

文章编号: 1009-3850(2015)01-0033-10

准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组盐类 矿物流体包裹体特征

贾 斌², 文华国^{1,2}, 李颖博², 刘亚鹏², 王 涛²

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059)

摘要: 二叠系风城组为准噶尔盆地乌尔禾地区重要的勘探层系,也是成因非常特殊的深湖相含盐火山-沉积建造。通过钻井岩心观察、薄片鉴定、扫描电镜、X衍射、电子探针和包裹体显微测温等技术手段,较为详细地研究了风城组盐类矿物流体包裹体特征及成因。确定盐类矿物成矿流体属中-低温度(51.2~125.7℃)、中-高盐度(13.72%~24.93% NaCl)、中偏高密度(1.06~1.16 g/cm³)的H₂O-NaCl体系,并含有CH₄气体的高碱性热卤水;提出风城组深湖相含盐火山-沉积建造与湖底热液喷流活动有关,推测下渗湖水与幔源岩浆水混合形成的深部高碱性热卤水失衡回返,萃取易溶盐类物质,最终通过湖底喷流口以热卤水形式喷发,与湖盆底部低浓度水混合“兑卤成盐”,形成罕见、复杂盐类矿物组合。

关键词: 准噶尔盆地; 乌尔禾; 风城组; 盐类矿物; 流体包裹体; 成矿热液流体

中图分类号: TE133+.2

文献标识码: A

自20世纪60年代以来,热液活动、热液成矿作用和热水沉积岩已成为当今地学研究的最前沿热点之一。据国内外资料检索,关于热水沉积岩的报道主要集中在海相^[1-4],而湖相热水沉积岩的研究成果非常少^[5-8]。发育于准噶尔盆地乌尔禾地区下二叠统风城组深湖相地层中的一套成因非常特殊的“暗色细粒含盐火山-沉积建造”是风城组致密油藏最重要的储集岩类^[9-10]。在以往的研究中,对于这套深湖沉积建造中发育的大量盐类矿物,如硅硼

钠石、碳酸钠钙石、碳酸氢钠石(苏打石)、碳酸钠石(天然碱)、碳钠镁石、石盐等很少提及或未引起重视。值得思考的问题是,这些盐类矿物富集在高盐度、水体较深的咸化湖泊环境下,而滨、浅湖相带的盐类矿物沉积并不发育,这有悖于盐湖蒸发成盐作用原理。那么成盐物质来源于何处呢?早期的认识可能与同时期火山喷发活动相关的深部热液流体活动有关^[11]。本文通过盐类矿物流体包裹体的分析,为盐类矿物成因分析提供更充分的证据。

收稿日期: 2014-08-25; 改回日期: 2014-11-11

作者简介: 贾斌,男,1988年生,新疆克拉玛依人,硕士研究生,沉积学专业,储层沉积学方向

通讯作者:



文华国,男,1979年生,重庆万州人,副教授,博士后,长期从事储层沉积学、热水沉积学和层序地层学的教学和科研工作,先后负责或主研完成科研项目20余项,发表学术论文80余篇,其中第一作者或通讯作者30篇,SCI收录3篇,EI收录5篇,主编国家级教材2部,E-Mail: wenhuaguo@qq.com

资助项目: 国家自然科学基金国家自然科学基金项目(批准号: 41002033 41472088) 资助

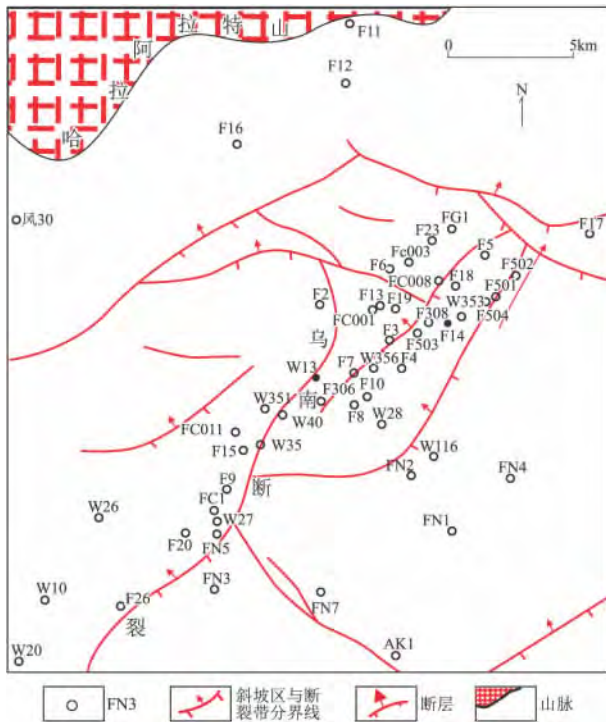


图1 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组构造及地理位置图
Fig.1 Tectonic setting of the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

1 地质概况

研究区位于准噶尔盆地乌尔禾地区山前冲断带的乌尔禾断褶带上(图1),在平面上可划分成断

裂带和斜坡带两个次级构造单元^[12-13]。上二叠统风城组沉积时期,乌尔禾地区处于前陆盆地短期伸展火山活动阶段^[14],大型边界断裂和深大断裂发育^[15],并衍生了许多次级断裂,为深部流体和油气运移及遮挡提供了有利条件^[9,16-17]。同时也伴随有频繁的火山活动^[18-20],以发育流纹质熔结凝灰岩、凝灰岩和云质凝灰岩等火山碎屑岩为典型特征,地温梯度高^[21]。风城组沉积时期,乌尔禾地区位于玛湖凹陷北西斜坡带,属水体安静、半封闭的深水咸湖环境^[22-26],以发育暗色细粒含盐火山-沉积建造为典型特征。

2 岩石学、矿物学特征

2.1 岩石学特征

研究区风城组地层的湖相沉积岩成分复杂,成因特殊,主要发育含云质粉砂岩、云质泥岩(图3A, E, J)、泥岩(图3C)、凝灰质白云岩(图3B, D, H, M, P)、白云岩(图3F)、泥质云岩(图3G)、含云凝灰岩、含云沉凝灰岩、云质凝灰岩(图3S, T)、熔结凝灰岩等岩类,统称“含云质岩”。这套复杂的岩石组合垂向上累计厚度大(400~1400m,平均800m),与半深湖-深湖相泥页岩的含量呈正相关性,而与陆源碎屑呈消长关系,可证明其沉积分布范围主要限于深水咸化湖泊沉积环境内。

表1 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组盐类矿物电子探针化学成分分析(wt%)

Table 1 Microprobe analyses (wt%) of the salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

