

文章编号: 1000-0550(2009) 04-0642-08

酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相热水沉积岩 锶同位素地球化学特征¹

文华国¹ 郑荣才¹ Hainuo Qing² 吴国璋³ 夏佩芬³ 陈浩如¹ 廖一¹

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

2 Department of Geology, University of Regina, Regina SK, Canada S4S 0A2; 3. 同济大学海洋地质国家重点实验室 上海 200092)

摘要 以地质背景、物质组分和岩石组构分析为基础,对酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相热水沉积钠长石—铁白云石岩进行了 Sr 同位素地球化学研究。结果表明,热水沉积岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值变化范围为 0.712 25~0.717 81, 平均值 0.715 61, 远高于同期海水和下沟组玄武岩,略高于代表早白垩世湖水锶同位素组成的藻灰岩,但低于基底壳源硅铝质岩,反映热流体不可能为单纯的湖水或幔源岩浆水;其中直接化学结晶沉淀的纹层状泥微晶热水沉积岩锶同位素比值变化范围较小,可代表均一化的热卤水池流体锶同位素组成特征;指示不同喷流口位置的“水爆角砾岩”锶同位素组成变化较大,但同一位置的热角砾与胶结物锶同位素组成基本一致,说明两者应属于具相同成因意义的同期热水喷流沉积产物;综合青西凹陷下沟组湖相热水沉积岩锶同位素地球化学特征,初步推测早白垩世湖底热流体可能为富集硅铝质基底岩石高放射成因 Sr 的深循环下渗湖水与少量上升幔源岩浆水构成的混合热流体,可为青西凹陷早白垩世湖底热流体性质的确定以及热流体循环动力学模型和热水沉积模式的建立奠定基础。

关键词 Sr 同位素 湖相热水沉积岩 热流体 下白垩统 酒泉盆地

第一作者简介 文华国 男 1979 年出生 博士后 讲师 沉积学与石油地质学 E-mail wenhuagu@ yahoo.cn

中图分类号 P595 **文献标识码** A

热水沉积岩和热水成矿作用是当前地学界最前沿的研究热点之一,国内外已报道的资料众多,但主要集中在海相研究成果中^[1~7],而湖相的研究成果很少^[8~13]。酒泉盆地青西凹陷下白垩统下沟组(K_{1g})地层中发育的具深湖相沉积特征的暗色“泥云岩”(或泥质白云岩、白云质泥岩和白云岩,统称“泥云岩”)^④,已被确定为一类罕见的湖相热水沉积岩,综合定名为重晶石—钠长石—铁白云石热水沉积岩^[9,10,14]。据国内外文献资料显示,湖相白烟型热水沉积岩的报道国外基本上都集中在现代湖底热水硅华沉积^[15],国内曾由刘建明^[8]报道过一例湖相热水硅质岩,而酒泉盆地青西凹陷下沟组中所发育的湖相热水沉积岩,以富含铁白云石、钠长石和其他复杂矿物组分而显得非常特殊和罕见,且属于真正满足“海湖底喷出的热流体直接沉淀作用的产物”定义的热热水沉积岩^[9,10],明显有别于国内外已报道的湖相热水沉积岩,具有极高的研究价值。本文在岩石学特征分析基础上,首次系统研究了下沟组湖相热水沉积岩的锶同位素地球化学特征,尝试揭示热流体中锶组

分的物质来源、影响因素以及同位素的热流体示踪意义。

1 湖相热水沉积岩地质背景

酒泉盆地位于青藏高原东北部的最边缘,位处北祁连与阿尔金两巨型构造带交汇处。该盆地是在古生界褶皱基底之上,于中、新生代通过北东向基底构造伸展断陷作用而发育起来的陆相断陷盆地,由酒西和酒东两个次级盆地组成。青西凹陷位于酒西次级盆地东南部,为酒西次级盆地的沉降—沉积中心,面积约 650~800 km²,由红南次凹、青西低凸起、青南次凹三个次级构造单元组成和发育有一系列分割性很强的不对称箕状或半地堑断陷。下白垩统下沟组湖相热水沉积岩受燕山期 NE—NNE 走向基底断裂张扭性活动控制,主要分布于青南次凹南部的深凹陷内(图 1),且厚度巨大,其主要矿物以微晶—隐晶质的钠长石和铁白云石为主^[16],次为重晶石和石英,局部含有丰富的方沸石、地开石和黄铁矿等,偶含碎屑状闪锌矿、黄铜矿和方铅矿^[19]。白垩纪期间全球大

