

纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床 流体包裹体特征及成矿作用*

范洪海^{1,2,3}, 陈金勇^{1,3}, 顾大钊^{1,3}, 王生云^{1,3}

(1 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2 南京大学成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093;
3 中核铀资源勘查与评价技术重点实验室, 北京 100029)

摘 要 文章对纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体的温度、盐度、密度和成分等进行了系统的分析研究,厘定了成矿流体的类型及基本性质,并对该地区铀成矿的物理化学条件和成矿流体来源进行了初步探讨。研究表明,该地区白岗岩型铀矿床的成矿流体可分为2个期次:主成矿期和叠加改造期。主成矿期的流体为岩浆晚期的残余高温、低盐度热液,其气相成分主要是CO₂,含少量H₂O、N₂和CH₄;叠加改造期的流体为中-低温、低盐度热液,其气相成分以CO₂和H₂O为主,含少量CH₄和N₂,来源于岩浆期后热液与大气水的混合。

关键词 地球化学;流体包裹体;热液叠加改造;白岗岩型铀矿床;成矿作用;纳米比亚欢乐谷地区

中图分类号: P619.14

文献标志码: A

Fluid inclusions and metallogenesis of alaskite-type uranium deposits in Gaudeanmus area, Namibia

FAN HongHai^{1,2,3}, CHEN JinYong^{1,3}, GU DaZhao^{1,3} and WANG ShengYun^{1,3}

(1 Beijing Research Institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2 Department of Earth Sciences and State Key Laboratory of Mineral Deposit Research, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China; 3 Key Laboratory of Uranium Resource Exploration and Evaluation Technology, CNNC, Beijing 100029, China)

Abstract

On the basis of field survey and a comparative study of petrography, microthermometry and Laser Raman ingredients of fluid inclusions, the authors investigated the basic characteristics (temperature, salinity, density, ingredients, etc.) of fluid inclusions of alaskite-type uranium deposits in the Gaudeanmus area, Namibia and, on such a basis, discussed the physical and chemical conditions of mineralization and the sources of ore-forming fluids. The results indicate that the ore-forming fluids of alaskite-type uranium deposits in the study area can be divided into two stages: main mineralization stage and reformation stage. The fluid of the main mineralization stage is characterized by magmatic residual high temperature and low salinity, and the vapor ingredient of this fluid is mainly CO₂, containing a small amount of H₂O, N₂ and CH₄, whereas the fluid of the reformation stage was derived from meteoric water, mixed with a little magmatic water, with the vapor ingredient being mainly CO₂ and H₂O together with a small amount of CH₄, N₂.

Key words: geochemistry, fluid inclusions, hydrothermal reformation, alaskite-type uranium deposit, metallogenesis, Gaudeanmus area, Namibia

* 本文得到“非洲中南部古老地块铀矿综合识别评价技术及应用研究”项目以及南京大学成矿作用国家重点实验室开放基金的资助
第一作者简介 范洪海,男,1963年生,研究员,博士生导师,主要从事火成岩岩石学及同位素地球化学研究。Email: fhh270@263.net
收稿日期 2013-09-17; 改回日期 2014-07-08。许德焕编辑。

地质流体是成矿的精髓,其来源、运移和卸载代表了整个成矿过程(毛景文等,2001;杨富全等,2004)。流体包裹体作为地质流体的直接证据,是迄今保留下来的最完整和最直接的原始流体(或熔体)样品(卢焕章等,1990;2004),它可为探寻铀矿床的成因提供诸多有价值的信息。因此,许多研究者对铀矿床中石英、萤石、方解石等透明矿物进行过较深入的流体包裹体研究,同时,也有直接对铀的单矿物(主要是沥青铀矿)进行群体包裹体的爆裂法测温及化学成分的研究,但因群体包裹体方法自身的缺陷,目前已很少应用(石少华等,2011)。而且,铀元素放射性衰变过程也可能对铀矿物内包裹体的化学成分产生显著的影响(Dubessy et al., 1983)。所以,铀矿床中透明矿物内流体包裹体的研究仍然是目前获取成矿流体参数最直接有效的手段。

纳米比亚铀资源丰富,素有“战略金属储备库”的美誉(Kinnaird et al., 2009),现已查明的铀矿床类型主要有侵入岩型、表生型、砂岩型和交代型(张书成等,2010),其中的罗辛(Rössing)铀矿床是世界上著名的白岗岩型铀矿床。本文研究的欢乐谷地区也属白岗岩型铀矿床。前人对罗辛铀矿床的流体包裹体开展过相关的研究工作(Cuney, 1980a; 1980b; Nex et al., 2002; Kinnaird et al., 2007),而针对欢乐谷地区的流体包裹体研究成果则鲜见报道。本文从流体包裹体研究入手,以厘定该地区白岗岩型铀矿床的形成温度、盐度、密度、压力及成分,初步分析了成矿流体的期次和演化规律,探讨了成矿流体的来源和成矿机制。

1 成矿地质背景

横贯非洲大陆的达马拉造山带是泛非造山带的一部分,为晚前寒武纪(新元古代)和早古生代(650~460 Ma)的造山带,是Kalahari和Congo克拉通碰撞的产物(Coward, 1983)。其在纳米比亚可划分为NS向的海岸线分支和NE向的陆内分支,陆内分支又可细分为北部地体、北带、北部中央带、南部中央带、Okahandja线性构造带、南带、南部边缘带和南部地体(Martin et al., 1977; Shawn, 2008)。各地带的边界主要根据航磁解译图上的断裂或线性构造带予以确定(Corner, 1983)。纳米比亚所有的白岗岩型铀矿床(点)均发育于中央带(Roesener et al., 1994)。纳米比亚欢乐谷地区的大地构造位置归属

于达马拉造山带的南部中央带。南部中央带以侵入大量花岗岩和发生高温低压变质作用(高角闪岩相至麻粒岩相)为显著特征(Miller, 1983)。

欢乐谷地区出露的主要地层自下而上为:Ab-babis杂岩体,艾杜西斯(Etosis)组,可汗(Khan)组,罗辛(Rössing)组,楚斯(Chuoss)组,卡里毕比(Karibib)组,卡塞布(Kuiseb)组(图1)。Ab-babis杂岩体为基底杂岩,以眼球状片麻岩和石英长石片麻岩为主,含少量泥质片岩、石英岩、大理岩、斜长角闪岩等,其中片麻岩的年龄约为2000 Ma(Longridge et al., 2008)。艾杜西斯组不整合于Ab-babis基底杂岩之上,主要分布在欢乐谷地区穹窿或背斜的核部,岩性为变质砾岩、石英岩、片岩、片麻岩等。可汗组以岩石呈灰绿色、有大量花岗岩脉侵入为特征,由辉石榴石片麻岩、片岩、角闪岩、石英岩等组成。罗辛组不整合于可汗组之上,其岩性特征为发育上、下两套大理岩、堇青石片麻岩和石英岩,铀矿化主要发育于该组地层中。楚斯组以发育一层冰碛岩为特征,出露的岩性有冰碛岩、钙硅质岩和石英岩等。卡里毕比组主要由厚层状大理岩、钙硅质岩、片岩和片麻岩等组成。卡塞布组的主要岩性为泥质片岩、片麻岩、混合岩、钙硅质岩和石英岩等。

