

文章编号: 1000-0550(2012)02-0205-14

三塘湖盆地二叠系陆相热水沉积方沸石岩特征及成因分析^①

李红^{1,2} 柳益群^{1,2} 梁浩³ 罗权生³ 李玮^{1,2} 周小虎^{1,2}
焦鑫² 杨锐² 雷川⁴ 孙芹²

(1. 大陆动力学国家重点实验室(西北大学) 西安 710069; 2. 西北大学地质学系 西安 710069;
3. 中国石油吐哈油田公司勘探开发研究院 新疆哈密 839000; 4. 中国科学院兰州油气资源研究中心 兰州 730000)

摘要 在新疆三塘湖盆地野外露头及钻井中二叠统芦草沟组(P₂l)厚层黑色泥岩中发现多层白色纹层状方沸石岩。根据主要造岩矿物特征,将其大致分为两类,第一类为方沸钾长白云岩,主要造岩矿物包括细粒方沸石、泥晶钾长石(透长石、正长石)、泥晶白云石、泥晶铁白云石等,碳酸盐矿物以高的Fe、Mn含量为特征;第二类为方沸硅质岩与硅质方沸石岩,以细粒方沸石及泥晶石英为主,含少量碳酸盐。扫描电镜观察方沸石以自形的四角三八面体少见,多为它形块状或无定形胶体状。样品主量元素以富SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、贫TiO₂为特征,微量元素Th、Nb、Ti强烈亏损,Sr/Nd比值为44.73~831.78,Nb*介于0.02~0.17之间。ΣREE总量偏低7.33~20.619 μg/g,LREE/HREE为4.77~11.20,δEu 0.60~0.99,略具负异常,δCe 0.96~1.04,基本无亏损,稀土配分曲线为较平缓的右倾。方沸石岩微量元素、稀土元素配分曲线与研究区早、中二叠世玄武岩、粗面岩及上地壳有较大差异。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr介于0.705 118~0.706 438之间,低于同时期全球海水及中上二叠统海相碳酸盐的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值,¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd介于0.512 454~0.512 713之间,εNd介于-0.81~3.84之间,表明造岩热液可能含有幔源组分。通过详细的岩石学、地球化学及Sr、Nd同位素研究,认为这是一类与陆相裂谷盆地湖底热泉喷流作用有关的热液沉积岩组合,热液组除了有壳源物质及大气水等的混入外,可能还有深部物质的参与。

关键词 三塘湖盆地 中二叠统 陆内裂谷 方沸石 地球化学 湖底热液 热水沉积岩

第一作者简介 李红,女,1975年出生,讲师,博士,沉积地质学, E-mail: lihong2008@nwu.edu.cn

中图分类号 P578.974 **文献标识码** A

不论是现代还是古代,裂谷及大洋中脊等拉张环境中的热水(液)活动都非常活跃,形成丰富多样的热水(液)沉积物,造岩热液的来源也不尽相同^[1-17]。据报道,大多数海相及陆相热水沉积岩或沉积物的热液组分可以由大气水、海水、湖水及地下水等组成^[10,13],也可以由前者与盆地内部的热卤水相混合^[14,17-21],或者由前者与相邻岩体发生水-岩反应后产生的热液流体构成^[2-6,12,13,22-27]。能与之发生水-岩反应的岩体既可以包括地壳表层物质、陆源沉积岩或表层沉积物^[1,11,28,29],也可以是炽热的岩浆岩体,如花岗岩、辉绿岩、玄武岩^[2-6,10,12,13,22-25,27]等。关于地幔来源的热水(液)沉积岩则很少见^[16,30]。作者所在的研究团队近年来在三塘湖地区跃进沟剖面及盆地五口钻井中二叠统芦草沟组湖相暗色泥岩中发现了多层纹层状白色岩系,主要造岩矿物为细粒方

沸石、泥晶石英、泥晶钾长石、泥晶铁白云石、泥晶白云石和泥晶方解石等,根据全岩粉晶X射线衍射及显微镜下观察将这套岩石组合类型分为方沸钾长白云岩、方沸硅质岩及硅质方沸石岩,简称为方沸石岩。本文以露头剖面及钻井取芯样品为研究对象,通过详细的岩石学、地球化学和同位素研究,认为这可能是一类与陆相裂谷盆地湖底热泉喷流作用有关的热液沉积岩组合,热液除了大气水及壳源组分外,可能主要来自于幔源物质。

1 地质背景及采样

三塘湖盆地位于新疆东北部,是北疆一系列中小型陆相含油气叠合盆地之一,北与蒙古共和国邻接,南隔巴里坤盆地与吐哈盆地相望,整体呈北西—南东向狭长带状展布,面积约23 000 km²(图1)。盆地夹

^①国家自然科学基金项目(批准号:40802024),大陆动力学国家重点实验室自主研究课题(批准号:BJ11054)资助。
收稿日期:2011-01-20;收修改稿日期:2011-04-21

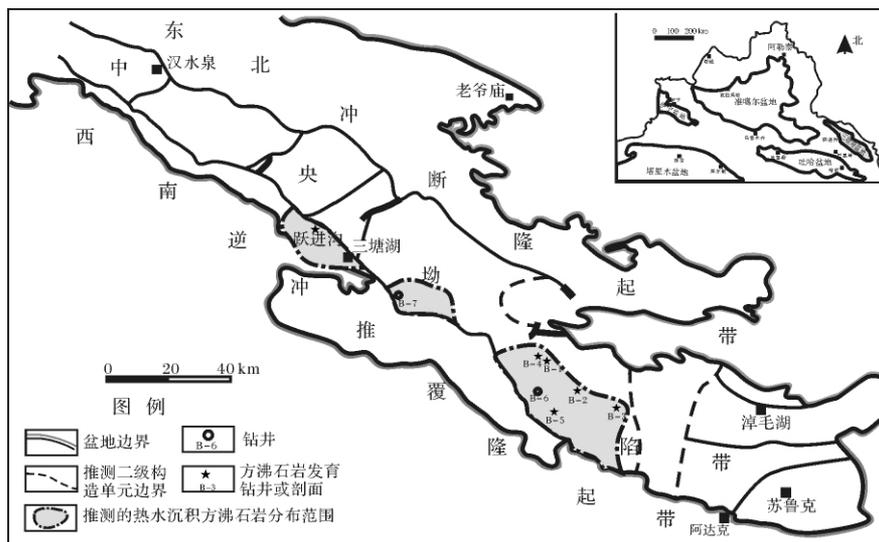


图1 三塘湖盆地位置及方沸石岩分布简图

Fig. 1 Skeleton map of the location of Santanghu Basin and the distribution of analcrite

持于阿尔泰山与克拉麦里—莫钦乌拉山之间 构造位置处于西伯利亚板块与准噶尔—哈萨克斯坦板块的碰撞接合部位,是一个在前早石炭世褶皱基底之上,以发育晚石炭—中二叠世陆内裂谷盆地、晚二叠世—中生代拗陷盆地及山间拗陷盆地为特点的小型叠合盆地^[30]。

三塘湖盆地晚古生代为洋陆转换的重要时期,早石炭世以发育古亚洲洋闭合后的残留海及海陆交互的陆源碎屑岩沉积为特点。晚石炭世—中二叠世,在造山后期区域伸展断陷背景下,三塘湖地区进入陆内裂谷盆地发育期^[31],早二叠世,以发育同一系列沉积正断层组合为主要特征,构成由断垒、断堑等组成的断陷带,发育陆相酸性—基性火山熔岩为主,在火山喷发间歇期沉积了具有近源快速堆积为特点的由粗向细演变的陆相及海陆交互碎屑岩建造。中二叠世,以发育洪积、冲积扇—河流—湖泊沉积体系及由基性到中性系列的火山岩(玄武岩、安山岩等)为特征。晚二叠世以来,由于经历了多期强烈的挤压兼走滑构造作用的改造,盆地早期的正断层被反转为一系列不同级次、不同方向的冲断及逆冲推覆断裂。

中二叠统自下而上分为乌拉泊组、井井子沟组、芦苇沟组和条湖组(相当于乌鲁木齐地区的红雁池组,图2),代表了湖盆初始扩张—鼎盛—逐渐消亡的沉积旋回。根据野外剖面及钻井岩芯观察,中二叠世芦苇沟期为湖盆发育鼎盛期,以滨浅湖—半深湖相沉积为特点,发育以厚层黑色、深灰色泥岩、页岩夹薄层泥灰岩、泥云岩、凝灰岩为特征的岩性组合,伴生矿物

有黄铁矿、重晶石等。

本次研究选择地表跃进沟剖面芦苇沟组样品3件,吐哈油田三塘湖盆地钻井芦苇沟组样品5件,合计8件。所有样品均为薄层状,跃进沟剖面样品由老至新编号依次为:YJG-02(玻屑晶屑凝灰岩)、YJG-41(晶屑凝灰岩)、YJG-45(硅质方沸石岩);钻井方沸石岩样品采自B-3钻井,深度1 717~1 722 m之间,取样编号与取样深度依次为: B-3-3(样品编号), 1 719.56 m; B-3-2, 1 720.11 m; B-3-6, 1 720.45 m; B-3-4, 1 720.61 m; B-3-1, 1 720.96 m。

