地构造与成矿学, 31(3): 348-352.

Bischoff J L. 1991. Densities of liquids and vapors in boiling NaCl-H₂O: A PVTX summary from 300°C to 500°C [J]. American Journal of Science, 291: 309-338.

Haas J L. 1976. Physical properties of the coexisting phases and thermochemical properties of the H₂O component in boiling NaCl solution [J]. US Geol. Surv. Bull., 1421A: 1-73.

Hall D L, Sterner S M and Bodnar R J. 1988. Freezing point depression of NaCl-KCl-H₂O solution [J]. Econ. Geol., 83: 197-202.

Roedder E and Bodnar R J. 1980. Geologic pressure determinations from fluid inclusion studies [J]. Ann. Rev. Earth Planet Sci., 8: 263-301.