2 铀矿化特征

欢乐谷地区广泛发育碱交代作用,白岗岩、同构造花岗岩、红色细粒花岗岩以及各地层中均有发育。碱交代作用排硅现象明显,经常在碱交代体附近发育硅质脉或硅质团块。经对白岗岩型富矿石的观测对比,认为富矿石的形成明显受后期热液蚀变作用的控制。常见的蚀变主要为钠长石化、硅化、白云母化、伊利石化、高岭石化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化和赤铁矿化等,因此,富矿石是由普通白岗岩型矿化经热液蚀变叠加改造而形成。

通过岩矿鉴定和电子探针分析,确认欢乐谷地区白岗岩型铀矿床中的铀主要呈独立的铀矿物形式存在,少量铀以类质同象的形式存在于钍矿物中。铀矿物主要为铀氧化物、铀钛氧化物、铀硅酸盐,常与锆石、磷灰石、独居石、黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿及赤铁矿等伴生(陈金勇等,2013)。其中,铀氧化物主要是晶质铀矿、沥青铀矿和钍铀矿。晶质铀矿一般粒径较大,常被造岩矿物如斜长石、黑云母等包裹,镜下观察晶质铀矿与黑云母、长石类矿物

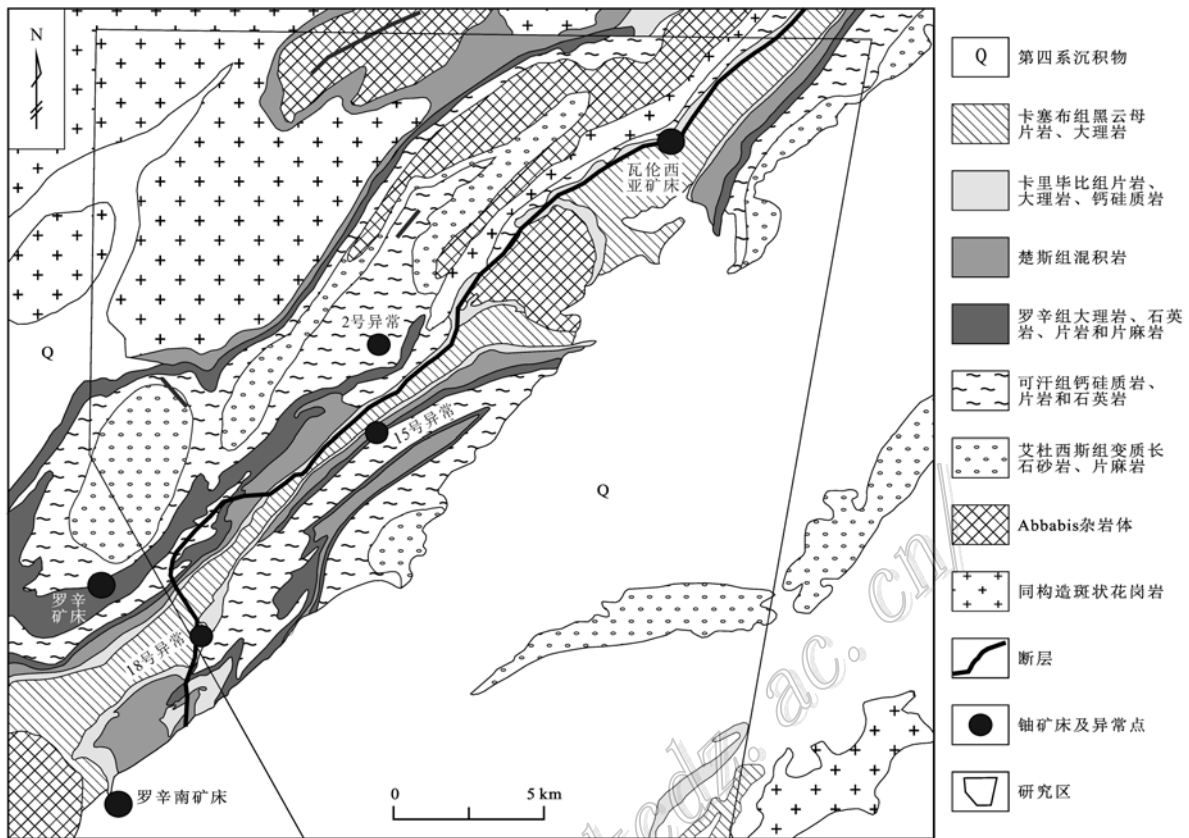


图1 纳米比亚欢乐谷地区地质简图及铀异常分布图(陈金勇等, 2013)

Fig. 1 Geological sketch map of Gaudeamus area, Namibia, showing the location of significant uranium anomalies (after Chen et al., 2013)

的接触部位易形成放射性晕圈。铀钍氧化物是一类复杂的矿物, 包括钍铀矿、铀钍矿和铀烧绿石族等。铀硅酸盐有硅钙铀矿、铀石和铀钍石。

3 流体包裹体研究

3.1 样品采集与分析方法

本次研究采集的样品主要为欢乐谷地区钻孔中的矿化白岗岩, 主要以烟灰色石英为标志性特征。共采集样品 28 件, 有白岗岩、白岗岩中的石英团块及切穿白岗岩的石英脉和方解石脉(图 2a~c)。大部分样品采于 18 号矿带(图 1)。根据野外产出特征和手标本观察, 挑选出 15 件样品制成包裹体片。运用光学显微镜研究了流体包裹体岩相学特征, 划分了包裹体类型和共生组合。

流体包裹体测温在中核铀资源勘查与评价技术重点实验室完成, 测试仪器为英国产 Linkam THMSG600 型冷热台, 可测温度范围为 $-196 \sim$

600°C , 均一温度误差小于 2°C , 冰点温度误差小于 0.1°C 。本次测试过程中, 升温速率在冰点附近为 $0.1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, 在均一温度附近为 $0.5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。流体包裹体气相成分分析在核工业北京地质研究院分析测试研究所流体包裹体实验室进行, 测试仪器为 LABHR-VIS LabRAM HR800 型显微激光拉曼光谱仪, 波长为 532 nm , 扫描范围为 $100 \sim 4\,200\text{ cm}^{-1}$, 测试环境温度为 25°C , 湿度为 50% 。

3.2 流体包裹体岩相学特征

石英和方解石均是研究流体包裹体的理想寄主矿物。流体包裹体显微岩相学观察表明, 在白岗岩(图 2a)和石英团块(图 2b)中, 大多数包裹体沿矿物的微裂隙呈线(带)状分布, 应属次生包裹体; 还有一些原生包裹体呈群簇状分布, 大小为 $5.3 \sim 21.9\text{ }\mu\text{m}$, 个别可达 $50\text{ }\mu\text{m}$, 多数为 $9 \sim 16\text{ }\mu\text{m}$, 气相分数为 $5\% \sim 50\%$ 。石英脉(图 2c)中只见有气液两相包裹体, 形态为椭圆形、长方形和不规则状, 大小为 $6.2 \sim 21.4\text{ }\mu\text{m}$, 个别达 $50\text{ }\mu\text{m}$, 气相分数为 $5\% \sim 20\%$, 主要