2 方沸石岩组成及结构特征

2.1 方沸石岩宏观特征

跃进沟剖面芦苇沟组方沸石岩主要为厚度2.5 cm左右的灰黄色或黄白色薄层,与灰色泥岩、泥晶灰岩、泥晶白云岩、凝灰岩等互层(图3A、B、C),其中泥岩与方沸石岩的厚度比例约为10:1~20:1,在222 m厚度的剖面上方沸石岩发育约9层。在钻井岩芯上方沸石岩为白色薄层,单层厚度约0.5~1.5 cm左右,常与上覆、下伏泥岩、碳酸盐岩产状一致。以取样井B-3井为例,2 m岩芯大致发育约8~12层,该夹层坚硬致密,遇2%稀盐酸不起泡或微泡。未观察到与顶、底的黑色泥岩明显的角度不整合关系(图3D、E),尽管邻井同层位脉体较发育,该井方沸石岩发育层段未观察到有脉体切穿周围地层特征,初步判断与周围暗色泥岩大致同期产出,黑色泥岩内化石稀少,偶见细小的、新疆二叠系广泛分布的芦木化

石碎片, 邻井相同层位可见鱼鳞化石碎片等, 说明当时沉积水体较深, 主体为半深湖沉积。

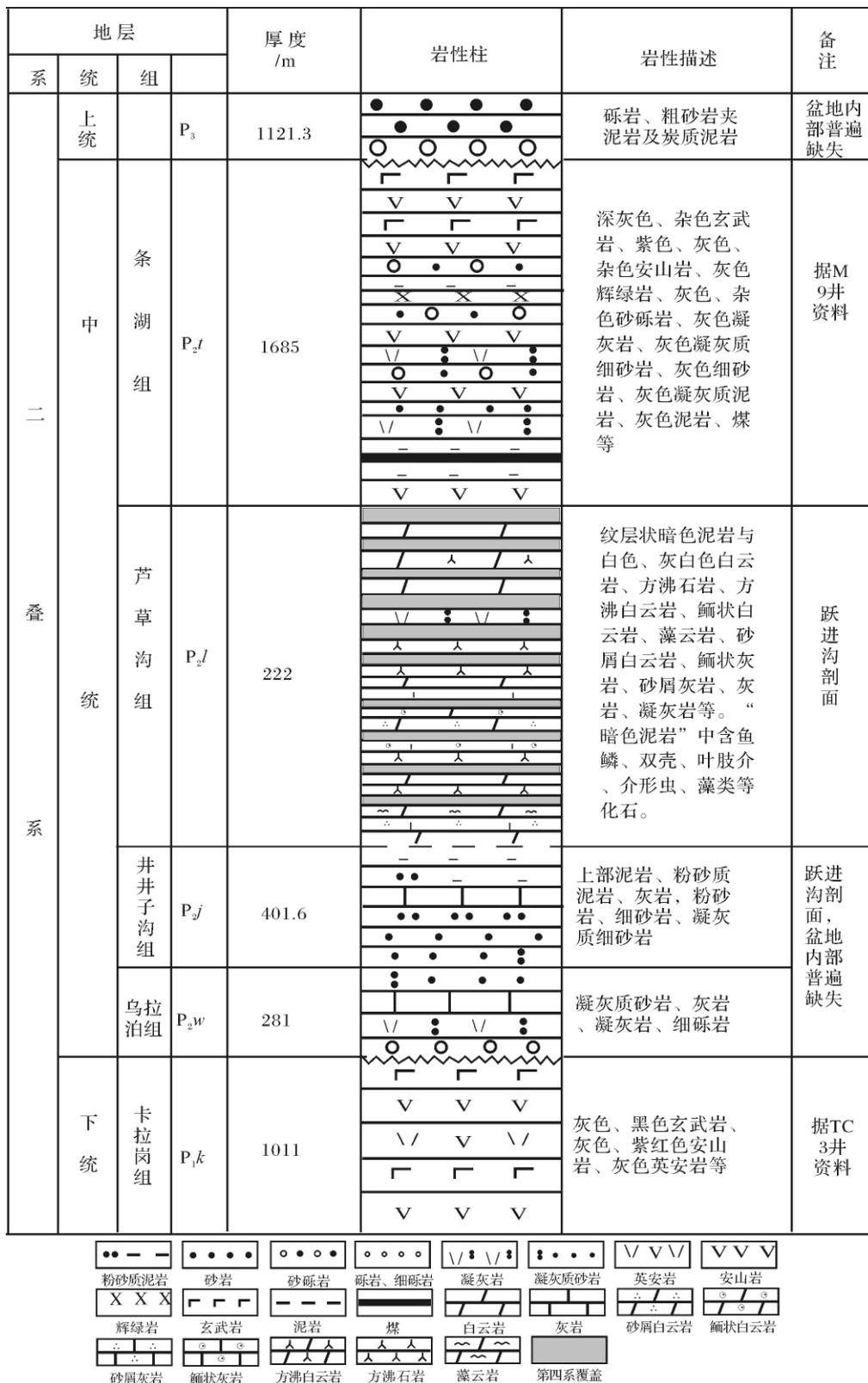


图 2 三塘湖盆地二叠系地层简表(钻井资料据吐哈油田 2003)

Fig. 2 Draft stratigraphic column of Permian in Santanghu Basin (the wells data was according to Turpan-Hami Oil Company , 2003)



图3 三塘湖盆地芦草沟组及方沸石岩特征

A、跃进沟剖面芦草沟组(P_2l) 为陆源沉积岩、碳酸盐岩、凝灰岩及热水沉积方沸石岩互层,剖面风化严重;B、跃进沟剖面 热水沉积方沸石岩为黄白色薄层,样品 YJG-15 取样点,地质锤长度约 28 cm;C、跃进沟剖面芦草沟组晶屑凝灰岩,样品 YJG-11 取样点;D、E、黑色泥岩中的白色薄层为方沸石岩, B-3 井,图 E 中 OLYMPUS 镜头盖直径 58 mm;F、白色薄层为方沸石岩,发育变形层理, B-4 井;G、水平纹层,图下方不透明矿物层为黄铁矿层,单偏光 $\times 10$ B-3 井;H、芦草沟组方沸石岩、泥晶灰岩与深灰色泥岩构成变形层理, B-2 井;I、泥灰岩质同沉积角砾岩,网状碳酸盐脉发育, B-6 井。

Fig. 3 The features of Lucaogou Formation(P_2l) and analcrite, Middle Permian, Santanghu Basin

2.2 芦草沟组特征

钻井芦草沟组由黑色厚层泥岩、深灰色至浅灰色泥晶白云岩、白云质泥岩、泥晶灰岩等构成。取样井芦草沟组主要发育水平层理(图 3D、E、G),局部可见同沉积变形层理。部分邻井芦草沟组则可见大量顺层、切层的网状碳酸盐脉,同沉积变形、滑塌等沉积构造(图 3F、H、I)。滑塌层理发育段岩性多已角砾化,角砾之间网状碳酸盐脉及暗色纹层(可能为有机质纹层或藻类)也很发育(图 3F、H),形成较复杂的沉积构造,指示了盆地同沉积期热流上涌等活动比较频繁。这些网状脉体,从纵向上看,除了在芦草沟组比较发育外,其下伏地层中也可见到类似构造。露头和钻井发现的方沸石岩主要在盆地中央拗陷南部,沿着西南缘逆冲推覆带展布(图 1)。

2.3 方沸石岩矿物成分

显微镜、电子探针(表 1)、全岩粉晶 X 衍射及能谱分析(图 4)表明,方沸石岩矿物种类丰富,主要矿物有方沸石(含量 13.9% ~ 62.2%)、石英(含量 37.8% ~ 68.7%)、白云石(含量 39% ~ 51.6%)、透长石及正长石(含量 21.7% ~ 24.3%)(表 1、图 4),次要矿物包方解石、钠长石、钡长石、黄铁矿、重晶石、菱铁矿、钛铁矿、磷灰石等。根据矿物成分特点将样品分为两类,第一类包括 B-3-2、B-3-3 两件样品,主要造岩矿物为白云石、铁白云石、透长石和方沸石,定名为方沸钾长白云岩;第二类包括 B-3-1、B-3-4、B-3-6 等三件样品,主要造岩矿物为方沸石、石英,及少量碳酸盐(含铁白云石及方解石),定名为方沸硅质岩和硅质方沸石岩。

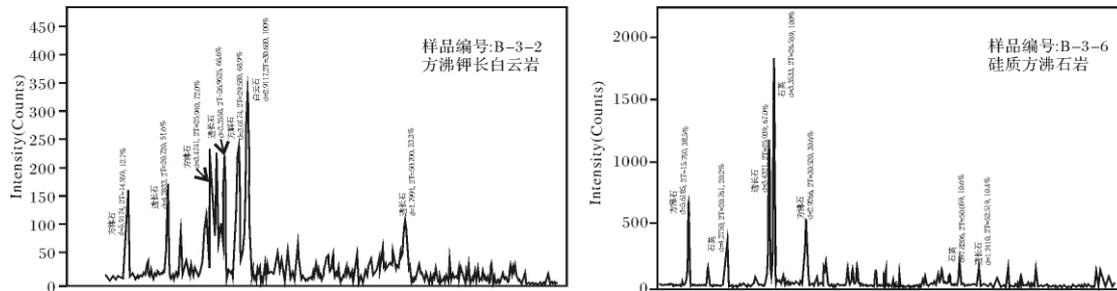


图4 方沸石岩全岩粉晶X衍射特征谱图

注: 由西北大学化学与材料科学学院分析测试研究中心余向阳测试, 仪器型号 D/MAX-3C 型

Fig. 4 The all rock X-ray powder diffraction (XRD) patterns of analcrite samples

表1 钻井方沸石岩电子探针成分分析 (%)^{a)}Table 1 Electron probe analysis of analcrite rocks of wells (%)^{a)}