矿物类型	样品数量	O	F	Na	Mg	Al	Si	Cl	K	Ca	Fe	Ti	Ce	Zr	Sr	C	S
白云石	10	45.41		0.51	15.71		1.27			25.82	2.26					9.01	
铁白云石	8	45.13		1.56	13.65	1.71	3.52			27.50	6.93						
方解石	8	38.53								48.83						12.64	
碳酸钠钙石	9	44.12		10.82			0.44			43.39					1.22		
硅硼钠石	27	34.61		5.41	0.78	4.55	23.20		1.48	0.65		8.08	2.54	12.17		5.16	1.37
石膏	1	53.49								29.51							17.01
氯碳钠钙石	1	4.58		33.77	1.52			52.53		5.16	1.99						0.47
碳酸钠镁石	4	40.94		28.56	26.06						4.44						

2.2 矿物类型及产状

通过对铸体薄片和X射线衍射资料的分析,风城组沉积有白云石(2%~56%)、方解石(3%~20%)、硅硼钠石(2%~65%)、碳酸钠钙石(5%~45%)、石膏(1%~20%)等盐类矿物。电子探针分析结果显示,上述盐类矿物的主要元素含量与该矿物的化学分子式基本一致(表1,图2)。典型盐类

矿物发育特征阐述如下。

(1) 白云石,有两种类型:第一种为湖底热液流体结晶沉淀的纹层状泥-微晶原生铁白云石^[5],晶体微小,小于0.03mm(图3D, E),不含流体包裹体或极微小,无法观察;第二种为次生作用形成的白云石(图3F, G, H),X射线衍射分析结果证明多为铁白云石^[11]。呈半自形、自形的粉晶、细晶结构,含有

丰富的流体包裹体,粒径多在 0.1~0.25mm,少数为 0.25~0.5mm。主要以胶结物或脉体的形式产出,镶嵌状或堆晶状散布于粉砂岩、泥质岩中,少量白云石呈自形、半自形粉细晶分布于微裂缝、层间缝、泄水通道及其周围。

(2) 碳酸钠钙石,在铸体薄片,无色透明,自形~半自形,单个晶体呈板条状或粒状(图 3J),可被茜素红染成红色(图 3K, L)。主要以夹层形式产出,于含云凝灰岩和含云泥岩中(图 3I),局部高度富集成碳酸钠钙石盐岩(图 3J, K)。

(3) 硅硼钠石,在铸体薄片,无色透明,呈自形及半自形,单个晶体呈楔形、短柱形、长条形,集合体呈楔形,粒径 0.75~3.5mm(图 3N, O)。扫描电镜下,晶体以板柱状为主(图 3P, Q, R, S),部分呈放射状(图 3M, T)。主要呈密集的条带状和透镜状夹于纹层状泥质微晶白云岩中^[27],局部高度富集成硅硼钠石盐岩(图 3O, Q, R)。另有部分以胶结物和脉体的形式存在,主要发育于沉凝灰岩中(图 3M)。

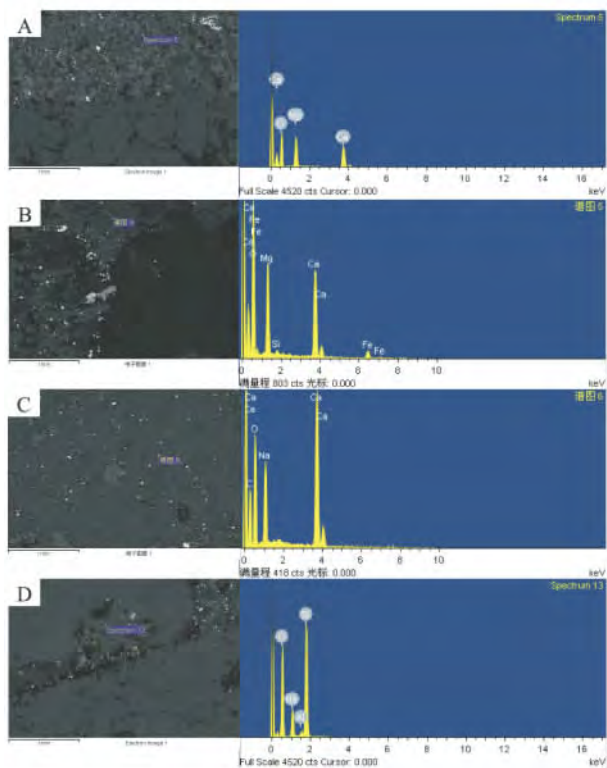


图2 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组典型盐类矿物电子探针化学成分分析图谱

A. F411, 白云石; B. FN210, 铁白云石; C. F1105, 碳酸钠钙石; D. F205, 硅硼钠石

Fig. 2 Spectrograms of representative salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

3 流体包裹体特征

3.1 样品与实验

流体包裹体分析是储层研究中的一种常用的实验分析手段,作为盆地流体活动的“见证者”或热液流体的“原始样品”,流体包裹体记录了热液流体活动时的流体组成、性质及物理化学条件^[28]。本次研究选取了8件样品,测试了57个流体包裹体均一温度数据和35个包裹体冰点温度数据,分析结果见表2。实验在成都理工大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室完成,仪器为英国 Linkam THM SG600 型显微冷热台、日本 Olympus BX51 型显微镜,配 100 倍长焦工作镜头。测试前用人造纯 H₂O 及 25% H₂O-CO₂ 包裹体(国际标样)进行了系统校正,测量温度范围为-180℃~+600℃,测试精度为±0.1℃。为进一步确定包裹体中的流体成分,在国土资源部成都地质矿产研究所对配套样品进行了激光拉曼分析,仪器为雷尼绍 InVia Reflex 显微激光拉曼光谱仪,实验条件为:温度 23℃,湿度 35%。

3.2 包裹体相态特征

8 件具代表性的透明状盐类矿物样品中,白云石样品 4 件,碳酸钠钙石样品 3 件,硅硼钠石样品 1 件。显微镜下显示有不同程度的富集流体包裹体,多具有富气液两相、单一气相和单一液相流态,且多为原生包裹体,表明包裹体中流体可反映主矿物成矿时的物理化学条件。最常见富气液两相包裹体,直径为 38.6~289.8μm,平均 94.3μm;充填度大于 60%,由气相和液相组成,气液比为 4%~12%,平均 8.9%;冷热台上加热均一为液相,形态为椭圆形和次圆形(图 4)。

3.3 流体包裹体的均一温度特征

白云石的流体包裹体的均一温度变化范围为 51.7~123.8℃,平均 91.9℃。其中白云石胶结物的均一温度变化范围为 51.7~123.8℃,平均 90.1℃,峰值集中在 80~90℃(图 5A);白云石脉体的均一温度变化范围为 116.8~120.9℃,平均 118.9℃。