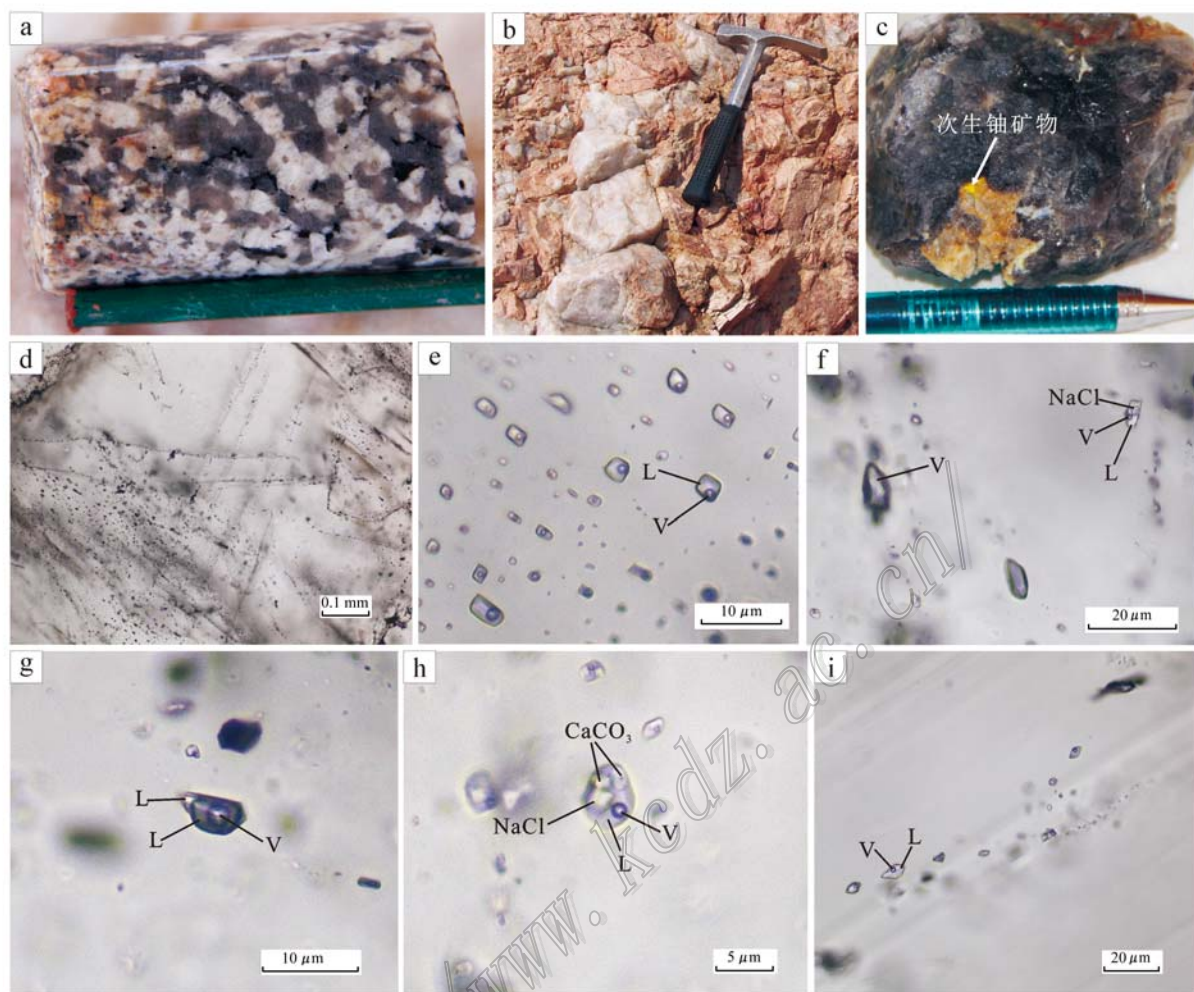


图 2 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体特征

a. 矿化白岗岩; b. 石英团块; c. 石英脉; d. III-2 型包裹体呈线状分布; e. III-2 型包裹体; f. I 型和 IV 型包裹体; g. II 型包裹体; h. IV 型包裹体; i. 方解石脉中包裹体

Fig. 2 Microphotographs showing features of fluid inclusions of alaskite-type uranium deposits in Gaudeanmus area, Namibia

a. Mineralized alaskite; b. Quartz lump; c. Quartz vein; d. III-2 type inclusions distributed linearly; e. III-2 type inclusions; f. I and IV type inclusions; g. II type inclusions; h. IV type inclusions; i. Inclusions in calcite veins

为成群分布。方解石脉中也只含有气液两相包裹体,形态为近椭圆形、长条状和不规则状,大小为 $5.7 \sim 20.4 \mu\text{m}$,多数为 $8 \sim 12 \mu\text{m}$,气相分数为 $5\% \sim 30\%$,主要为成群分布,部分沿解理呈线状分布(图 2i)。根据室温下流体包裹体的物理相态和化学组成,可将白岗岩和石英团块中的流体包裹体划分为以下 5 类(图 2)。

I 型 纯气相包裹体(V) 出现较少,形态为椭圆状,大小为 $5 \sim 10 \mu\text{m}$,呈孤立分散状镶嵌分布(图 2f)。在矿化白岗岩和石英团块中,常与 III 型、IV 型和 V 型包裹体共存,指示在包裹体捕获时可能发生流体的沸腾作用,或存在两种流体的不混溶作用。

II 型 含 CO_2 三相包裹体($V_{\text{CO}_2} + L_{\text{CO}_2} + L_{\text{H}_2\text{O}}$)

形态为椭圆形、长条形等,长轴为 $7 \sim 20 \mu\text{m}$,个别达 $35 \mu\text{m}$ (图 2g)。 CO_2 相的气相分数为 $15\% \sim 90\%$,多数为 $20\% \sim 50\%$,加热时均一于 H_2O 相。该类包裹体的数量也比较少,常与 III 型包裹体共存。

III 型 气液两相包裹体(L + V) 该类包裹体最为发育,广泛存在于各样品中,是整个铀成矿过程中占绝大多数的流体包裹体,在均一化过程中,全部均一至液相。据显微镜下观察,可细分为 2 种类型:III-1 型,主要形态有椭圆状、近圆状、长条状等,大小为 $5.3 \sim 11.9 \mu\text{m}$,气相分数为 $15\% \sim 50\%$,属于原生包裹体,呈孤立状及群状分布;III-2 型,主要形态

有近椭圆形、长方形、多边形、三角形及不规则状,大小为 $5.4 \sim 21.9 \mu\text{m}$,多数为 $9 \sim 16 \mu\text{m}$,气相分数为 $5\% \sim 30\%$,属于次生包裹体,沿矿物微裂隙呈线(带)状分布(图 2d)。Ⅲ-2 型包裹体较Ⅲ-1 型更为发育(图 2e)。

Ⅳ型 含子矿物多相包裹体($L \pm V + S$) 形态主要为椭圆状和长条状,大小为 $5 \sim 15.5 \mu\text{m}$,气相分数为 $0 \sim 10\%$,呈孤立状分布(图 2f、2h)。子矿物主要为石盐,颗粒较大,晶形很好,呈立方体状;有少量钾盐,还有某种颗粒细小呈浑圆状的矿物。个别此类包裹体含有 3 个子矿物(图 2h)。此类包裹体数量也相对较少。

V 型 纯液相包裹体(L) 呈椭圆状、长条状,大小为 $5 \sim 16 \mu\text{m}$,主要呈线状分布,常与Ⅰ型、Ⅲ型包裹体共存。此类包裹体数量也较少。

3.3 流体包裹体显微测温

3.3.1 含 CO_2 三相包裹体(Ⅱ型)