编号	样品号	取样深度 /m	岩石类型	Na ₂ O	FeO	K ₂ O	MgO	NiO	TiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MnO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Total	矿物定名
1			方沸	5.928	0.039	0.002	-	-	-	19.567	0.04	-	67.889	0.202	0.011	93.678	方沸石
2	B-3-2	1720.11	钾长	0.169	10.396	-	12.004	-	0.038	0.015	28.256	2.451	-	-	-	53.329	铁白云石
3			白云	6.868	0.049	-	-	0.017	-	19.965	0.016	-	66.792	0.003	0.081	93.791	方沸石
4			岩	0.142	0.112	9.343	0.116	0.007	0.034	18.044	-	-	70.028	1.168	-	98.994	透长石
5			硅质	-	0.275	0.014	0.386	0.023	-	0.325	0.026	-	98.18	0.086	-	99.315	石英
6	B-3-6	1720.45	方沸	0.107	4.584	-	14.233	-	-	0.024	31.418	4.193	0.027	-	-	54.586	白云石
7			石岩	5.015	0.039	0.023	-	0.022	0.003	20.346	-	0.097	66.889	0.009	0.027	92.47	方沸石
8			方沸	0.049	0.057	0.03	0.015	-	-	0.251	0.027	0.027	98.858	-	-	99.314	石英
9	B-3-4	1720.61	硅质	0.065	0.354	-	0.487	-	0.005	-	62.584	0.817	-	0.013	0.012	64.337	方解石
10			岩	5.829	0.156	0.043	0.046	0.003	0.015	19.99	0.041	-	67.431	0.028	-	93.582	方沸石
11			硅质	6.436	0.013	0.038	-	0.023	-	19.908	0.014	0.079	65.951	0.003	0.07	92.535	方沸石
12	B-3-1	1720.96	方沸	0.114	0.3	0.218	0.241	-	0.023	0.823	0.356	-	96.418	0.016	-	98.509	石英
13			石岩	4.162	0.099	0.874	0.033	0.034	-	19.648	0.147	0.035	67.729	0.009	0.005	92.775	方沸石

a) 电子探针由长安大学成矿作用及其动力学实验室刘民武测试, 仪器型号日本电子 JXA-8100

3 方沸石岩显微特征

镜下观察方沸石多呈细粒状自形晶或无定形胶质体状, 粒径一般为 0.08 ~ 0.35 mm, 正交镜下全消光(图 5A、B、C、D、E)。方沸钾长白云岩(B-3-2、B-3-3)薄层中间部位的方沸石多为无定形的胶质体与泥晶铁白云石、白云石共生(图 5B、G), 而岩层顶、底与黑色泥岩接触处的部位则多为自形较好细粒方沸石, 并可见铁白云石交代细粒方沸石现象(图 5A), 推测岩层边部的细粒方沸石和铁白云石均发生了重结晶作用。硅质方沸石岩中方沸石多为细粒的自形一半自行晶体, 背散射显微镜下可见部分方沸石颗粒边缘不甚平整, 似有溶蚀痕迹(图 5F)。扫描电镜观察方沸石等轴粒状晶形者少见, 多为晶形不甚完整的块状或无定形胶质体状(图 5G、H)。对方沸石颗粒进行拉曼探针结构分析发现, 结构特征峰不甚明显, 与方沸石的典型谱图差异较大(未附图)。此外, 部分细

粒方沸石和泥晶白云石表面布满规则分布微细孔洞(图 5F), 推测可能是嗜热生物钻孔所致。

B-3-2、B-3-3 两件样品除方沸石外, 主要矿物还有碳酸盐和钾长石(图 5A、B、I、J)。钾长石的 X 衍射结构谱图显示为透长石, 在薄片呈细纹层状, 颗粒为微小的泥晶, 扫描电镜下为自形的板柱状晶体(图 5I、J), 往往与白云石、铁白云石和方解石等碳酸盐矿物共生。碳酸盐矿物多为泥晶或粉晶颗粒, 表面常布满丘状小球(图 5I、J), 晶形不如透长石好, 它形或半自形菱形为主, 显微镜下碳酸盐矿物集合体多呈粒状、云雾状或枝蔓状, 电子探针分析表明主要为白云石及铁白云石, 并且以高的 Fe、Mn 含量为特征(表 1)。薄片染色(茜素红—S 与铁氰化钾配比溶液)白云石多染为绿蓝色。另有少量方解石以充填溶洞或微裂隙形式出现, 形成时间应为最晚(图 5F)。