¹ 国家自然科学基金项目(批准号:40672073)和教育部博士点基金项目(NO.20060616014)资助。

^④王成善,郑荣才,朱利东,等.酒泉盆地沉积特征与层序地层学研究.成都理工大学和玉门油田分公司勘探开发研究院,2004

收稿日期:2008-06-30 收修日期:2008-11-06

沉积物发生重力滑动有关,亦可指示热水喷流口位置。

3 锶同位素地球化学特征

自瑞典地质学家 Wickman 首次报道锶同位素在地质学中的应用以来^[23],锶同位素的研究不断深入。近年来,锶同位素在研究不同地质历史时期火山岩的源区特征和深部过程的应用较多,已成为现代成因岩石学研究的重要手段^[24,25];其次,结合 Rb 同位素可很好地对热液矿床成矿时间进行定年^[4,5,26];更重要的是,锶同位素组成可进行同位素示踪应用,其空间变化可用来指示携带成矿元素的流体迁移行为和方向,已成为推测或确定古热液流体活动及成矿元素迁移踪迹的重要手段^[27,28],是探讨成矿流体特征和成矿物质来源最有力的工具之一^[29],这也是本项目进行锶同位素地球化学研究的目的。

3.1 采样及分析方法

18件样品中 14件取自 8口钻井下沟组深一半深湖相的地层岩心,4件取自早峡剖面同层位地表露头,所有样品新鲜和剔除处理,分别代表湖相铁白云石和钠长石水爆角砾岩、铁白云石—重晶石热水胶结

物、纹层状泥微晶钠长石—铁白云石热水沉积岩、碱性拉斑玄武岩和核形石灰岩,分析结果列于表 1。

样品的 Sr 同位素分析在中国地质调查局同位素地球化学开放研究实验室(宜昌)完成。全岩样品在聚四氟乙烯溶样器中加 HF 和 HClO₄ 混合酸样品进行分解,采用 Dowex 50 × 8(200—400)阳离子交换技术,分离和纯化 Sr⁸⁷/Sr⁸⁶ Sr 同位素比值采用 MAT-261 可调谐多收质谱计直接测定,实验条件为温度 20℃,湿度 30%,整个分析过程中在超净实验室完成,用国际标样 NBS987 对仪器和分析流程进行监控,NBS987 的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素组成测定值为 0.710 34 ± 0.00006(2σ),全流程 Sr 的本底空白 < 5 × 10⁻⁹ g。

3.2 分析结果与锶同位素特征

从表 1 可以看出,下沟组不同成因类型的样品锶同位素组成特征有很大的差异,有如下显著特征:

1) 代表正常湖水锶同位素组成的下沟组核形石藻灰岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.713 19~0.713 21,平均值为 0.713 20 远高于早白垩世海水 0.707 401 的平均值^[30](图 2)。湖相沉积的碳酸盐岩 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值要比海相偏大的原因,与湖盆比海盆更易受高 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的壳源硅铝质岩影响有关。

表 1 酒泉盆地青西凹陷下沟组湖相热水沉积岩、正常沉积灰岩和拉斑玄武岩锶同位素组成^{a)}

Table 1 Strontium isotope composition of lacustrine hydrothermal sedimentary rock, the algal limestone and tholeiitic magma of Xiagou Formation in Qingxi Sag, Jiuquan Basin