本次研究对矿化白岗岩和石英团块中的 11 个

含 CO_2 三相包裹体进行了测温(表 1),它们都均一于液相。 CO_2 的初熔温度为 $-56.6 \sim -57.7^\circ\text{C}$,表明包裹体内的 CO_2 不纯,有 CH_4 或 N_2 存在(Burruss, 1981; 张文淮等, 1993),其含量为 $0 \sim 5 \text{ mol } \%$ (Heyen et al., 1982)。 CO_2 部分均一温度变化于 $26.4 \sim 29.8^\circ\text{C}$, CO_2 笼形化合物的熔化温度为 $8.2 \sim 11.9^\circ\text{C}$ 。根据 Bozzo 等(1973)的盐度计算公式: $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) (\%) = 15.52002 - 1.02342t - 0.05286t^2$ (t 为 CO_2 笼形化合物的熔化温度),求得 CO_2 三相包裹体水溶液的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 $0.82\% \sim 3.57\%$,均值为 2.06% (图 3)。

3.3.2 气液两相包裹体(Ⅲ型)

测温结果列于表 1 和图 4。其中,包裹体的盐度是根据拉乌尔定律计算所得(卢焕章等, 2004),计算公式为: $w(\text{NaCl}_{\text{eq}}) / \% = 0.00 + 1.78t_m - 0.0442t_m^2 + 0.000557t_m^3$ (t_m 为冰点下降温度)。下文根据包裹体类型及不同期次综合分析其均一温度、盐度(图 3)及密度特征。

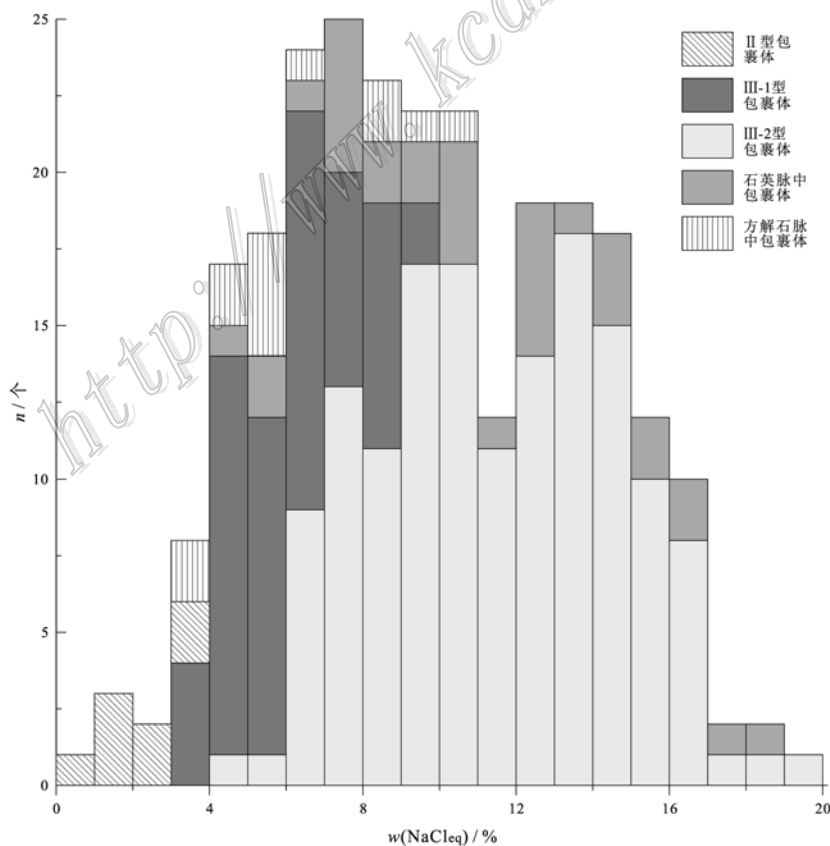


图 3 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体盐度直方图

Fig. 3 Histogram of salinity for fluid inclusions of alaskite-type uranium deposits in Gaudeamus area, Namibia

表 1 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体测温结果及参数

Table 1 Microthermometric measurements and calculated parameters of fluid inclusions of alaskite-type uranium deposits in Gaudeanmus area, Namibia

岩性	矿物	包裹体类型	$t_{m,cl}/^{\circ}\text{C}$	$t_{h,CO_2}/^{\circ}\text{C}$	$t_{h,tot}/^{\circ}\text{C}$		$t_{m,ice}/^{\circ}\text{C}$	$t_{h,d}/^{\circ}\text{C}$	盐度 $w(\text{NaCl}_{eq})/\%$		密度 $\rho/\text{g}/\text{cm}^3$	
					范围	平均值			范围	平均值	范围	平均值
矿化白岗岩和石英团块	石英	II	8.2~11.9	26.4~29.8	271~342(11)	305			0.82~3.57(8)	2.06	0.55~0.70(8)	0.68
		III-1			316~575(58)	472	-2.1~-6.3		3.55~9.60(58)	6.14	0.18~0.75(58)	0.41
		III-2			117~298(148)	198	-2.9~-15.5		4.80~19.05(148)	11.5	0.79~1.04(148)	0.95
		IV			279~430(10)	343		210.5~429.8(10)	32.39~39.8(8)	36.45		
石英脉	石英	两相			144~251(33)	193	-2.8~-15.3		4.65~18.88(33)	11.24	0.85~1.02(33)	0.96
方解石脉	方解石	两相			123~185(13)	155	-2.1~-8.4		3.55~10.98(13)	6.22	0.92~0.99(13)	0.96

注：括号内数字为测试数； $t_{m,cl}$ —笼形化合物熔化温度； t_{h,CO_2} — CO_2 部分均一温度； $t_{h,tot}$ —完全均一温度； $t_{m,ice}$ —冰点温度； $t_{h,d}$ —子矿物熔化温度；II 型包裹体的密度是指 CO_2 三相包裹体内流体的总密度。