B-3-1、B-3-4、B-3-6 等三块样品除方沸石外, 主要矿物为泥晶石英和少量碳酸盐矿物(富含铁、锰的

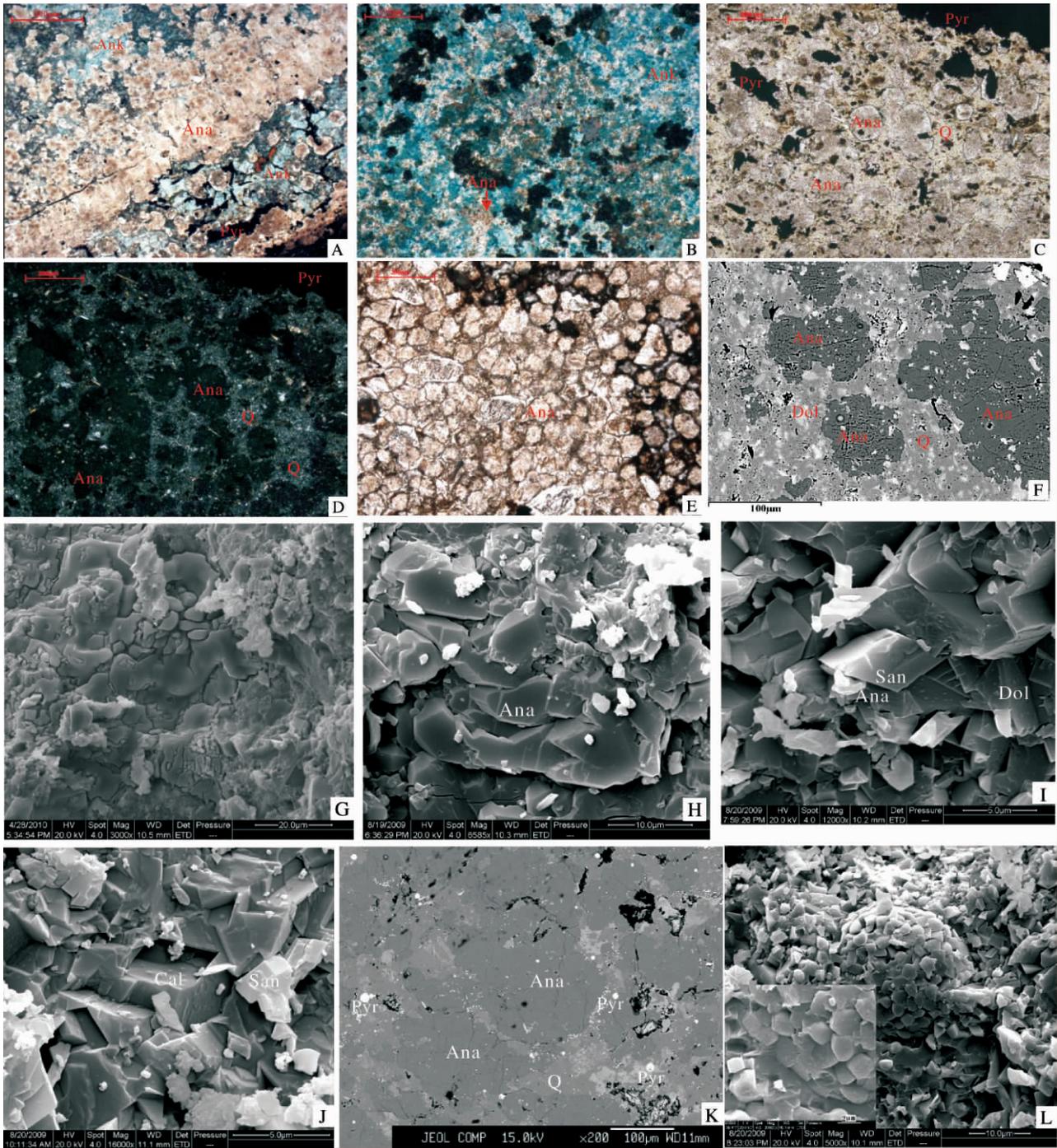


图5 方沸石岩显微结构及主要造岩矿物镜下特征

A、样品编号 B-3-3, 主要矿物有方沸石、铁白云石、黄铁矿等, 方沸石(Ana) 等轴粒状为主, 铁白云石(Ank) 染色绿蓝色, 左上角可见铁白云石交代细粒方沸石, 不透明矿物为黄铁矿(Pyr), 该视域为方沸钾长白云岩边缘靠近黑色泥岩处, 方沸石已发生重结晶并呈纹层状, 单偏光 $\times 5$; B、编号 B-3-3, 方沸石(Ana) 为浅黄色胶体态, 铁白云石(Ank, 染色绿蓝色) 为晶, 二者似为共生关系, 该视域为方沸钾长白云岩的中间部位, 单偏光 $\times 10$; C、编号 B-3-6, 主要矿物有方沸石和石英, 方沸石以等轴粒状为主, 石英(Q) 主要为隐晶质集合体, 黄铁矿多呈浸染状; D、与 C 同视域, 正交偏光, 方沸石全消光, 石英 I 级灰白干涉色, 为隐晶质集合体; E、跃进沟剖面, 样品编号 YJG-15, 粒状方沸石, 粒间充填泥晶石英, 单偏光; F、编号 B-3-6, 背散射图像, 方沸石(Ana) 为深灰色, 表面布满细小孔洞, 部分颗粒边缘似有熔蚀痕迹, 石英(Q, 浅灰色) 和白云石(Dol, 灰白色) 均为泥晶充填于粒状方沸石之间; G、跃进沟剖面, 编号 YJG-15, 方沸石为无定形胶体态, 扫描电镜; H、编号 B-3-1, 方沸石(Ana) 晶形多为粗大块体, 内部发育裂纹, 扫描电镜; I、编号 B-3-2, 透长石(San) 为细小的板柱状自形晶, 白云石(Dol) 为半自形, 表面布满丘状突起, 扫描电镜; J、编号 B-3-3, 方解石(Cal) 为半自形菱形, 表面布满丘状突起, 与透长石(San) 似为共生关系, 扫描电镜; K、编号 B-3-6, 背散射图像, 最明亮者为黄铁矿(Pyr), 主要为粉末状和莓球状集合体分布; L、编号 B-3-2, 莓球状黄铁矿集合体, 左下角小图为局部放大, 球状黄铁矿由许多更小的黄铁矿微粒集合而成, 微粒放大后表面可见丘状突起, 扫描电镜。注: 扫描电镜图像由西北大学大陆动力学国家重点实验室刘永强测试, 仪器型号 FEI Quanta 400 FEG 型环境扫描电子显微镜系统。

Fig. 5 Microstructures of the main minerals of the analcinite

白云石和方解石,表1)。显微镜下观察石英和碳酸盐矿物均由粒度小于0.005 mm的它形晶构成,呈胶结物形式赋存于方沸石颗粒之间,说明泥晶石英和碳酸盐的形成晚于方沸石(图5C、D、F)。

所有样品内均可见黄铁矿,为球状微粒、草莓状集合体(图5K、L)及浸染状分布(图5A、C),球状黄铁矿放大后可看到是由更多的微粒状黄铁矿聚合而成,每个黄铁矿微粒表面布满细小的丘状突起微粒(图5L),可能与古细菌和热液嗜热微生物的活动关系密切,属于生物成因^[32,33],说明热液流体喷出时周围湖水环境为较强的还原环境。浸染状黄铁矿则可能是从喷流热液中直接沉淀下来的。

4 化学成分及地球化学特征

4.1 岩石化学成分

方沸石岩主量元素总体特征为富SiO₂、Al₂O₃、Na₂O、Fe₂O₃,贫TiO₂(表2),与文献报道的陆相盆地喷流岩有相似之处^[34~36]。将全部样品的主量元素数据与研究区早、中二叠世玄武岩^[31]、粗面岩^[37]进行对比(表2),发现存在一定差异,主要表现为TiO₂、Al₂O₃、Fe₂O₃、MgO(B-3-3除外)、K₂O(B-3-3样品除外)明显低于区域火山岩,而Na₂O(B-3-3样品除外)明显高于区域火山岩,样品烧矢量也普遍高于火山岩,说明挥发分(可能主要是H₂O和CO₂)含量较高。方沸石岩样品之间也存在一定差异,方沸钾长白云岩与硅质方沸石岩相比,SiO₂、Fe₂O₃、Na₂O明显偏低,而K₂O、MnO、MgO、Ca₂O则明显偏高。以SiO₂为横坐标做Harker图解(图6),可以看出两类样品主量元素构成明显不同。方沸钾长白云岩MnO、MgO、CaO含量相对较高,表明在早期的透长石、正长石和方沸石形成后,晚期热液组分沿裂谷盆地深大断裂喷涌出来,遇湖水骤冷主要形成富含铁、锰的碳酸盐矿

物。方沸硅质岩和硅质方沸石岩以SiO₂、Na₂O含量相对较高为特点,当热液方沸石形成后,晚期硅质热液遇湖水后主要形成的是泥晶石英。

4.2 微量元素特征

将方沸石岩微量元素配分曲线与区域玄武岩、粗面岩、原始地幔^[38]及上地壳^[39]的微量元素配分曲线进行对比(图7,所有样品均已球粒陨石标准化)。方沸石岩总体呈现Ba、Rb、K、Ta、Sr、Zr、Hf等中等至强不相容元素富集,而Th、Nb、Ti亏损的特征。图7中方沸石岩微量元素丰度普遍低于上地壳和区域火山岩,B-3-3样品微量元素丰度最低(表3)。方沸石岩Rb_N/Yb_N比值介于4.42~33.51,高于区域火山岩0.47~2.95(表3),B-3-6的Rb_N/Yb_N比值为33.51, Ba/La值为308.76,为强不相容元素强烈富集型。同源演化的岩石具有相对固定的Th/U^[40],样品Th/U值介于0.17~2.21,低于区域火山岩的Th/U值2.32~3.43,此外,样品Rb/Sr比值、Sm/Rb比值也与区域火山岩及上地壳有显著差别(表3)。

Nb*值采用公式 $2Nb_N / (K_N + La_N)$ ^[40]计算得来,各元素进行原始地幔标准化^[38],大陆壳物质和花岗质岩石具有Nb*负异常的特征,四件样品Nb*均小于1,介于0.02~0.17之间,强烈亏损Nb,表明造岩热液上升时可能混染了少量陆壳物质。Sr是活动性元素易溶于含水流体且易被流体携带运移,方沸石岩Sr/Nd比值介于44.73~831.78,异常高的Sr/Nd值表明形成岩石的热液流体除了来自于深部的热液外,可能还有壳源物质的混入。

4.3 稀土元素特征

研究区方沸石岩的稀土总量偏低,ΣREE在7.33~20.619 μg/g之间,远低于区域粗面岩和玄武岩稀土总量(表3),也远低于北美页岩及上地壳平均值^[39],样品La_N/Yb_N介于2.50~16.00,4个样品

表2 方沸石岩全岩主量元素化学成分(%)^{a)}

Table 2 All rock main elements analysis of analcinite(%)^{a)}

样号	取样深度/m	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧矢量	TOTAL
B-3-3	1719.56	40.68	0.03	11.39	2.79	1.48	3.49	14.11	1.95	4.94	0.05	19.17	100.08
B-3-6	1720.45	65.51	0.07	12.74	3.75	0.14	0.42	2.45	5.93	0.85	0.05	7.61	99.52
B-3-4	1720.61	69.61	0.04	10.27	4.93	0.06	0.21	1.47	5.37	0.61	0.05	7.50	100.12
B-3-1	1720.96	67.35	0.07	11.90	3.48	0.11	0.38	1.96	6.12	0.85	0.04	7.77	100.03
粗面岩*	-	63.78	0.81	15.68	4.79	0.11	1.24	2.19	3.83	4.64	0.25	2.35	99.67
玄武岩*	-	46.67	2.01	15.87	10.77	0.15	7.43	6.49	2.93	2.14	0.75	5.14	100.35

a) 由西北大学大陆动力学国家重点实验室王建其测试,仪器型号RIX-2100型X荧光光谱仪

玄武岩* 主量数据引自周鼎武(2006)钻井M5-01样品,时代早、中二叠世。

粗面岩*^P主量数据引自赵泽辉(2006)野外粗面岩样品STH-5,时代早二叠世;

表3 方沸石岩全岩微量元素与稀土元素分析结果 ($\mu\text{g/g}$)^{a)}Table 3 The all rock trace elements and REE analysis of analcinitite ($\mu\text{g/g}$)^{a)}