碳酸钠钙石的流体包裹体的均一温度变化范围为 55.5~99.8℃,平均 77.3℃。其中碳酸钠钙石胶结物的均一温度变化范围为 55.5~97.5℃,平均 74.5℃,峰值集中在 70~80℃(图 5A);碳酸钠钙石脉体的均一温度变化范围为 81.2~99.8℃,平均 90.5℃,峰值集中在 90~100℃(图 5A)。

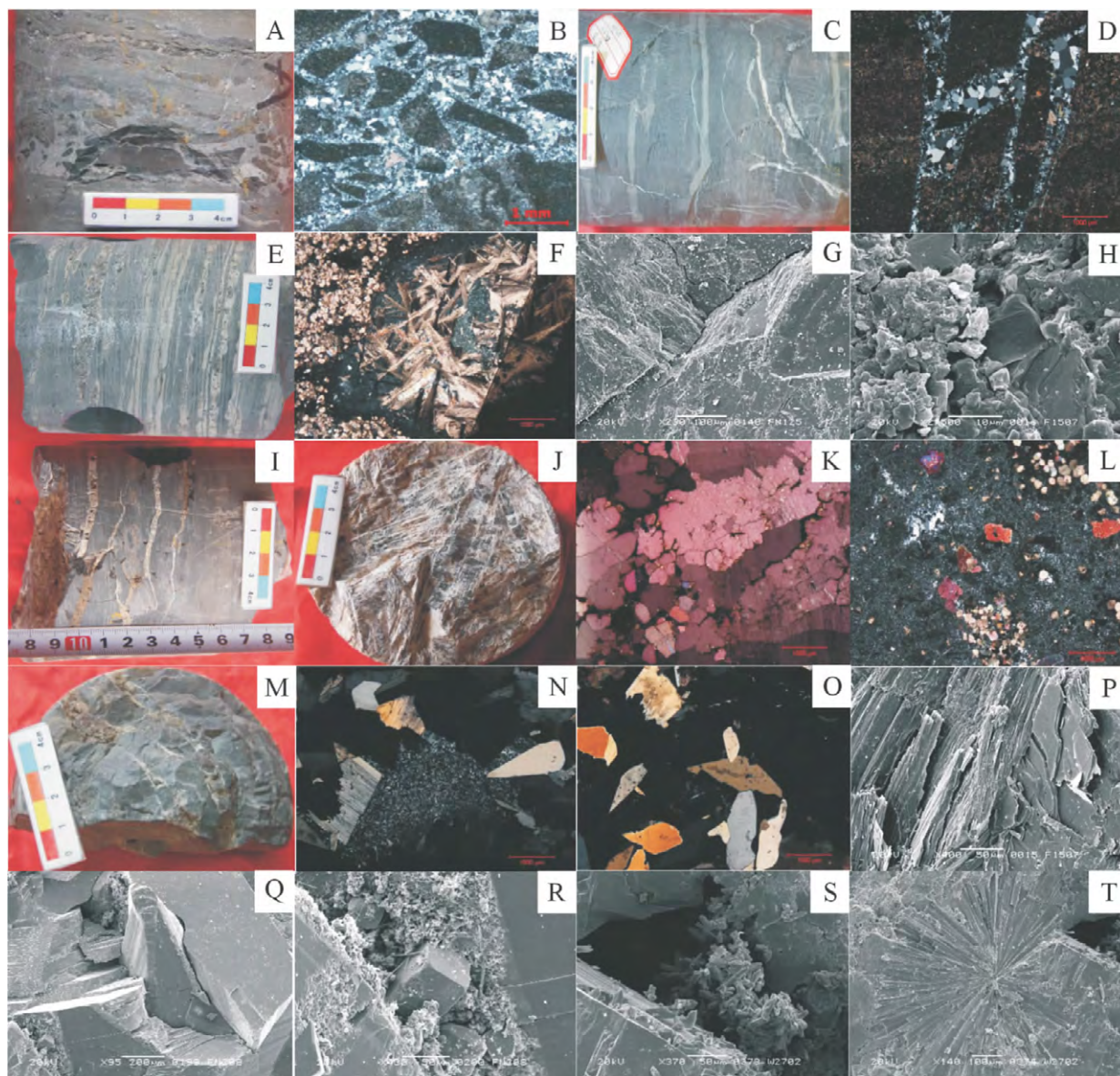


图3 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组湖相沉积岩、典型盐类矿物的宏观和微观照片

A. 含云质泥岩, 夹透镜状、条带状碳酸钠钙石、硅硼钠石及硅质角砾。F2625; B. 凝灰质白云岩, 热液喷流形成的碎屑被硅质胶结。F411; C. 泥岩, 网状高角度裂缝内充填硅硼钠石。F1510; D. 凝灰质白云岩, 网脉状构造特征。F411; E. 含云质泥岩, 夹多条白云石和硅硼钠石条带。FN136; F. 细晶白云岩, 白云石颗粒较脏, 多具雾心亮边结构。FN103; G. 泥质云岩, 粗晶白云石晶体之间呈镶嵌状。FN125; H. 凝灰质粉-细晶白云岩, 白云石晶体呈泥晶结构镶嵌状。F1507; I. 含白云质泥岩, 碳酸钠钙石矿物呈条带状分布。F50305; J. 碳酸钠钙石盐岩, 岩心中的板条状碳酸钠钙石晶体。FN520; K. 碳酸钠钙石盐岩, 盐类矿物呈云朵状。F2611; L. 硅质岩, 碳酸钠钙石晶体直径大, 晶形好。白云石呈细-中晶, 不均匀分布。F1515; M. 凝灰质白云岩, 高角度裂缝内充填硅硼钠石。F411; N. 凝灰质硅硼钠石盐岩, 硅硼钠石与凝灰质互层, 硅硼钠石晶体较大。FN129; O. 硅硼钠石岩, 含中-粗晶结构硅硼钠石。FN208; P. 凝灰质粉-细晶白云岩, 板柱状硅硼钠石晶体集合体。F1507; Q. 硅硼钠石岩, 中-粗晶结构硅硼钠石晶体间呈镶嵌状接触。FN208; R. 硅硼钠石岩, 硅硼钠石晶体晶间孔隙中充填粒状黄铁矿晶体及毛发状伊利石。FN208; S. 白云质凝灰岩, 细柱状硅硼钠石晶体集合体充填于晶间孔隙中。W2702; T. 白云质凝灰岩, 放射状硅硼钠石集合体与板柱状硅硼钠石晶体间呈镶嵌状接触。W2702

Fig.3 Macroscopic and microscopic photographs of the lacustrine sedimentary rocks and representative salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

表 2 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组典型盐类矿物流体包裹体显微测温结果

Table 2 Microthermometric data for the fluid inclusions in the representative salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region ,Junggar Basin , Xinjiang