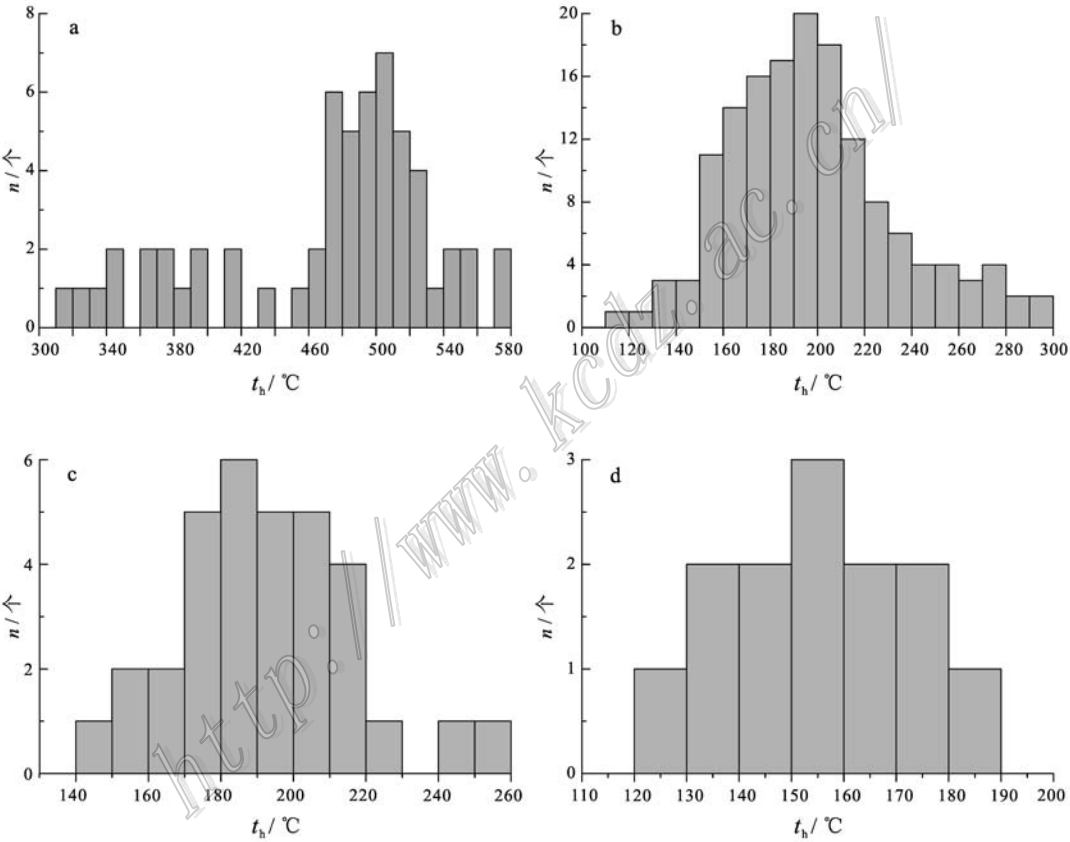


图 4 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体均一温度直方图

a. III-1 型气液包裹体均一温度；b. III-2 型气液包裹体均一温度；c. 石英脉中包裹体均一温度；d. 方解石脉中包裹体均一温度

Fig. 4 Histogram showing homogenization temperatures of fluid inclusions of alaskite-type uranium deposits in Gaudeanmus area, Namibia

a. Homogenization temperatures of fluid inclusions in type III-1; b. Homogenization temperatures of fluid inclusions in type III-2; c. Homogenization temperatures of fluid inclusions in quartz veins; d. Homogenization temperatures of fluid inclusions in calcite veins

III-1 型气液包裹体，其均一温度范围为 316~575 °C ($n = 58$)，均值为 472 °C，集中区间为 470~530 °C ($n = 33$)，冰点温度范围为 -2.1~-6.3 °C ($n = 58$)，对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{eq})$ 为 3.55%~9.60%，均值为 6.14%，流体密度为 0.18~0.75 g/

cm^3 ，均值为 0.41 g/ cm^3 。该类包裹体应为主成矿期的原生包裹体。

III-2 型气液包裹体，其均一温度范围为 117~298 °C ($n = 148$)，均值为 198 °C，集中区间为 150~220 °C ($n = 108$)，冰点温度范围为 -2.9~-15.5 °C

($n = 148$), 对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4.80% ~ 19.05%, 均值为 11.5%, 流体密度为 0.79~1.04 g/cm³, 均值为 0.95 g/cm³。

3.3.3 含子矿物多相包裹体(Ⅳ型)

共测得 10 个含子矿物多相包裹体, 其均一温度范围为 279~430 °C ($n = 10$), 均值为 343°C, 子矿物熔化温度为 211~430°C。其中, 有 2 个包裹体的气液相均一温度(300°C 和 206 °C)低于子矿物熔化温度(430°C 和 370°C), 为过饱和盐水包裹体, 盐类子矿物与溶液同时被捕获(毛景文等, 2001); 有 1 个包裹体的气液相均一和子矿物熔化发生在同一温度(285°C), 为饱和盐水包裹体; 其余 7 个包裹体的气液相均一温度(279~390°C)都高于子矿物熔化温度(211~322°C), 为不饱和盐水包裹体。在测温过程中, 还发现有些浑圆状子矿物未随温度的升高而发生熔化。利用子矿物熔化温度在相应参数表(刘斌等, 1999)中获得其盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 32.39% ~ 39.8% ($n = 8$), 均值为 36.45%, 属高盐度流体。

3.3.4 石英脉内包裹体

石英脉中的包裹体均为气液两相包裹体, 其均一温度范围为 144~251 °C ($n = 33$), 均值为 193°C, 集中区间为 170~220°C ($n = 25$)(图 4), 冰点温度范围为 -2.8 ~ -15.3°C ($n = 33$), 对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4.65%~18.88%, 均值为 11.24%(图 3), 流体密度为 0.85~1.02 g/cm³, 均值为 0.96 g/cm³。

3.3.5 方解石脉内包裹体

方解石脉中的包裹体也都是气液两相包裹体, 其均一温度范围为 123~185°C ($n = 13$), 均值为 154.9°C(图 4), 冰点温度范围为 -2.1 ~ -8.4°C ($n = 13$), 对应的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.55%~10.98%, 均值为 6.22%(图 3), 流体密度为 0.92~0.99 g/cm³, 均值为 0.96 g/cm³。

3.4 激光拉曼探针分析

在流体包裹体均一温度、盐度测量的基础上, 本文还对各类流体包裹体进行了激光拉曼探针分析, 测点数量为 32 个。

测试结果(图 5)显示, 在矿化白岗岩和石英团块中, I 型包裹体主要成分是 CO₂ 和 H₂O。II 型包裹体的气相成分主要是 CO₂, 含少量 CH₄ 和 N₂。III-1 型气液包裹体的气相成分也是以 CO₂ 为主, 含少量 CH₄; III-2 型气液包裹体的气相成分主要是 CO₂ 和 H₂O, 含少量 CH₄ 和 N₂。IV 型包裹体中的浑圆状子

矿物为 CaCO₃, 这恰好与该矿物未随温度的升高而熔化的现象相吻合, 因为 CaCO₃ 的溶解度随温度升高而降低; 立方体状子矿物未检出拉曼谱峰, 推测该子矿物主要为石盐及少量钾盐。石英脉中包裹体的气相成分以 CO₂ 和 H₂O 为主, 含少量 CH₄ 和 N₂。

4 讨论

4.1 成矿流体性质

白岗岩型铀矿床主要由岩浆结晶分异作用形成(Nex et al., 2005), 因此, 研究区的主成矿温度范围为 316~575°C, 均值为 472°C, 集中于 470~530°C, 其流体属岩浆晚期残余高温流体; 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.55%~9.60%, 均值为 6.14%, 为低盐度流体, 同样说明成矿流体来源于岩浆热液; 其气相成分以 CO₂ 为主, 含少量 CH₄。

根据包裹体显微特征、均一温度、盐度(图 6)及密度等, 矿化白岗岩和石英团块内的 III-2 型气液包裹体(即次生包裹体)应与石英脉中包裹体属同一期次的包裹体, 其均一温度范围为 117~298°C, 均值为 198°C, 集中于 150~220°C, 为中-低温热液; 其盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4.65%~19.05%, 均值为 11.5%; 流体密度为 0.79~1.04 g/cm³, 均值为 0.95 g/cm³。该期流体主要是对铀成矿进行后期叠加改造。

方解石脉中包裹体的均一温度范围为 123~185°C, 均值为 155°C, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.55%~10.98%, 均值为 6.22%, 为低温低盐度流体, 属成矿后流体, 与成矿后的碳酸盐化相关。

4.2 成矿流体的不混溶性

主成矿期的流体明显具有不混溶性, 主要表现为: ① 在矿化白岗岩和石英团块中, I 型、III 型、IV 型和 V 型包裹体经常共存; ② II 型包裹体中 CO₂ 的气相分数为 15%~90%, 变化很大, 既有富 H₂O 的, 也有富 CO₂ 的, 且与 IV 型包裹体共存, 均一温度相近, 表明它们是 2 种不混溶的流体被同时捕获; ③ CaCO₃ 子矿物的存在表明白岗岩在侵入罗辛组 and 卡里毕比组大理岩的过程中, 与之发生了脱碳反应, 使包裹体气相中 CO₂ 含量增高, 导致岩浆更易“沸腾”, 同时捕获了残留的 CaCO₃ 矿物。