元素	B-3-4 方沸硅质岩	B-3-3 方沸钾长白云岩	B-3-6 硅质方沸石岩	B-3-1 硅质方沸石岩	粗面岩*	玄武岩*	原始地幔*	上地壳*
Li	31.8	5.06	29.1	33.1	-	37.1		
Be	0.35	0.6	0.41	0.38	-	1.89		
Sc	2.91	28.3	3.05	2.98	-	22.8		
V	33.1	187	44.1	48.1	-	197		
Cr	2.34	3.66	2.21	2.39	12	210		
Co	117	24.3	73.5	114	-	42.1		
Ni	11.9	3.46	5.23	5.38	4.29	157		
Cu	25.6	186	21.6	36.7	-	66.5		
Zn	29.5	21.6	30.9	29.1	-	98.9		
Ga	8.68	13.4	10.3	10	-	17.6		
Ge	0.36	0.19	0.35	0.34	-	1.5		
Rb	19.9	164	29.7	29.6	92	18.1	0.635	110.00
Sr	198	1073	211	157	550	818	21.100	350.00
Y	3.06	1.75	2.59	2.46	20	33.1	4.550	22.00
Zr	119	83.1	151	145	189	208	11.200	240.00
Nb	1.03	1.16	1.63	1.6	9.47	7.77	0.713	25.00
Cs	6.55	2.38	7.91	7.67	1.47	0.56	0.023	
Ba	155	423	269	239	1080	534	6.990	700
Hf	3.05	2.46	3.81	3.68	5.72	4.11	0.309	5.80
Ta	0.46	0.34	0.71	0.71	0.85	0.49	0.041	
Pb	13.6	2.98	14.9	13.4	15.5	3.75	0.071	
Th	0.23	0.068	0.43	0.42	9.25	0.44	0.084	10.50
U	0.42	0.39	0.2	0.19	2.7	0.19	0.021	2.50
K	41002	7055	5063	7055	38512	17762	240	27393
P	220	220	220	176	1100	3300		742.22
Ti	180	420	240	420	4860	12060	1280	3597.00
Rb _N /Yb _N	4.42	33.51	10.69	11.78	2.95	0.47	1.00	3.78
Rb/Sr	0.10	0.15	0.14	0.19	0.17	0.02	0.03	0.31
Sr/Nd	88.00	831.78	57.03	44.73	20.37	26.30	15.45	13.46
Sr/Ca(10 ⁻⁴)	188.02	106.42	120.27	112.20	351.40	176.36	-	-
Sm/Nd	0.23	0.21	0.19	0.19	0.18	0.22	0.33	0.17
Th/U	0.55	0.17	2.15	2.21	3.43	2.32	4.00	4.20
Ba/La	84.24	308.76	58.61	52.99	46.96	28.11	9.87	23.33
Nb*	0.02	0.10	0.17	0.13	0.14	0.22	1.00	0.45
稀土元素	B-3-4 方沸硅质岩	B-3-3 方沸钾长白云岩	B-3-6 硅质方沸石岩	B-3-1 硅质方沸石岩	粗面岩*	玄武岩*	原始地幔*	上地壳*
La	1.84	1.37	4.59	4.51	23	19.0	0.7080	30.000
Ce	4.3	2.73	8.76	8.53	51	47.3	1.8330	64.000
Pr	0.52	0.31	0.94	0.9	6.52	6.81	0.2780	7.100
Nd	2.25	1.29	3.7	3.51	27	31.1	1.3660	26.000
Sm	0.52	0.27	0.7	0.65	4.84	6.77	0.4440	4.500
Eu	0.1	0.09	0.15	0.15	1.73	2.21	0.1680	0.880
Gd	0.49	0.28	0.64	0.59	5.05	5.66	0.5950	3.800
Tb	0.075	0.036	0.087	0.08	0.72	0.96	0.1080	0.640(2.20)
Dy	0.46	0.21	0.46	0.41	3.87	5.42	0.7370	3.500
Ho	0.1	0.05	0.085	0.079	0.79	1.12	0.1630	0.800
Er	0.33	0.21	0.23	0.22	2.26	2.7	0.4790	2.300
Tm	0.052	0.044	0.034	0.031	0.37	0.54	0.0740	0.330
Yb	0.34	0.37	0.21	0.19	2.36	2.89	0.0480	2.200
Lu	0.054	0.07	0.033	0.03	0.4	0.43	0.0737	0.320
La _N /Yb _N	3.65	2.50	14.74	16.00	6.57	4.43	9.94	9.19
Ce _N /Yb _N	3.27	1.91	10.79	11.61	5.59	4.23	9.88	7.52
δEu	0.60	0.99	0.67	0.73	1.06	1.06	1.00	0.63
δCe	1.04	0.97	0.96	0.96	0.99	1.00	0.99	1.02
LREE/HREE	5.01	4.77	10.59	11.20	7.21	5.74	2.106	9.538
ΣREE	11.431	7.33	20.619	19.88	129.91	132.91	7.0747	146.37

a) 由西北大学大陆动力学国家重点实验室刘晔测试, 溶液法, 仪器型号 ELAN6100DRC 等离子质谱仪; 玄武岩* 主量数据引自周鼎武(2006) 钻井 M5-01 样品, 时代早-中二叠世; 粗面岩* 主量数据引自赵泽辉(2006) 野外粗面岩样品 STH-5, 时代早二叠世;

“-”表示未检测或未换算项; 样品 Ca、K、P、Ti 丰度(10⁻⁶) 值由主量元素换算得来;

原始地幔* 微量元素引自 S. -s. Sun 等(1989), 原始地幔* 稀土元素引自 S. -s. Sun 等(1989);

上地壳* 微量元素引自 Taylor 等(1981), 稀土元素引自 Taylor 等(1981), 其中 Tb(2.20) 为微量元素值;

微量元素球粒陨石标准化数据引自 Thompson 等(1982); 稀土元素球粒陨石标准化的数据引自文献 Boynton(1984)。

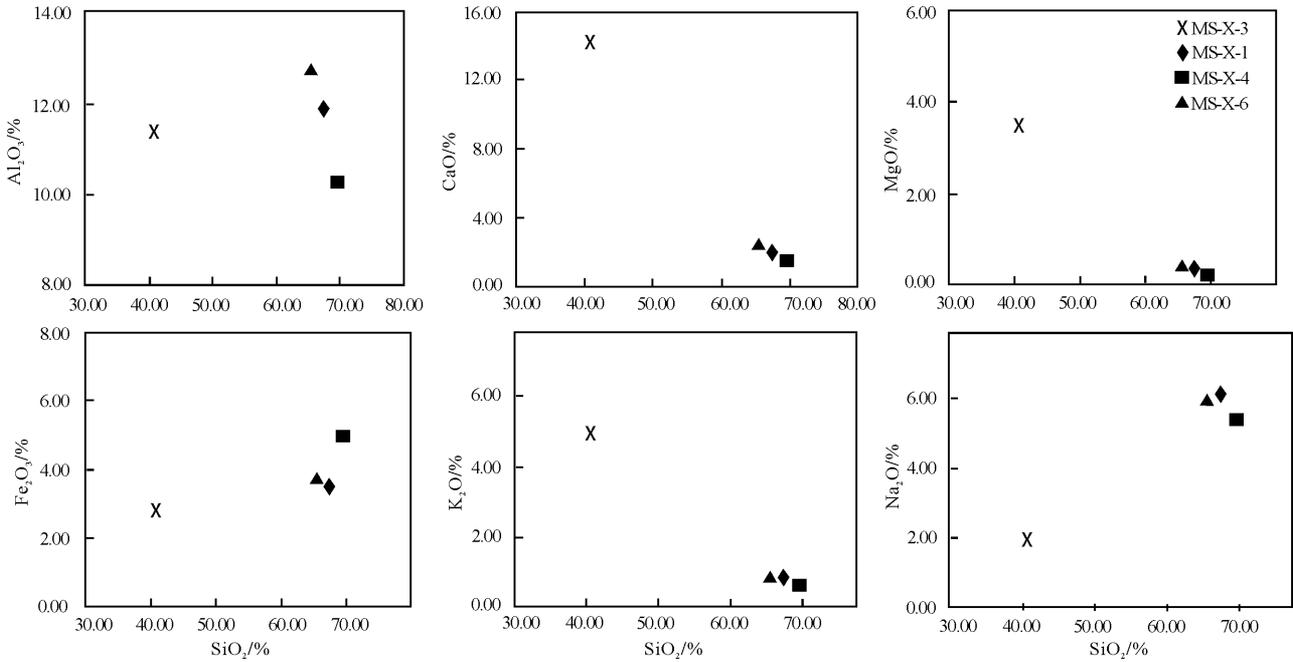


图 6 方沸石岩各主要元素与 SiO₂ 变化的 Hanker 图解

Fig. 6 The Hanker diagrams for the relationships between SiO₂ and other main elements of the analcinite

表 4 钻井岩芯样品 Sr、Nd 同位素构成^{a)}

Table 4 Sr - Nd isotope data for the analcinite^{a)}

样品编号	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2σ	εSr(t)	I _{Sr(t)}	¹⁴³ Nd/ ¹⁴⁴ Nd	2σ	εNd(t)	I _{Nd}
B-3-3	0.706438	0.000010	20	0.701715	0.512713	0.000020	3.84	0.512091
B-3-6	0.706045	0.000013	15	0.701671	0.512454	0.000030	-0.81	0.511888
B-3-4	0.705527	0.000011	10	0.702414	0.512496	0.000049	-0.82	0.511811
B-3-1	0.706535	0.000012	19	0.700708	0.512511	0.000023	0.38	0.511957

a) 由西北大学大陆动力学国家重点实验室春春蕾测试, 溶液法, 仪器型号 Nu Plasma HR 多接收器等离子质谱仪;

I_{Sr}(初始铈)、εSr、I_{Nd}(初始钕)、εNd 计算公式参照文献(李昌年, 1992)^{P141} 公式 6-14; 样品年龄参照文献(周鼎武等, 2006), 三塘湖盆地钻井样品编号 M8-02 辉绿岩, 坪年龄(266 ± 1) Ma。

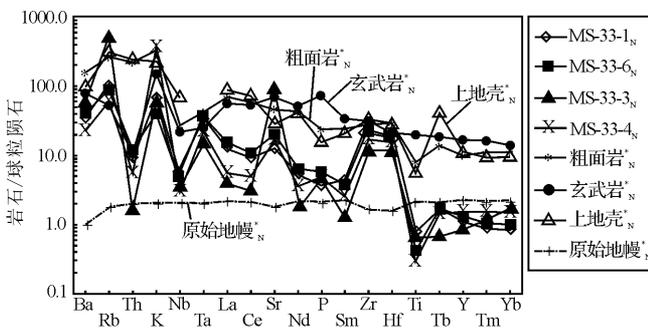


图 7 方沸石岩微量元素比值蛛网图

Fig. 7 Trace elements spidergram for analcinite

LREE/HREE 为 4.77 ~ 11.20 均显示 LREE 富集(相对于 HREE), HREE 亏损的特征, 稀土配分曲线为较平缓的右倾(图 8), δEu 为 0.60 ~ 0.99, 呈现弱负异