序号	样号	宿主矿物	测试 样数	成因	类型	包裹体 大小(μm)	气/液(%)	Th(℃)	Tm(℃)	盐度 (% NaCl)
1	F1101	白云石胶结物	8	原生	气液	83.9 ~ 289.8	5 ~ 12	51.7 ~ 83.4	-43.5 ~ -11.8	15.76 ~ 17.34
2	F1104	白云石胶结物	11	原生	气液	38.6 ~ 98.0	4 ~ 10	86.7 ~ 123.8	-20 ~ -12.1	16.05 ~ 22.38
3	F1106	白云石胶结物	11	原生	气液	59.5 ~ 130.1	8 ~ 12	82.8 ~ 99.7	-20 ~ -12.1	16.05 ~ 22.38
4	F1519	白云石脉体	2	原生	气液	46.8 ~ 60.2	9 ~ 12	116.8 ~ 120.9	-17.6	20.67
5	F2611	碳酸钠钙石胶结物	8	原生	气液	68.1 ~ 188.9	7 ~ 11	55.5 ~ 71.7	-13.7 ~ -9.8	13.72 ~ 17.52
6	FN305	碳酸钠钙石胶结物	6	原生	气液	68 ~ 181.8	8 ~ 11	75.7 ~ 97.5	-15.2 ~ -12.3	16.24 ~ 18.80
7	FN125	碳酸钠钙石脉体	3	原生	气液	63.6 ~ 125.9	6 ~ 11	81.2 ~ 99.8	-12.5 ~ -11.2	15.17 ~ 16.43
8	FN129	硅硼钠石胶结物	8	原生	气液	49.5 ~ 106.8	7 ~ 12	51.2 ~ 125.7	-23.8 ~ -17.6	20.67 ~ 24.93

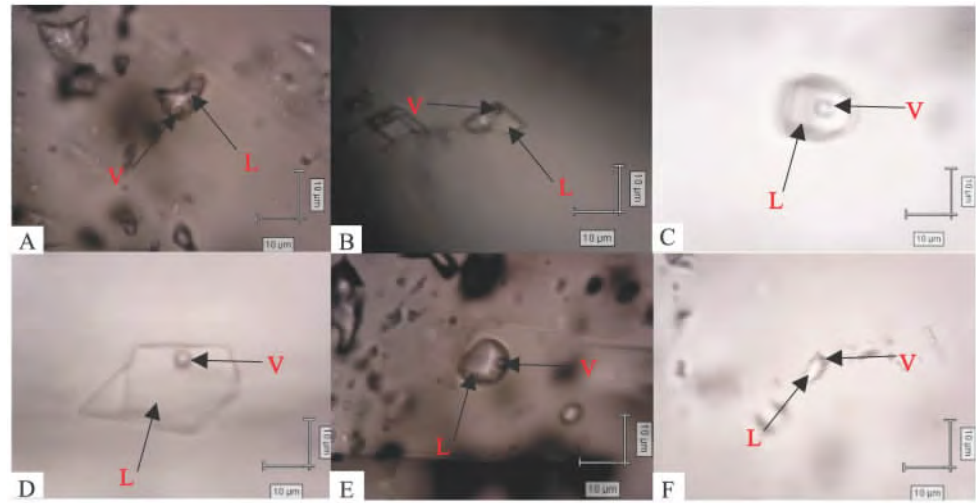


图 4 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组典型盐类矿物流体包裹体微观照片

A. 白云石胶结物的流体包裹体 ,F1104; B. 白云石脉体的流体包裹体 ,F1519; C. 碳酸钠钙石胶结物的流体包裹体 ,FN305; D. 碳酸钠钙石胶结物的流体包裹体 ,F2611; E. 碳酸钠钙石脉体的流体包裹体 ,FN125; F. 硅硼钠石胶结物的流体包裹体 ,FN129. L. 液相; V. 气相

Fig.4 Microscopic photographs of the fluid inclusions in the representative salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region ,Junggar Basin , Xinjiang

硅硼钠石胶结物的流体包裹体均一温度变化范围为 51.2 ~ 125.7℃ ,平均 78.1℃ 峰值集中在 70 ~ 80℃(图 5A) 。

3.4 流体包裹体的盐度特征

由冷冻法测定包裹体的冰点温度 根据 Bodnar (1993) ^[29] 总结的盐度-冰点关系表 ,可得到富气液两相包裹体流体体系的盐度值。其中白云石胶结物的流体包裹体盐度范围为 15.76 ~ 22.38wt% NaCl ,平均 18.17wt% NaCl(图 5B) ;白云石脉体的流体包裹体盐度为 20.67wt% NaCl(图 5B) 。

碳酸钠钙石的流体包裹体盐度范围为 13.72 ~ 18.80wt% NaCl ,平均 16.01wt% NaCl。其中碳酸钠钙石胶结物的流体包裹体盐度范围为 13.72 ~ 18.80wt% NaCl ,平均 16.05wt% NaCl(图 5B) ;碳酸钠钙

石脉体的流体包裹体盐度为 15.17 ~ 16.43wt% NaCl ,平均 15.80wt% NaCl(图 5B) 。

硅硼钠石胶结物流体包裹体盐度范围为 20.67 ~ 24.93wt% NaCl ,平均 22.65wt% NaCl(图 5B) 。

3.5 流体包裹体的激光拉曼特征

白云石胶结物的 100 ~ 4200cm⁻¹ 的激光拉曼全谱图中显示 ,1097cm⁻¹、299cm⁻¹、725cm⁻¹、176cm⁻¹ 均为白云石的拉曼特征峰 ,2915cm⁻¹、2913cm⁻¹、2917cm⁻¹ 处为气相甲烷伸缩振动的拉曼特征峰 ,3200cm⁻¹和 3400cm⁻¹附近宽波带为水的伸缩振动拉曼特征峰 ,表明该白云石胶结物中流体包裹体的气相主要是 CH₄ 气体 ,液相为 H₂O-NaCl 体系(图 5C) 。碳酸钠钙石胶结物的 100 ~ 4200cm⁻¹ 的激光拉曼全谱图中显示 ,图中均为 1103cm⁻¹ 的拉曼特征峰 ,表明

宿主矿物为碳酸钠钙石; 2917cm^{-1} 处为气相甲烷伸缩振动的拉曼特征峰, 3200cm^{-1} 和 3400cm^{-1} 附近宽波带为水的伸缩振动拉曼特征峰, 表明碳酸钠钙石胶结物中流体包裹体的气相同样也为 CH_4 气体, 液相也为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系(图 5D)。碳酸钠钙石脉体的 $100 \sim 4200\text{cm}^{-1}$ 的全谱图中 1103cm^{-1} 的拉曼特征峰为碳酸钠钙石, 2919cm^{-1} 、 2917cm^{-1} 处为气相甲烷伸缩振动的拉曼特征峰, 3200cm^{-1} 和 3400cm^{-1} 附近宽波带为水的伸缩振动拉曼特征峰, 表明碳酸钠钙石脉体中流体包裹体的气相同样也为 CH_4 气体, 液相也为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系(图 5E)。硅硼钠石胶结物的 $100 \sim 4200\text{cm}^{-1}$ 的全谱图中显示, 220cm^{-1} 、 306cm^{-1} 、 504cm^{-1} 、 579cm^{-1} 、 748cm^{-1} 、 1156cm^{-1} 均为硅硼钠石的拉曼特征峰, 2916cm^{-1} 处为气相甲烷伸缩振动的拉曼特征峰, 3300cm^{-1} 和 3500cm^{-1} 附近宽波带为水的伸缩振动拉曼特征峰, 表明硅硼钠石胶结