研究表明, 中-酸性岩浆通过一定程度的岩浆结晶分异作用使岩浆中挥发分过饱和, 从而造成流体相和熔体相的不混溶作用, 形成中-高盐度流体(Heinrich, 2007)。因此, 主成矿期流体为高温、低

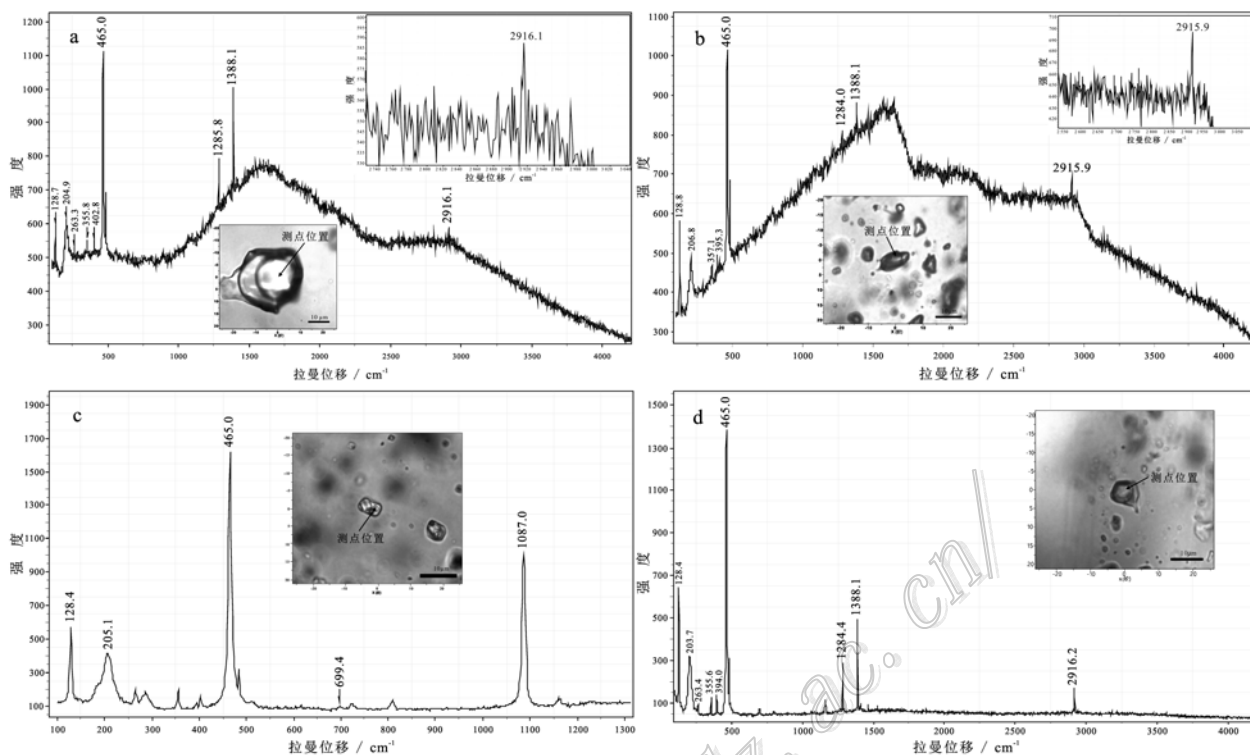


图 5 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体激光拉曼光谱图

a. II 型包裹体气相成分; b. III-1 型气液包裹体气相成分; c. IV 型包裹体子矿物成分; d. 石英脉中包裹体气相成分

Fig. 5 Laser Raman spectra of fluid inclusions of alaskite-type uranium deposits in Gaudeanmus area, Namibia

a. Raman spectra of vapor in type II; b. Raman spectra of vapor in type III-1; c. Raman spectra of solid in type IV;

d. Raman spectra of vapor in quartz vein

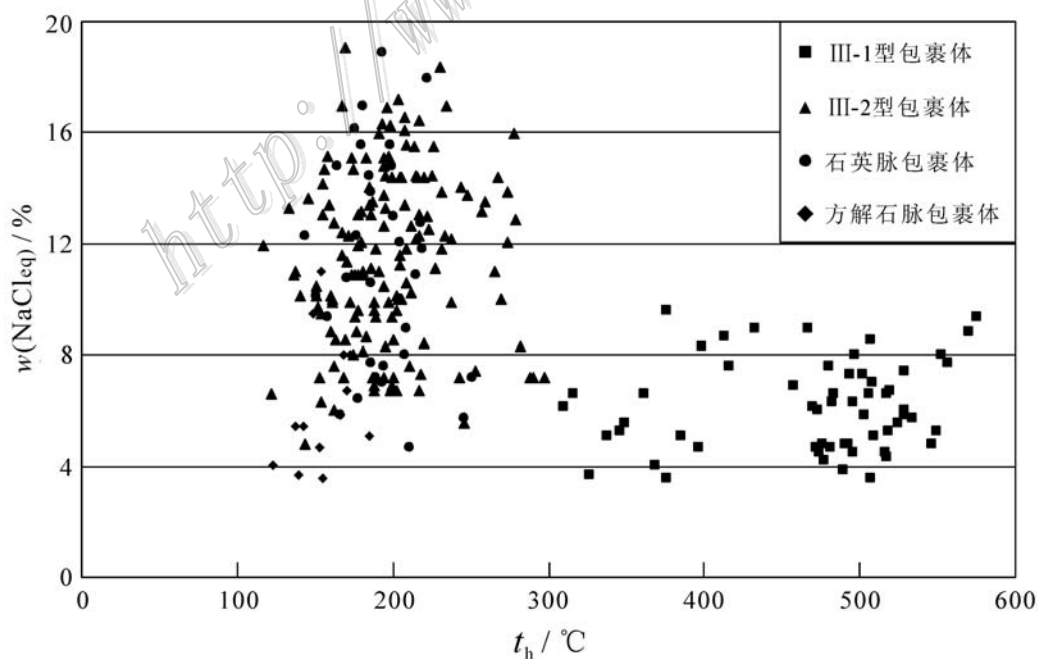


图 6 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿床流体包裹体均一温度-盐度图解

Fig. 6 Diagram showing homogenization temperature versus salinity of fluid inclusions of alaskite-type uranium deposits in Gaudeanmus area, Namibia

盐度及中等密度的岩浆热液,而Ⅳ型包裹体很可能是主成矿期成矿流体发生沸腾作用时捕获的,其所对应的高盐度并非原始成矿流体的特征。成矿流体减压沸腾大大降低了碳酸铀酰络离子的浓度,有利于铀的沉淀。

4.3 成矿的物理化学条件

前文已证实,研究区的主成矿期流体和后期叠加改造流体主要是气液两相包裹体,但主成矿期也出现了 CO_2 三相包裹体,因此,选择 CO_2 - H_2O 包裹体来计算主成矿期压力应相对准确些。按以上 CO_2 三相包裹体测定数据,应用 Flnconr 软件(Brown et al., 1989)计算求得研究区白岗岩型铀矿床的主成矿期压力范围为 247~284.5 MPa,平均为 257.3 MPa,相当于成矿深度为 8.1~9.3 km,平均为 8.4 km。通常,这样估算出的压力值要低于实际压力值,并且,由均一温度计算 CO_2 - H_2O 包裹体的压力值也只代表流体包裹体的最低捕获压力值,尽管如此,笔者认为这些压力计算值不失其参考意义。