常, 与典型的热液沉积岩稀土分配模式有相似性^[41-44]。δCe 为 0.96 ~ 1.04, 基本无亏损, 与文献报道的海相热液沉积物具有负 δCe 异常不太一致, 这可能是受热液沉积物发育在陆相环境所致, 原始热液流体受湖水而非海水的混染(海水具有明显的 δCe 负异常, 陆相河水及沉积物 δCe 常为小的负异常或正异常^[39, 40], 使样品 δCe 表现出基本无亏损的特征, 同时也反映了样品在表生条件下发生的分异很小, 并且受陆源物质输入的影响较小。

5 Sr、Nd 同位素证据

全岩样品 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr、¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd 比值、计算得到的初始值及 εSr、εNd 见表 4。⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值介于 0.705 118 ± 0.000 012 ~ 0.706 438 ± 0.000 010, 低于同时

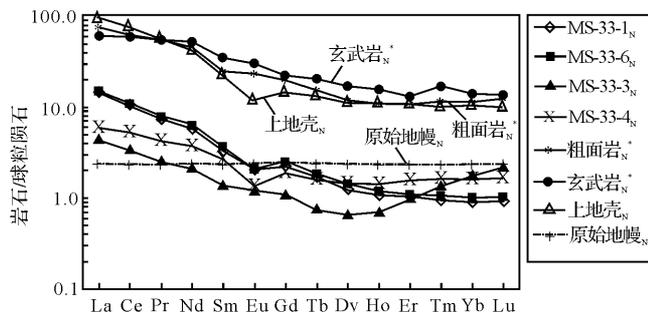


图8 方沸石岩稀土元素配分模式图

Fig. 8 REE distribution pattern for analcinite

期全球海水 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(约为0.706 854 ~ 0.707 355, 时代260.5 ~ 272.5 Ma^[45])及中上二叠统海相碳酸盐的最低值(约为0.706 914 ± 0.000 012, 时代265.8 ~ 260.4 Ma^[46]), 初始锶值 I_{Sr} 偏低, 反映了可能有深源锶。 Sr 同位素能够灵敏地反映岩石的混染程度, 样品偏高的 ϵ_{Sr} 值(介于10 ~ 20), 显示出与标准样的偏差程度较大, 表明也有壳源锶的存在。样品 $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ 为0.512 496 ~ 0.512 713之间, 两个样品 ϵ_{Nd} 值 > 0, 分别为3.84和0.38, 说明造岩物质很可能主要来自于深部源区或有深源物质的明显参与^[39, 40], 另两个样品 ϵ_{Nd} 小于并接近0(地幔值), 分别为-0.81和-0.83, 表明热液组分很可能属于不同深度物质的混合来源。

6 热水沉积方沸石岩成因探讨

方沸石一般被看做是一种高温沸石, 可做为晚期形成的原生矿物产出于中性的过碱性火山岩中^[47-49], 或在岩浆期后热液中与其它沸石共生晶出^[48, 50], 更多人认为是火山凝灰物质经成岩作用转变而来^[47, 51]; 与沉积岩共生的原生方沸石岩很少见到, 尤其是与热液沉积作用有关^[22]的鲜有报道。然而, 通过研究区方沸石岩的岩石学、地球化学及同位素特征综合分析, 认为本文的方沸石、透长石、正长石、白云石及石英等矿物均属裂谷盆地湖底热液喷流沉积作用形成。

6.1 方沸石岩与凝灰岩的关系

研究区露头的凝灰岩普遍为薄层状(图3C), 与本文方沸石岩在微观特征上有明显差异, 主要表现为四点: 第一, 研究区凝灰岩主要发育晶屑岩屑凝灰岩和晶屑玻屑凝灰岩, 其中晶屑、岩屑或玻屑含量较高, 一般在10% ~ 30%左右, 尤其是玻屑凝灰岩中常见清晰的鸡骨状、树枝状、碟状等刚性玻屑(图9A), 而

方沸石岩中普遍未见玻屑, 晶屑和岩屑含量也较低, 通常不足5%; 第二, 钻井岩芯的方沸石岩与黑色泥岩整合接触, 方沸石岩与黑色泥岩均富含大量胶状、球状、莓球状黄铁矿集合体, 缺乏诸如次生淋滤或赤铁矿化等暴露地表的标志, 说明地层始终处于埋藏状态, 基本排除了钻井方沸石岩为凝灰岩后期地表蚀变作用产生的因素; 第三, 在地质历史时期, 随着碳酸盐矿物的重结晶、溶解—再沉淀等作用, Sr 易溶于流体被带走, 因此, 古老碳酸盐矿物中 Sr 丰度通常很低, 而研究区方沸石白云岩却显示出 Sr 异常富集的特征(表3)。尽管其它样品碳酸盐矿物含量很少, 但 Sr/Ca (介于106.42 ~ 188.02)却很接近, 表明样品在埋藏成岩期体系相对封闭, 没有经历明显的后期蚀变改造, 基本排除了凝灰岩经水热蚀变改造形成方沸石岩的可能。第四, 跃进沟剖面部分凝灰岩也发生了方沸石化(图9B), 但是此类方沸石在扫描电镜下常为自形的粒状四角三八面体(图9C、D), 而热水成因方沸石形态极不规则, 多为块状或无定形胶体状(图5H、I、J), 可能是钠质硅酸盐胶体热液喷出地表或在近地表处遇湖水后迅速冷凝所致。因此, 本文的方沸石岩很难用凝灰岩经水热蚀变或地表蚀变来解释。

6.2 热水沉积方沸石岩成因探讨

现代海(湖)底的探测及成矿作用研究表明, 热水沉积遍布大陆、大洋的许多地方, 张性的构造环境和异常的高热流值是热水活动发育的基本条件。此外, 产于沉积岩中的热水沉积岩往往与腐泥型高碳质页岩、纹层状硅岩、重晶石岩、电气石岩、钠长石岩等密切共生, 呈透镜体或纹层状展布, 并与围岩地层整合或近于整合^[7, 8]。

三塘湖盆地二叠纪处于晚古生代陆内裂谷演化时期, 芦草沟组正是在早二叠世卡拉岗期和中二叠世条湖期两次大规模火山活动之间间歇沉积的一套湖相地层, 凝灰岩在该组有广泛分布, 说明中二叠世芦草沟期三塘湖地区尽管表面为相对宁静的湖泊沉积环境, 但内部存在高地热状态, 具备形成热水沉积岩的地质条件。此外, 通过微观岩相学的分析, 认为细粒和无定形的方沸石、泥晶钾长石、泥晶白云石及微晶石英等主要造岩矿物首先是共生关系, 其后才是交代关系, 推测方沸石应属于钠质硅酸盐胶体热液沿裂谷盆地深大断裂上升至地表喷出与较冷湖水混合快速冷凝形成, 后被交替喷涌的碳酸质或硅质热液破碎、搬运和胶结。方沸石白云岩、方沸石硅质岩及硅质方沸石岩均为薄纹层状赋存于黑色泥岩之间, 说

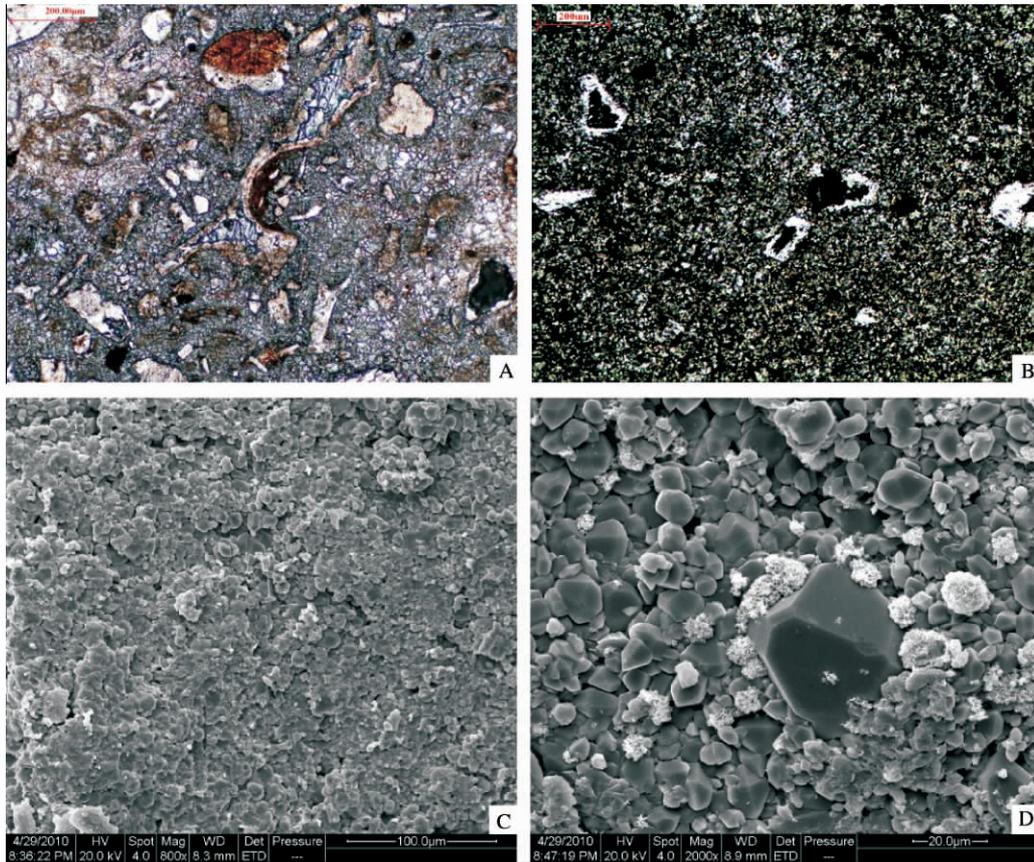


图9 三塘湖盆地跃进沟剖面凝灰岩显微特征

A、样品编号 YJG-02 玻屑晶屑凝灰岩 玻屑表面和基质均发生方解石化,单偏光; B、样品编号 YJG-11 晶屑凝灰岩,单偏光; C、D、样品编号 YJG-11 晶屑凝灰岩 基质发生方沸石化,粒状矿物均为方沸石。