物中流体包裹体的气相主要是 CH_4 气体, 液相为 $\text{H}_2\text{O}-\text{NaCl}$ 体系(图 5F)。

3.6 流体包裹体的密度特征

在上述流体包裹体均一温度和盐度测定基础上(表 2; 图 5A、B), 根据刘斌(1999)^[30] 推导的密度公式分别计算了白云石、碳酸钠钙石和硅硼钠石中流体包裹体的密度(图 6A、表 3)。结果显示, 白云石胶结物的密度变化范围为 $1.06 \sim 1.12\text{g}/\text{cm}^3$, 平均 $1.09\text{g}/\text{cm}^3$ (图 6A); 白云石脉体的密度为 $1.09\text{g}/\text{cm}^3$ (图 6A); 碳酸钠钙石胶结物的密度变化范围为 $1.07 \sim 1.11\text{g}/\text{cm}^3$, 平均 $1.09\text{g}/\text{cm}^3$ (图 6A); 碳酸钠钙石脉体的密度变化范围为 $1.07 \sim 1.08\text{g}/\text{cm}^3$, 平均 $1.08\text{g}/\text{cm}^3$ (图 6A); 硅硼钠石胶结物的流体包裹体密度变化范围为 $1.09 \sim 1.16\text{g}/\text{cm}^3$, 平均 $1.13\text{g}/\text{cm}^3$ (图 6A)。

3.7 流体包裹体形成时的压力特征

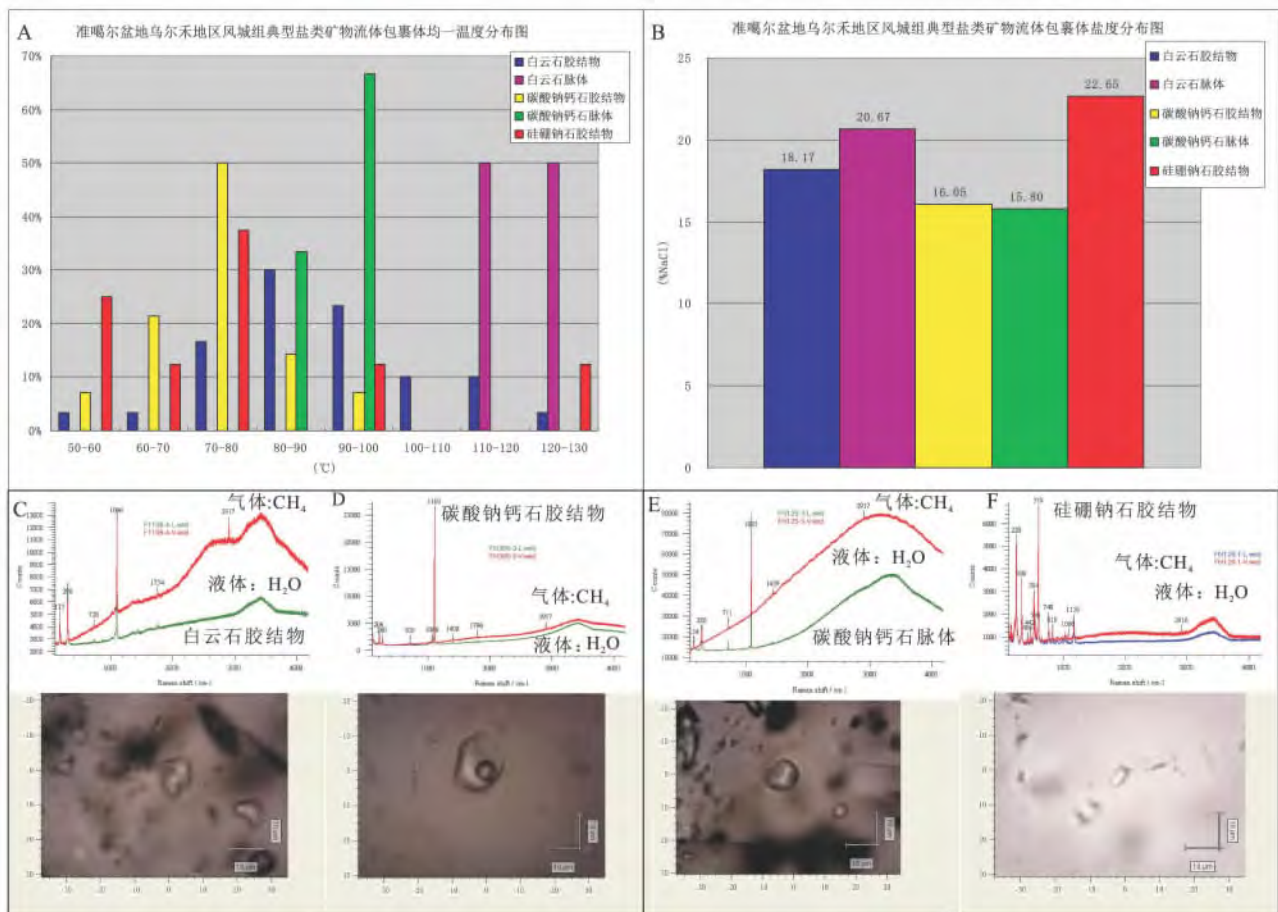


图 5 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组典型盐类矿物流体包裹体实验数据分布图

A. 流体包裹体均一温度分布图; B. 流体包裹体盐度分布图; C. 白云石胶结物的激光拉曼图谱; D. 碳酸钠钙石胶结物的激光拉曼图谱; E. 碳酸钠钙石脉体的激光拉曼图谱; F. 硅硼钠石胶结物的激光拉曼图谱

Fig. 5 Diagrams showing the distribution of the experimental data for the fluid inclusions in the representative salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

根据 Haas(1976)^[31] 推导的计算流体包裹体均一压力公式,计算出白云石胶结物的压力变化范围为 4.0~50.2MPa,平均 20.77MPa(图 6B),白云石脉体的压力变化范围为 40.3MPa;碳酸钠钙石胶结物的均一压力变化范围为 4.8~22.9MPa,平均 9.97MPa(图 6B),碳酸钠钙石脉体的压力变化范围为 13.0~24.6MPa,平均 18.85MPa;硅硼钠石胶结物的流体包裹体压力变化范围为 3.6~52.5MPa,平均 18.75MPa(图 6B,表 3)。