同样,应用 H_2O - NaCl 体系,通过 Flnconr 软件求得后期热液叠加改造期的压力范围为 38.6~267.6 MPa,平均为 172.2 MPa,相应的深度为 1.3~8.7 km,平均为 5.6 km,表明研究区后期遭受到抬升、隆起和剥蚀,并可能与早白垩世基性岩脉的侵入密切相关(Harris 1995; Lord et al. 1996; Nex et al., 2002)。

4.4 成矿流体来源

上述研究表明,欢乐谷地区白岗岩型铀矿床的形成不仅仅只有前人所提到的岩浆结晶分异作用(Nex et al., 2005),还存在后期热液的叠加改造作用。铀矿物学方面的研究,也同样证实了这一点(陈金勇等,2013;2014)。

流体包裹体为确定成矿流体的成分提供了最直观的渠道,但同时也必须考虑到,矿物共生组合及围岩蚀变等可用以确定成矿热液成分的宏观因素,故而,在确定成矿流体的成分时,应综合这两者来进行分析(石少华等,2011)。野外观察和镜下鉴定表明,在主成矿期,白岗岩发生了岩浆晚期交代蚀变,包括钠长石化、白云母化、绿帘石化、硅化及少量钾长石化和萤石化,说明主成矿期的流体中含有 Na^+ 、 K^+ 、 Al^{3+} 、 Ca^{2+} 、 Fe^{2+} 及 SiO_4^{4-} 、 F^- 等。在本次对矿化白岗岩和石英团块内流体包裹体进行研究时,也发现了石盐、少量钾盐及 CaCO_3 子矿物,同样表明主成矿期的流体中富含 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 及 Cl^- 、 CO_3^{2-} 。

如前所述,该期成矿流体来源于岩浆热液,主要与晶质铀矿、钛铀矿、铌钛铀矿、铀石和铀钍石等原生铀矿物的形成有关。

矿化白岗岩遭受的后期热液蚀变有高岭石化、伊利石化、黄铁矿化、绿泥石化、绢云母化及赤铁矿化等,以及在石英脉中见有黄色的次生铀矿物(图2c),表明该期流体含有 K^+ 、 Al^{3+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 、 U^{6+} 及 SiO_4^{4-} 、 S^{2-} 等。成矿流体的盐度也是判断流体来源的一个重要标志(黄锡强等,2008)。叠加改造期流体的盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4.65%~19.05%,均值为 11.5%,属低盐度(<20%),表明该期成矿流体既可以是岩浆热液,也可以是变质热液或大气水热液(朱文戈等,2006)。欢乐谷地区的变质作用均发生于白岗岩侵入之前,因此,该期成矿流体不存在变质热液来源,而依据野外实地考察和岩芯观察分析,矿化白岗岩蚀变最强烈处位于断裂破碎带,矿化品位也更好,因此推测其成矿流体主要为岩浆期后热液,同时伴有大气水热液。该期成矿流体与沥青铀矿、脉状铀石及硅钙铀矿等次生铀矿物的形成有关,是对白岗岩型铀矿化的改造和叠加富集。

5 结 论

(1) 在纳米比亚欢乐谷地区,与白岗岩型铀矿床成矿密切相关的流体包裹体类型有纯气相包裹体、含 CO_2 三相包裹体、气液两相包裹体、含子矿物多相包裹体及纯液相包裹体。其气相成分主要是 CO_2 ,含少量 H_2O 和 CH_4 ;子矿物主要为石盐、 CaCO_3 和少量钾盐。矿化白岗岩和石英团块中的次生包裹体及石英脉中的包裹体均为气液两相包裹体,其气相成分主要是 CO_2 和 H_2O ,含少量 CH_4 和 N_2 ,属于同一期流体。

(2) 矿化白岗岩侵入于罗辛组和卡里毕比组的大理岩中,并与之发生脱碳反应,使得包裹体气相中 CO_2 含量增高,导致成矿流体更易“沸腾”,含子矿物包裹体正是在流体发生沸腾时捕获的,其所对应的高盐度并非原始成矿流体的特征。同时,沸腾作用也大大降低了成矿流体中碳酸铀酰络离子的浓度,有利于铀的沉淀,从而在成矿有利空间富集成矿。

(3) 白岗岩型铀矿床主成矿期的压力范围为 247~284.5 MPa,平均为 257.3 MPa,成矿深度为 8.1~9.3 km,平均为 8.4 km。热液叠加改造期的

压力范围为 38.6~267.6 MPa, 平均为 172.2 MPa, 成矿深度为 1.3~8.7 km, 平均为 5.6 km, 表明该地区在后期遭受到抬升、隆起和剥蚀。

(4) 该地区白岗岩型铀矿床的形成主要与岩浆结晶分异作用密切相关, 后期热液的叠加改造对铀的进一步富集起到了不可忽视的作用。主成矿期的成矿流体, 其温度为 470~530 °C, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 3.55%~9.60% (均值为 6.14%), 密度为 0.18~0.75 g/cm³ (均值为 0.41 g/cm³), 成分为 Na⁺、K⁺、Al³⁺、Ca²⁺、Fe²⁺ 等阳离子及 SiO₄⁴⁻、F⁻、Cl⁻、CO₃²⁻ 等阴离子, 属岩浆晚期的残余高温低盐度热液。叠加改造期的成矿流体, 其温度为 150~220 °C, 盐度 $w(\text{NaCl}_{\text{eq}})$ 为 4.65%~19.05% (均值为 11.5%), 密度为 0.79~1.04 g/cm³ (均值为 0.95 g/cm³), 成分为 K⁺、Al³⁺、Mg²⁺、Fe²⁺、Fe³⁺、U⁶⁺ 等阳离子及 SiO₄⁴⁻、S²⁻ 等阴离子, 属中-低温、低盐度热液, 来源于岩浆期后热液与大气水的混合。