Fig. 9 Microfeatures of the tuffaceous rocks in Lucaogou Formation(P_2l), Yuejingou outcrop, Santanghu Basin

明距喷口有一定距离。

7 结论

方沸石岩 Ti 强烈亏损 稀土总量低,大部分样品的 HREE 甚至低于球粒陨石和原始地幔,碳酸盐矿物富铁、锰等 均显示出热水沉积岩的特征。样品具有低于同时期全球海水和海相碳酸盐的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,初始锶 I_{Sr} 也较低,说明可能存在深源锶。 ϵNd 介于 $-0.81 \sim 0.38$, 接近于地幔值 $\epsilon\text{Nd} = 0$, 也显示出幔源组分的特征,然而,偏高的 ϵSr 表明热液组分有壳源物质的混染。样品微量元素和稀土配分曲线协调一致(图7、图8), 显示出密切的亲源关系,说明这套热水沉积岩应属同一源区。但是各样品间 Rb 、 Sr 、 K 等活动性元素的丰度、 Rb_N/Yb_N 比值、 Sr/Nd 比值、 Th/U 比值及 ΣREE 总量等还存在一定的差异,这种差异性很可能是热液上升期不同深度物质混染程度的不同所致。综上所述,研究区方沸钾长白云岩、方

沸硅质岩及硅质方沸石岩是一类与陆相裂谷盆地湖底热泉喷流作用有关的热水沉积岩组合,热液组分除了有壳源物质及大气水等的混入外,可能还有深部物质的参与。

致谢 感谢西北大学地质学系周鼎武、刘洪福、石崇培、董云鹏及陕西省地调院李海平等教授的热情指导与有益讨论。感谢大陆动力学国家重点实验室刘晔、王建琪、弓虎军、第五春荣、宗春蕾、戴梦宁、刘永强等老师的帮助。部分测试工作有研究生付迪、本科生程俊的参与,在此谨致谢忱。

参考文献(References)

- 1 Mazar E. Compositional similarities between hot mineral springs in the Jordan and Suez Rift Valley[J]. Nature, 1968, 219: 477-478
- 2 Edmond J M. Hydrothermal activity at mid-ocean ridge axes[J]. Nature, 1981, 290: 87-88
- 3 Rona P A. TAG hydrothermal field: Mid-Atlantic ridge crest at latitude 26°N [J]. Journal of the Geological Society, 1980, 137: 385-402

- 4 Cann J R, Strens M R. Black smokers fuelled by freezing magma[J]. *Nature*, 1982, 298: 147-149
- 5 Malahoff A, McMurtry G M, Wiltshire J C, *et al.* Geology and chemistry of hydrothermal deposits from active submarine volcano Loihi, Hawaii[J]. *Nature*, 1982, 298: 234-239
- 6 Haymon R M. Growth history of hydrothermal black smoker chimneys[J]. *Nature*, 1983, 301: 695-698
- 7 涂光炽, 王秀璋, 陈先沛, 等. 中国层控矿床地球化学(第三卷)[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 131-168 [Tu Guangzhi, Wang Xiuzhang, Chen Xianpei, *et al.* Geochemistry of stratabound deposits in China(Vol. 3) [M]. Beijing: Science Press, 1988: 131-168]
- 8 陈先沛. 热水沉积成岩成矿作用的研究进展[J]. 矿物岩石地球化学通报, 1988, 7(2): 102-104 [Chen Xianpei. Research progresses in hydrothermal sedimentation and mineralization[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1988, 7(2): 102-104]
- 9 陈先沛, 高计元, 陈多福, 等. 热水沉积作用的概念和几个岩石学标志[J]. 沉积学报, 1992, 10(3): 124-132 [Chen Xianpei, Gao Jiyuan, Chen Duofu, *et al.* The concept of hydrothermal sedimentation and its petrological criteria[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1992, 10(3): 124-132]
- 10 Crane K, Hecker B, Golubev V. Hydrothermal vents in Lake Baikal[J]. *Nature*, 1991, 350: 281
- 11 Shanks III W C, Callender Edward. Thermal springs in Lake Baikal[J]. *Geology*, 1992, 20: 495-497
- 12 Tiercelin J J, Plumio C, Castrec M, *et al.* Hydrothermal vents in Lake Tanganyika, East African Rift system[J]. *Geology*, 1993: 499-502
- 13 Brugger J, Long J B N, McPhail D C, *et al.* An active amagmatic hydrothermal system: the Paralana hot springs, Northern Flinders Ranges, South Australia[J]. *Chemical Geology*, 2005, 222: 35-64
- 14 Jones B, De Ronde C E J, Renaut R W, *et al.* Siliceous sublacustrine spring deposits around hydrothermal vents in Lake Taupo, New Zealand[J]. *Journal of the Geological Society*, 2007, 164: 227-242
- 15 Li J H, Kusky T M. World's largest known Precambrian fossil black smoker chimneys and associated microbial vent communities, North China: Implications for early life[J]. *Gondwana Research*, 2007, 12: 84-100
- 16 Raju P V S. Petrography and geochemical behaviour of trace element, REE and precious metal signatures of sulphidic banded iron formations from the Chikkasiddavanahalli area, Chitradurga schist belt, India[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2009, 34: 663-673
- 17 Leach D L, Bradley D C, Huston D, *et al.* Sediment-hosted lead-zinc deposits in earth history[J]. *Economic Geology*, 2010, 105: 593-625
- 18 Boni M, Parente G., Bechstaedt T, *et al.* Hydrothermal dolomites in SW Sardinia (Italy): evidence for a widespread late-Variscan fluid flow event[J]. *Sedimentary Geology* 2000, 131: 181-200
- 19 Renaut R W, Jones B, Tiercelin J J, *et al.* Sublacustrine precipitation of hydrothermal silica in rift lakes: evidence from Lake Baringo, central Kenya Rift Valley[J]. *Sediment Geology*, 2002, 148: 235-257
- 20 Yokoyama T, Taguchi S, Motomura Y, *et al.* The effect of aluminum on the biodeposition of silica in hot spring water: Chemical state of aluminum in siliceous deposits collected along the hot spring water stream of Steep Cone hot spring in Yellowstone National Park, USA[J]. *Chemical Geology*, 2004, 212: 329-337
- 21 Orgün Y, G İtekin A H, Onal A. Geology, mineralogy and fluid inclusion data from the Arapucan Pb-Zn-Cu-Ag deposit, Canakkale, Turkey[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 629-642
- 22 Hall A J, Banks D, Fallick A E. & Hamilton P J. An hydrothermal origin for copper-impregnated prehnite and analcime from Boylestone Quarry, Barrhead, Scotland[J]. *Journal of the Geological Society*, 1989, 146: 701-713
- 23 Butler I B, Fallick A E & Nesbitt R W. Mineralogy, sulphur isotope geochemistry and the development of sulphide structures at the Broken Spur hydrothermal vent site, 29°10'N, Mid-Atlantic Ridge[J]. *Journal of the Geological Society*, 1998, 155: 773-785
- 24 Taran Y T, Inguaggiato S, Marin M, *et al.* Geochemistry of fluids from submarine hot springs at Punta de Mita, Nayarit, Mexico[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2002, 115: 329-338
- 25 Ishikawa H, Ohba T, Fujimaki H. Sr isotope diversity of hot spring and volcanic lake waters from Zao volcano, Japan[J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2007, 166: 7-16
- 26 Bucher K, Zhang L F, Stober I. A hot spring in granite of the Western Tianshan, China[J]. *Applied Geochemistry*, 2009, 24: 402-410
- 27 Huang J, Chu X L, Jiang G Q, *et al.* Hydrothermal origin of elevated iron, manganese and redox-sensitive trace elements in the c. 635 Ma Doushantuo cap carbonate[J]. *Journal of the Geological Society*, 2011, 168: 805-815
- 28 Nelson J, Paradis S, Christensen J, *et al.* Canadian Cordilleran Mississippi Valley-Type deposits: a case for Devonian-Mississippian Balk-Arc hydrothermal origin[J]. *Economic Geology*, 2002, 97: 1013-1036
- 29 Lott D A, Coveney R M, R J, *et al.* Sedimentary exhalative Nickel-Molybdenum ores in South China[J]. *Economic Geology*, 1999, 94: 1051-1066
- 30 柳益群, 李红, 朱玉双, 等. 白云岩成因探讨: 新疆三塘湖盆地发现二叠系湖相喷流型热水白云岩[J]. 沉积学报, 2010, 28(5): 861-867 [Liu Yiqun, Li Hong, Zhu Yushuang, *et al.* Permian lacustrine eruptive hydrothermal dolomites, Santanghu Basin, Xinjiang Province[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, 28(5): 861-867]
- 31 周鼎武, 柳益群, 邢秀娟, 等. 新疆吐哈、三塘湖盆地二叠纪玄武岩形成古构造环境恢复及区域构造背景示踪[J]. 中国科学: D辑, 2006, 36(2): 143-153 [Zhou Dingwu, Liu Yiqun, Xing Xiujian, *et al.* Formation of the Permian basalts and implications of geochemical tracing for paleo-tectonic setting and regional tectonic background in the Turpan-Hami and Santanghu basins, Xinjiang[J]. *Science in China: Series D*, 2006, 36(2): 143-153]
- 32 冯军, 李江海, 牛向龙, 等. 冀东高板河中元古代古代硫铁矿叠层石结构特征及其成因[J]. 高校地质学报, 2004, 10(4): 562-