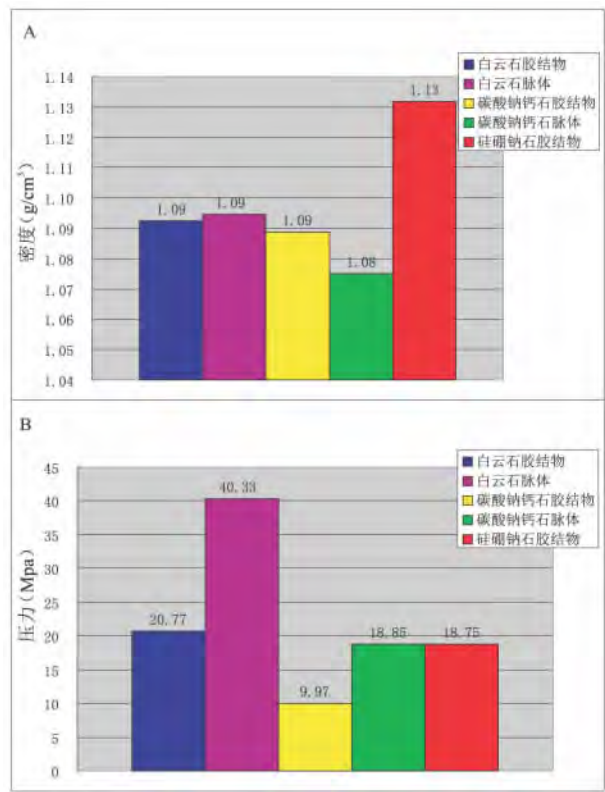


图 6 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组成矿流体的密度-压力分布图

A. 成矿流体的密度分布图; B. 成矿流体的压力分布图
Fig. 6 Density (A) and pressure (B) diagrams of the ore-forming fluids from the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

上述不同类型盐类矿物中的流体包裹体密度值与 Bodnar(1993)^[29] 的温度-盐度-密度相图上投点所得出的流体密度值具有高度的相似性(图 7),充分证明了由不同密度计算方法的相互印证所获得的流体密度值是可靠的。

4 讨论

4.1 成矿流体的来源和性质

已有的资料显示,研究区风城组并未发现代表

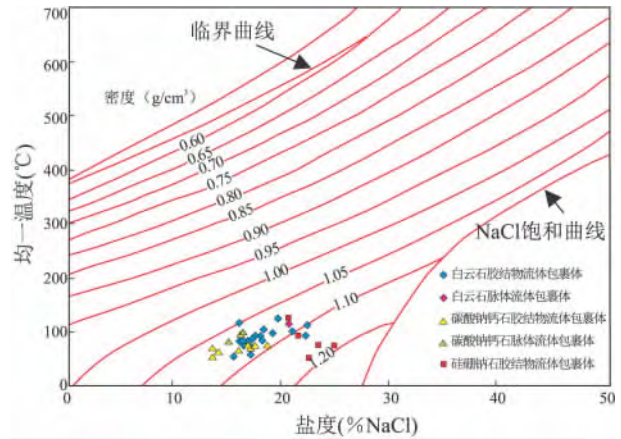


图 7 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组典型盐类矿物流体包裹体均一温度-盐度-密度相图

Fig. 7 Homogenization temperature-salinity-density phase diagram for the fluid inclusions in the representative salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

浅水环境的泥裂、雨痕,整体以灰色为主调,发育水平纹层,含有丰富的黄铁矿,代表了静滞还原的较深水沉积环境,在半深湖-深湖环境中发育的这套盐类矿物很难用正常的盐湖蒸发成盐模式来解释。另外,岩心上可见这套富集盐类矿物的(含)云质岩具有典型的热液内碎屑结构和热水网状、脉状构造(图 3A-D),可作为研究区风城组有热水沉积岩存在的重要证据,可直接指示热液流体的各级运移通道的位置^[32-38]。条带状构造不仅表明热水矿物在形成过程中具备良好的结晶条件,同时也间接证明了湖底存在相对封闭、低洼、持续稳定、宁静的热卤水汇集区(图 3E, I)。结合研究区风城组沉积期所具有的构造热背景综合分析,推测形成这套盐类矿物的成矿流体为深部高碱性热液流体,具有中-低温(51.2~125.7℃)、中-高盐度(13.72%~24.93% NaCl)、中偏高密度(1.06~1.16g/cm³)的 H₂O-NaCl 体系、并含有大量的 CH₄ 气体的热液流体性质。

4.2 成矿条件和成矿环境分析

各种类型和产状的盐类矿物形成时的物流化学条件并不相同,其主要原因是这些盐类矿物的形成位置和环境不同。具体表现为:

(1) 白云石脉体主要形成于相对较深成的高压环境,多呈自形、半自形白云石晶体,推测其形成环境具有相对封闭且有一定稳定成矿周期的特点,应为主喷流通道。其上覆压力有围岩的超静岩压力和湖水的静水压力,成矿热液流体的温度、盐度、密

度和压力均最高。

(2) 白云石胶结物、碳酸钠钙石脉体和硅硼钠石胶结物均形成于相对较浅成的中压环境,且这3种环境的参数依次降低,晶形较好,多为自形、半自形。相较于白云石脉体形成的环境,压力较小,成矿热液流体的温度和盐度也较低,应该为与主喷流通道相连通的、更靠近地表的分支喷流通道。其上

覆压力中的围岩的超静岩压力趋于减小,而湖水的静水压力基本不变。

(3) 碳酸钠钙石胶结物主要形成于相对更浅成的低压环境,晶形为半自形晶-自形晶,相对于白云石胶结物形成的环境,压力较小,成矿热液流体的温度和盐度也较低,应该为与分支喷流通道相连通的、更靠近地表的次级分支喷流通道。

表3 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组典型盐类矿物成矿热液流体物理化学参数

Table 3 Physical and chemical parameters for the ore-forming hydrothermal fluids of the representative salt minerals from the Fengcheng Formation in the Urho region, Junggar Basin, Xinjiang