References

- Bozzo A T, Chen J R and Barduhn A J. 1973. The properties of hydrates of chlorine and carbon dioxide[A]. In: Delyannis A and Delyannis E, eds. Fourth International Symposium on Fresh Water From the Sea[C]. 3: 437-451.
- Brown P E and Lamb W M. 1989. *P-V-T* properties of fluids in the system H₂O±CO₂±NaCl: New graphic presentations and implications for fluid inclusion studies[J]. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 53: 1209-1221.
- Burruss R C. 1981. Analysis of phase equilibria in C-O-H-S fluid inclusion[A]. In: Hollister L S and Crawford M L, eds. Short Course Handbook[C]. Mineralogical Association of Canada, 6: 39-74.
- Chen J Y, Fan H H, Chen D H, Gu D Z and Wang S Y. 2013. Research on the characteristics of uranium minerals of alaskite-type uranium deposit in the Gaudeamus Area, Namibia[J]. *Geological Review*, 59(5): 962-970 (in Chinese with English abstract).
- Chen J Y, Fan H H, Chen D H, Gu D Z and Wang S Y. 2014. Texture and structure of ore and genesis of alaskite-type uranium deposit in the Gaudeamus Area, Namibia[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 33(1): 91-97 (in Chinese with English abstract).
- Corner B. 1983. An interpretation of the aeromagnetic data covering the western portion of the Damara Orogen in South West Africa/Namibia[J]. Special Publication of the Geological Society of South Africa, 11: 339-354.
- Coward M P. 1983. The tectonic history of the Damara belt[J]. Special Publication of the Geological Society of South Africa, 11: 409-421.
- Cuney M. 1980a. Preliminary results on the petrology and fluid inclusions studies of the Rössing uraniferous alaskites[J]. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 83: 39-45.
- Cuney M. 1980b. Petrography geochemistry and fluid inclusion studies of the Rössing alaskites and surrounding gneisses[R]. Nancy: Centre de Recherches sur la Geologie de l'uranium. 58.
- Dubessy J, Hickel B and Pagel M. 1983. Radiolysis of water and organic matter: A source of free H₂ and O₂ in geological fluids[J]. *Terra Cognita*, 3: 178.
- Harris C. 1995. Oxygen isotope geochemistry of the Mesozoic anorogenic complexes in Damaraland, northwest Namibia: Evidence for crustal contamination and its effect on silica saturation[J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 122: 308-321.
- Heinrich C A. 2007. Fluid-fluid interactions in magmatic-hydrothermal ore formation[J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 65(1): 363-387.
- Heyen G, Dubessy J and Ramboz C. 1982. Modelling of phase equilibria in the system CO₂-CH₄-C₂H₆ below 50 and 100 bar: Application to inclusion fluids[J]. *Compte. Rendu. Acad. Sci. Paris*, 294: 261-264.
- Huang X Q, Chen Z L, Wang P A, Yang N and Zhi J. 2008. The study of fluid inclusion of Shazhou deposit in Xiangshan uranium ore-field[J]. *Journal of Geomechanics*, 14(2): 176-185 (in Chinese with English abstract).
- Kinnaird J A and Nex P A M. 2007. A review of geological controls on uranium mineralization in sheeted leucogranites within the Damara Orogen, Namibia[J]. *Applied Earth Science (Trans. Inst. Min. Metall. B)*, 116(2): 68-85.
- Kinnaird J A, Nex P A M and Freemantle G. 2009. Field guide to the Central Zone uranium occurrences[A]. SEG U-2009 Conference Field Trip, Namibia.
- Liu B and Shen K. 1999. Fluid inclusion thermodynamics[M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-290 (in Chinese).
- Longridge L, Gibson R L, Kinnaird J A and Armstrong R A. 2008. Timing of deformation and granite emplacement in the Central Zone of the Damara Orogen, Namibia[R]. School of Geosciences, University of the Witwatersrand Johannesburg.
- Lord J, Oliver G J H and Soulsby J A. 1996. Landsat MSS imagery of a

- Lower Cretaceous regional dyke swarm, Damaraland, Namibia: A precursor to the splitting of Western Gondwana[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 17: 2945-2954.
- Lu H Z, Li B L, Shen K et al., 1990. Geochemistry of fluid inclusions [M]. Beijing: Geological Publishing House. 1-242 (in Chinese).
- Lu H Z, Fan H R, Ni P, Ou G X, Shen K and Zhang W Z. 2004. Fluid inclusion[M]. Beijing: Science Press. 1-487(in Chinese).
- Mao J W and Li Y Q. 2001. Fluid inclusions of the Dongping gold telluride deposit in Hebei Province, China: Involvement of mantle fluid in Metallogenesis[J]. *Mineral Deposits*, 20(1): 23-36 (in Chinese with English abstract).
- Martin H and Porada H. 1977. The intracratonic branch of the Damara Orogen in Namibia: Discussion of geodynamic models[J]. *Precambrian Research*, 5: 311-338.
- Miller R McG. 1983. The Okavango Lineament, a fundamental tectonic boundary in the Damara Orogen of South West Africa/Namibia[J]. *Transactions of the Geological Society of South Africa*, 82: 349-361.
- Nex P A M, Herd D and Kinnaird J A. 2002. Fluid extraction from quartz in sheeted leucogranites as a monitor to styles of uranium mineralisation: An example from the Rössing area, Namibia[J]. *Geochemistry, Exploration, Environment, Analysis*, 2: 83-96.
- Nex P A M and Kinnaird J A. 2005. An investigation of the proportions of betafite, uraninite and secondary uranium minerals in SJ pit samples[R]. 1-35.
- Roesener H and Schreuder C P. 1994. 'Nuclear and fossil fuels-uranium' in mineral resources of Namibia[M]. Ch. 7.1, 59p.
- Shawn Kitt. 2008. Structural controls of auriferous quartz veins in the Karibib area, southern central zone of the Pan-African Damara belt, Namibia[D]. Supervisor: Alex Kisters. Master's thesis of Stellenbosch University. 148p.
- Shi S H, Hu R Z, Wen H J, Zhao X M, Song S Q and Wei W F. 2011. A tentative discussion on fluid inclusions in quartz vein of Shazijiang uranium ore deposit, northern Guangxi[J]. *Mineral Deposits*, 30(1): 33-44 (in Chinese with English abstract).
- Yang F Q, Mao J W and Wang Y T. 2004. The ore-forming fluids and metallogenesis of the Bulong gold deposit in Aikuji county, Xinjiang [J]. *Earth Science Frontiers*, 11(2): 501-514 (in Chinese with English abstract).
- Zhang S C and Tan C L. 2010. Uranium deposits of three country in Africa[M]. Beijing: Beijing Research Institute of Uranium Geology. 1-149 (in Chinese).
- Zhang W Z and Chen Z Y. 1993. The geology of fluid inclusions[M]. Wuhan: China University of Geosciences press. 1-240 (in Chinese).
- Zhu W G and Qin G Y. 2006. The content and method of metallogenic fluid[J]. *Gansu Science and Technology*, 22(9): 135-137 (in Chinese).

附中文参考文献

- 陈金勇, 范洪海, 陈东欢, 顾大钊, 王生云. 2013. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿物特征研究[J]. *地质论评*, 59(5): 962-970.
- 陈金勇, 范洪海, 陈东欢, 顾大钊, 王生云. 2014. 纳米比亚欢乐谷地区白岗岩型铀矿石结构构造及其成因意义[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 33(1): 91-97.
- 黄锡强, 陈正乐, 王平安, 杨农, 郅剑. 2008. 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.
- 刘斌, 沈昆. 1999. 流体包裹体热力学[M]. 北京: 地质出版社. 290页.
- 卢焕章, 李秉伦, 沈昆. 1990. 包裹体地球化学[M]. 北京: 地质出版社. 242页.
- 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. 487页.
- 毛景文, 李荫清. 2001. 河北省东坪碲化物金矿床流体包裹体研究: 地幔流体与成矿关系[J]. *矿床地质*, 20(1): 23-36.
- 石少华, 胡瑞忠, 温汉捷, 赵肖芒, 宋生琼, 魏文凤. 2011. 桂北沙子江铀矿床流体包裹体初步研究[J]. *矿床地质*, 30(1): 33-44.
- 杨富全, 毛景文, 王义天. 2004. 新疆阿合奇县布隆金矿床成矿流体及成矿作用[J]. *地学前缘*, 11(2): 501-514.
- 张书成, 谈成龙. 2010. 非洲三国铀矿[M]. 北京: 核工业北京地质研究院. 149页.
- 张文淮, 陈紫英. 1993. 流体包裹体地质学[M]. 武汉: 中国地质大学出版社. 240页.
- 朱文戈, 秦祐阳. 2006. 成矿流体研究内容和方法[J]. *甘肃科技*, 22(9): 135-137.