- 569 [Feng Jun, Li Jianghai, Niu Xianglong, *et al.* The fabric characteristics and origin of the Mesoproterozoic pyritic stromatolite from the Gaohanhe deposits, east Hebei Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(4): 562-569]
- 33 Virtasalo J J, Löwemark L, Papunen H, *et al.* Pyritic and baritic burrows and microbial filaments in postglacial lacustrine clays in the northern Baltic Sea [J]. *Journal of the Geological Society*, 2010, 167: 1185-1198
- 34 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 [Liu Jianming, Ye Jie, Zhang Anli, *et al.* A new exhalite type: siderite-sericite chert formed in fault-controlled lacustrine basin [J]. *Science in China: Series D*, 2001, 31(7): 570-577]
- 35 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): 585-592 [Ye Jie, Liu Jianming, Zhang Anli, *et al.* Petrological evidence for exhalative mineralization: Case studies of Huanggang and Dajing deposits in the southern segment of the Da Hinggan Mountains, China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2002, 18(4): 585-592]
- 36 戚华文, 胡瑞忠, 苏文超, 等. 陆相热水沉积成因硅质岩与超大型锗矿床的成因——以临沧锗矿床为例[J]. *中国科学: D 辑*, 2003, 33(3): 236-246 [Qi Huawen, Hu Ruizhong, Su Wenchao, *et al.* Continental hydrothermal sedimentary siliceous rock and genesis of superlarge germanium (Ge) deposit hosted in coal: a study from the Lincang Ge deposit, Yunnan, China [J]. *Science in China: Series D*, 2003, 33(3): 236-246]
- 37 赵泽辉, 郭召杰, 韩宝福, 等. 新疆三塘湖盆地古生代晚期火山岩地球化学特征及其构造-岩浆演化意义[J]. *岩石学报*, 2006, 22(1): 199-214 [Zhao Zehui, Guo Zhaojie, Han Baofu, *et al.* The geochemical characteristics and tectonic-magmatic implications of the latest-Paleozoic volcanic rocks from Santanghu basin, eastern Xinjiang, northwest China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(1): 199-214]
- 38 Sun S, S and, McDonough W F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle compositions and processes. *Magmatism in the Ocean Basins* [C] // Saunders A D, Norry M J. Eds. *Geological Society Special Publications*, 1989: 42313-42345
- 39 Rollison H R. Using Geochemical Data: evaluation, presentation, interpretation [M]. Longman Publishing Group, 1993: 206-324
- 40 李昌年, 编著. 火成岩微量元素岩石学 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1992: 74-125 [Li Changnian. Trace Elements Petrology of Igneous Rocks [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1992: 74-125]
- 41 Marchig V, Gundlach H, Moller P, *et al.* Some geological indicators for discrimination between diagenetic and hydrothermal metalliferous sediments [J]. *Marine Geology*, 1985, 50(3): 241-256
- 42 韩发, R. W. 哈钦森. 大厂锡-多金属矿床热液喷气沉积成因的证据——容矿岩石的微量元素及稀土元素地球化学 [J]. *矿床地质*, 1989, 8(3): 33-42 [Han Fa, Hutchinson R W. Evidence for hydrothermal exhalative sedimentary origin of the Dachang Tin-poly-metallic deposits—geochemistry of rare earth elements and trace elements of the host rocks [J]. *Mineral Deposits*, 1989, 8(3): 33-42]
- 43 韩发, 孙海田. Sedex 型矿床成矿系统 [J]. *地学前缘*, 1999, 6(1): 139-168 [Han Fa, Sun Haitian. Metallogenic system of sedex type deposits: a review [J]. *Earth Science Frontiers*, 1999, 6(1): 139-168]
- 44 Murray R W, Buchholtz T, Jones D L, *et al.* Rare earth elements as indicators of different marine depositional environments in chert and shale [J]. *Geology*, 1990, 18: 268-271
- 45 Korte C, Jasper T, Kozur H W, *et al.* $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ record of Permian seawater [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2006, 240: 89-107
- 46 Kani T, Fukui M, Isozaki Y, *et al.* The Paleozoic minimum of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio in the Capitanian (Permian) mid-oceanic carbonates: A critical turning point in the Late Paleozoic [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2008: 22-33
- 47 Liou J G. Analcime equilibria [J]. *Lithos*, 1971, 4(4): 389-402
- 48 潘兆橧主编. 结晶学及矿物学 下册 [M]. 北京: 地质出版社, 1993: 213-214 [Pan Zhaolu. *Crystallography and Mineralogy* (Vol. 2) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1993: 213-214]
- 49 蒋云, 赵珊茸, 马昌前, 等. 青藏高原当雄地区方沸石响岩的主要造岩矿物特征: 原生方沸石的证据 [J]. *地球科学—中国地质大学学报*, 2008, 33(3): 320-326 [Jiang Yun, Zhao Sanrong, Ma Changqian, *et al.* Characteristics of rock-forming minerals of analcime phonolite in the Damxung area, Qinghai-Tibet Plateau: evidence for primary analcime [J]. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2008, 33(3): 320-328]
- 50 Ghobarkar H, Schäfer O. Effect of temperature on hydrothermal synthesis of analcime and vesite [J]. *Materials Science and Engineering*, 1990, B60: 163-167
- 51 Campo M D, Papa C D, Jimenez-Millan J, *et al.* Clay mineral assemblages and analcime formation in a Palaeogene fluvial-lacustrine sequence (Ma z Gordo Formation Palaeogene) from northwestern Argentina [J]. *Sedimentary Geology*, 2007, 201: 56-74

Lithology and Origin Analysis of Sublacustrine Hydrothermal Deposits Characterized by Analcime , Sanidine , Dolomite , Quartz , etc. in Lucaogou Formation , Middle Permian , Santanghu Basin , Northeast Xinjiang , China

LI Hong^{1 2} LIU Yi-qun^{1 2} LIANG Hao³ LUO Quan-sheng³ LI Wei^{1 2}

ZHOU Xiao-hu^{1 2} JIAO Xin² YANG Rui² LEI Chuan⁴ SUN Qin²

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics (Northwest University) , Xi'an 710069;

2. Geology Department of Northwest University , Xi'an 710069;

3. Research Institute of Exploration and Development , Tupan-Hami Oilfield Company , CNPC , Hami , Xinjiang , 839000;

4. Institute of Geology and Geophysics , Chinese Academy of Sciences , Lanzhou 730000)

Abstract: Santanhu Basin , located in northeast of Xinjiang , China , was developed a continental rift basin from Late Carboniferous to Middle Permian. On the outcrop and the drilling cores of the basin , layers of sublacustrine hydrothermal deposits from which six of them were sampled , were found in the thick mudstones in Lucaogou Formation (P₂l) , Middle Permian. The hydrothermal samples can be divided into two types: the first type is formed of analcime , sanidine , orthoclase , dolomite and ankerite. The carbonates were detected of concentrating iron and manganese. The second type is formed of analcime , quartz , and carbonates. Most analcime was observed to be xenomorphic block or amorphous gelatinoid otherwise from automorphic tetragonaltrisoctahedron under the SEM. Major elements of all samples were characterized as being rich in SiO₂ , Al₂O₃ , Na₂O and poor in TiO₂. Trace element of the samples show enrichment of highly incompatibility elements , such as Ba , Rb , K , Ta , Sr , Zr and Hf , and are lack of Th , Nb , and Ti relatively. The ratios of Sr/Nd = 44.73 ~ 831.78 , Nb* = 0.02 ~ 0.17. Σ REE = 7.33 ~ 20.619 μ g/g , La_N/Yb_N = 2.50 ~ 16.00 , LREE/HREE = 4.77 ~ 11.20. δ Eu varies from 0.6 to 0.99 which shows negative anomaly to primitive mantle , however , δ Ce value which varies from 0.96 to 1.04 shows the similarity to primitive mantle. The major and trace elements (includes REE) reveal the distinct differences with the basalts and trachytoids of Permian in the same basin , and also disagree with the average value of Upper Crust. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.705118 \sim 0.706438$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512454 \sim 0.512713$, $\epsilon\text{Nd} = -0.81 \sim -3.84$. Isotope composition indicates that mantle materials may participate in the hydrothermal fluid with which the hydrothermal minerals were deposited. By the analysis of the lithology , geochemistry , and Sr , Nd isotope , the characteristics of the samples suggest that they are an assemblage of hydrothermal rocks which are related to the hot springs exhalation at the lake bottom in Santanghu continental rift basin. Besides the Crust and meteoric components , the hydrothermal fluid of the rocks was probably composed of the substance sourced from deep earth.

Key words: Santanghu Basin; Middle Permian; continental rift basin; analcime , geochemistry; sublacustrine hydrothermal fluid; hydrothermal sedimentary rocks