矿物类型	分布位置	测试样数	数据类型	流体温度(℃)	流体盐度(% NaCl)	流体密度(g/cm ³)	成矿压力(MPa)
白云石脉体	主喷流通道	2	范围	116.8 ~ 120.9	20.67	1.09	40.30
			平均	118.9	20.67	1.09	40.30
白云石胶结物	分支喷流通道	30	范围	51.7 ~ 123.8	15.76 ~ 22.38	1.06 ~ 1.12	4.0 ~ 50.2
			平均	90.1	18.17	1.09	20.77
碳酸钠钙石脉体	分支喷流通道	3	范围	81.2 ~ 99.8	15.17 ~ 16.43	1.07 ~ 1.08	13.0 ~ 24.6
			平均	90.5	15.80	1.08	18.85
硅硼钠石胶结物	分支喷流通道	8	范围	51.2℃ ~ 125.7	20.67 ~ 24.93	1.09 ~ 1.16	3.6 ~ 52.5
			平均	78.1	22.65	1.13	18.75
碳酸钠钙石胶结物	次级分支喷流通道	14	范围	55.5℃ ~ 97.5	13.72 ~ 18.8	1.07 ~ 1.11	4.8 ~ 22.9
			平均	74.5	16.05	1.09	9.97

4.3 热液流体成矿机制

风城组沉积期,研究区应力复杂,次级基底断裂发育,火山活动频繁。幔源岩浆在沿基底断裂系统上升的过程中,由于围岩的压力和温度较低,析出大量的挥发组分,产生气泡,形成超压流体(岩浆水)。沿基底断裂系统上升的同时,湖底水也沿着断裂往下渗透,岩浆水和湖底水混合形成原始的超压混合热液流体,并可能处于某种平衡状态,当该平衡状态被打破,就会使混合热液流体回返上升。风城期深部混合热液流体在沿着断裂回返上升的过程中大量溶解、萃取岩层中的 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 F^- 和 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{2+} 等常量元素和络阴离子^[6],其强度随温度、压力的降低而减弱,逐渐形成高碱性的热液流体。接近湖底后,继续在构造应力和热液流体压力的双重作用下,突破并震碎喷流通道,的上覆沉积物,静水压力(开放系统)取代了超静岩压力(封闭系统)。由于压力的突然释放,引起热液流体的沸腾,甚至爆炸。随后低温低盐度湖水的迅速混入,热液流体被冷却和稀释,破坏了原有的化学平衡,发生相分离作用。气体(可能为 CH_4 、 H_2S 、 N_2 等)的分离散失,热卤水在与湖盆底部低浓度水混合“兑卤成盐”过程中形成罕见、复杂的盐类矿物组

合。在主喷流通道的相对较深成的高压环境中,中-低温度、中-高盐度、中偏高密度的热液流体受下渗湖水的影响,以析出白云石脉体为主;到达分支喷流通道的相对较浅成的中压环境后,受下渗湖水的影响加大,依次析出碳酸钠钙石脉体、硅硼钠石和白云石胶结物,生成并溶解大量的NaCl,渐变为中-低温度、中-高盐度和中偏高密度热液流体;到达次级分支喷流通道的相对更浅成的低压环境后,受下渗湖水的影响更大,进一步以胶结物的形式析出碳酸钠钙石,渐变为低温、中等盐度和中等密度热液流体。

5 结论

(1) 风城组深湖相“暗色细粒含盐火山-沉积建造”中发育丰富而特殊的盐类矿物,包括硅硼钠石、碳酸氢钠石(苏打石)、碳酸钠钙石、碳酸钠石(天然碱)、碳钠镁石、石盐等,主要以胶结物和脉体的形式产出。

(2) 盐类矿物成矿流体属中-低温度(51.2 ~ 125.7℃)、中-高盐度(13.72% ~ 24.93% NaCl)、中偏高密度(1.06 ~ 1.16g/cm³)的 H_2O -NaCl体系、并含有大量的 CH_4 气体的高碱性热卤水。

(3) 下渗湖水与幔源岩浆水混合形成的深部高碱性热卤水失衡回返, 萃取易溶盐类物质, 最终通过湖底喷流口以热卤水形式喷发, 与湖盆底部低浓度水混合“兑卤成盐”过程中形成罕见、复杂盐类矿物组合。

参考文献:

- [1] KELLEY D S, DELANEY J R, YOERGER D R. Geology and venting characteristics of the Mothra hydrothermal field, Endeavour segment, Juan de Fuca Ridge [J]. *Geology* 2001 29(10): 959 – 962.
- [2] TEAGLE D A H, ALT J C. Hydrothermal Alteration of Basalts beneath the Bent Hill Massive Sulfide Deposit, Middle Valley, Juan de Fuca Ridge [J]. *Economic Geology* 2004 99(3): 561 – 584.
- [3] 李江海, 牛向龙, 冯军. 海底黑烟囱的识别研究及其科学意义 [J]. *地球科学进展* 2004 19(1): 17 – 24.
- [4] KOSCHINSKY A, SEIFERT R, KNAPPE A, et al. Hydrothermal fluid emanations from the submarine Kick'em Jenny Volcano, Lesser Antilles island arc [J]. *Marine Geology* 2007 244(1 – 4): 129 – 141.
- [5] 郑荣才, 王成善, 朱利东, 等. 酒西盆地首例湖相“白烟型”喷流岩—热水沉积白云岩的发现及其意义 [J]. *成都理工学院学报* 2003 30(1): 1 – 8.
- [6] 郑荣才, 文华国, 范铭涛, 等. 酒西盆地地下沟组湖相白烟型喷流岩岩石学特征 [J]. *岩石学报* 2006a 22(12): 3027 – 3038.
- [7] 郑荣才, 文华国, 高红灿, 等. 酒西盆地青西凹陷下沟组湖相喷流岩稀土元素地球化学特征 [J]. *矿物岩石* 2006b 26(04): 41 – 47.
- [8] CHI G, LIU Y, DUBE B. Relationship between CO₂-dominated fluids, hydrothermal alterations and gold mineralization in the Red Lake greenstone belt, Canada 12th International Symposium on Water-Rock Interaction [J]. *Applied Geochemistry* 2009 24: 504 – 516.
- [9] 郭建钢, 赵小莉, 刘巍, 等. 乌尔禾地区风城组白云岩储集层成因及分布 [J]. *新疆石油地质* 2009 30(6): 699 – 701.
- [10] 冯有良, 张义杰, 王瑞菊, 等. 准噶尔盆地西北缘风城组白云岩成因及油气富集因素 [J]. *石油勘探与开发* 2011 38(6): 685 – 692.
- [11] 蒋宜勤, 文华国, 祁利祺, 等. 准噶尔盆地乌尔禾地区二叠系风城组盐类矿物和成因分析 [J]. *矿物岩石* 2012 32(2): 105 – 114.
- [12] 潘晓添, 郑荣才, 文华国, 等. 准噶尔盆地乌尔禾地区风城组云质致密油储层特征 [J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2013 40(3): 315 – 325.
- [13] 潘晓添. 准噶尔盆地西北缘风城组湖相热液白云岩形成机理 [D]. 成都: 成都理工大学 2013.
- [14] 冯建伟, 戴俊生, 鄯继华, 等. 准噶尔盆地乌夏前陆冲断带构造活动—沉积响应 [J]. *沉积学报* 2009 27(3): 494 – 502.
- [15] 王军, 戴俊生, 冯建伟, 等. 准噶尔盆地乌夏断裂带构造样式演化 [J]. *西南石油大学学报(自然科学版)* 2009 31(3): 29 – 33.
- [16] 惠荣耀. 准噶尔盆地西北缘的油气运移 [J]. *石油实验地质*, 1987 9(1): 65 – 73.
- [17] 耿春雁, 陈布科. 准噶尔盆地西北缘二叠系乌尔禾组隐蔽圈闭 [J]. *成都理工学院学报* 2002 29(2): 168 – 172.
- [18] 何登发, 贾承造, 董晓光, 等. 含油气区构造学研究进展 [J]. *石油勘探与开发* 2004 31(5): 1 – 7.
- [19] 孙玉善, 白新民, 桑洪, 等. 沉积盆地火山岩油气生储系统分析: 以新疆准噶尔盆地乌夏地区早二叠世风城组为例 [J]. *地学前缘* 2011 18(4): 212 – 218.
- [20] 朱世发, 朱筱敏, 刘继山, 等. 富孔熔结凝灰岩成因及油气意义——以准噶尔盆地乌—夏地区风城组为例 [J]. *石油勘探与开发* 2012 39(2): 162 – 171.
- [21] 张继军, 毕先梅. 成岩—极低级变质作用及油气勘探意义 [J]. *地学前缘* 1999 6(2): 251 – 258.
- [22] 张杰, 何周, 徐怀宝, 等. 乌尔禾—风城地区二叠系白云质岩类岩石学特征及成因分析 [J]. *沉积学报* 2012 30(5): 859 – 867.
- [23] 薛晶晶, 孙靖, 朱筱敏, 等. 准噶尔盆地二叠系风城组白云岩储层特征及成因机理分析 [J]. *现代地质* 2012 26(4): 755 – 761.
- [24] 鲁新川, 张顺存, 史基安. 准噶尔盆地西北缘乌尔禾—风城地区二叠系风城组白云岩地球化学特征及成因分析 [J]. *兰州大学学报(自然科学版)* 2012 48(6): 8 – 14.
- [25] 陈磊, 丁靖, 潘伟卿, 等. 准噶尔盆地玛湖凹陷西斜坡二叠系风城组云质岩优质储层特征及控制因素 [J]. *石油地质*, 2012 3: 8 – 11.
- [26] 匡立春, 唐勇, 雷德文, 等. 准噶尔盆地二叠系咸化湖相云质岩致密油形成条件与勘探潜力 [J]. *石油勘探与开发* 2012, 39(6): 657 – 667.
- [27] 孙玉善. 中国西部地区首次发现硅硼钠石 [J]. *石油与天然气地质* 1994 15(3): 264 – 265.
- [28] 于增慧, 翟世奎. 海底热液沉积物中流体包裹体的研究进展 [J]. *海洋地质与第四纪地质* 2000 20(1): 93 – 96.
- [29] BODNAR R J. Revised equation and table for determining the freezing point depression of H₂O–NaCl solutions [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1993 57(3): 683 – 684.
- [30] 刘斌, 段光贤. NaCl–H₂O 溶液包裹体的密度式和等容式及其应用 [J]. *矿物学报* 1987 7(4): 345 – 352.
- [31] HAAS J L. Physical properties of the coexisting phases and thermo-chemical properties of the H₂O component in boiling NaCl solution [J]. *US Geol. Surv. Bull.* 1976 1421A: 1 – 73.
- [32] 李朝阳, 王京彬, 肖荣阁, 等. 滇西地区陆相热水沉积成矿作用 [J]. *铀矿地质* 1993 9(1): 14 – 22.
- [33] BROWN A C. Sediment-host of Stratiform Copper Deposits [J]. *Geoscience Canada* 1993 19(3): 125 – 141.
- [34] 肖荣阁, 杨忠芳, 杨卫东, 等. 热水成矿作用 [J]. *地学前缘*, 1994 1(3 – 4): 140 – 147.
- [35] 王江海, 颜文, 常向阳, 等. 陆相热水沉积作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1998. 1 – 32.
- [36] 叶杰, 刘建明, 张安立, 等. 沉积喷流型矿化的岩石学证据——以大兴安岭南段黄岗和大井矿床为例 [J]. *岩石学报*, 2002 18(4): 585 – 594.

- [37] 刘建明,叶杰,张安立,等. 一种新类型热水沉积岩——产在湖相断陷盆地中的菱铁绢云硅质岩[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(7): 570–577.
- [38] 文华国. 酒泉盆地青西凹陷湖相“白烟型”热水沉积岩地质地球化学特征及成因[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.

Fluid inclusions in the salt minerals from the Permian Fengcheng Formation in the Urho region , Junggar Basin , Xinjiang

JIA Bin² , WEN Hua-guo^{1,2} , LI Ying-bo² , LIU Ya-peng² , WANG Tao²

(1. *State key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation , Chengdu 610059 , Sichuan , China;*

2. *Institute of Sedimentary Geology , Chengdu University of Technology , Chengdu 610059 , Sichuan , China)*

Abstract: The Permian Fengcheng Formation as the important hydrocarbon exploration target in the Urho region , Junggar Basin , Xinjiang is built up of the genetically special deep-lake salt-bearing volcanic-sedimentary formations. The detailed study of characteristics and genesis of the fluid inclusions in the salt minerals from the Permian Fengcheng Formation is based on the techniques such as core observation , thin-section examination , scanning electron microscopy , X-ray diffraction analysis , microprobe analysis and microthermometry of the inclusions. The ore-forming fluids of the salt minerals are assigned to the H₂O-NaCl systems with the moderate to low temperature (51.2 to 125.7℃) , moderate to high salinity (13.72% to 24.93% NaCl) , moderate to high density (1.06 to 1.16 g/cm³) , and high-alkaline thermal brines with CH₄ gases. The deep-lake salt-bearing volcanic-sedimentary formations are thought to be associated with the sublacustrine hydrothermal effusion in the Fengcheng Formation. It is speculated that the genetic mechanisms for the salt minerals are involved into the disequilibrium and inversion of the deep-seated high-alkaline thermal brines caused by the mixing of sinking lake water and mantle-derived magmatic water , extraction of soluble salts during the upward migration of the mixed hydrothermal brines , and the eruption of the hydrothermal brines from the sublacustrine vents and then mixing with the low-concentration lacustrine water at the bottom of the lakes , and the formation of the compositionally complicated salt minerals at last.

Key words: Junggar Basin; Urho; Fengcheng Formation; salt mineral; fluid inclusion; ore-forming hydrothermal fluid