样品号	层位	深度/m	采样点	岩性描述	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr(2σ)
QX08	K _{1g}	3766.43	柳 104 井岩心	泥—微晶铁白云石钠长石角砾	0.712 76 ± 0.00005
QX07	K _{1g}	3766.43	柳 104 井岩心	水爆角砾岩铁白云石重晶石胶结物	0.712 25 ± 0.00006
QX24	K _{1g}	4381	柳 6 井岩心	泥—微晶铁白云石钠长石角砾	0.715 88 ± 0.00003
QX23	K _{1g}	4381	柳 6 井岩心	水爆角砾岩铁白云石重晶石胶结物	0.716 71 ± 0.00004
QX26	K _{1g}	4381.6	柳 6 井岩心	泥—微晶铁白云石钠长石角砾	0.715 88 ± 0.00002
QX25	K _{1g}	4381.6	柳 6 井岩心	水爆角砾岩铁白云石重晶石胶结物	0.715 49 ± 0.00009
QX11	K _{1g}	4240.29	柳 104 井岩心	纹层状泥—微晶钠长石铁白云石岩	0.716 16 ± 0.00003
QX16	K _{1g}	4408.5	柳 4 井岩心	纹层状泥—微晶钠长石铁白云石岩	0.717 81 ± 0.00007
QX22	K _{1g}	4380.5	柳 6 井岩心	纹层状泥—微晶铁白云石钠长石岩	0.715 82 ± 0.00006
QX34	K _{1g}	4905.6	柳 9 井岩心	纹层状泥—微晶钠长石铁白云石岩	0.715 06 ± 0.00003
QX48	K _{1g}	4459.9	窿 105 井岩心	变形纹层状泥—微晶铁白云石钠长石岩	0.715 10 ± 0.00002
QX56	K _{1g}	4354.57	青 1-1 井岩心	纹层状微晶重晶石钠长石铁白云石岩	0.717 67 ± 0.00003
QX57	K _{1g}	4045.22	青 2-1 井岩心	纹层状泥—微晶钠长石铁白云石岩	0.715 17 ± 0.00006
QX61	K _{1g}	4023	青 2-4 井岩心	纹层状泥—微晶铁白云石钠长石岩	0.716 84 ± 0.00002
QX63	K _{1g}	209.2	早峡沟口	枕状碱性拉斑玄武岩	0.706 96 ± 0.00001
QX64	K _{1g}	240.6	早峡沟口	枕状碱性拉斑玄武岩	0.706 78 ± 0.00006
QX65	K _{1g}	297.1	早峡沟口	核形石藻灰岩	0.713 21 ± 0.00002
QX66	K _{1g}	297.3	早峡沟口	核形石藻灰岩	0.713 19 ± 0.00004
幔源锶同位素组成平均值 ^{b)}					0.703 50
早白垩世海水锶同位素组成平均值 ^{c)}					0.707 401
壳源硅铝质岩锶同位素组成平均值 ^{d)}					0.720 ± 0.005

a) 样品测试在中国地质调查局同位素地球化学开放研究实验室(宜昌)完成, b) 据文献[33], c) 据文献[30], d) 据文献[31]

2) 各类热水沉积岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的变化范围为 0.712 25~0.717 81, 平均值为 0.715 61, 均低于研究区来自祁连山北部碎屑岩物源^[32]的基底壳源硅铝质岩锶同位素平均值 0.720 ± 0.005 ^[31] (图 2)。

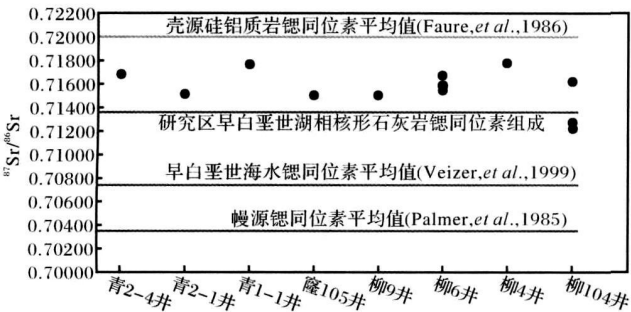


图 2 酒泉盆地青西凹陷下沟组典型钻井热水沉积岩锶同位素组成

Fig 2 Strontium isotope composition of lacustrine hydrothermal sedimentary rock of Xigou Formation in representative well of Qingxi Sag, Jiuquan Basin

3) 纹层状热水沉积岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围较小, 为 0.715 06~0.717 81, 平均值为 0.716 20, 远高于下沟组玄武岩和核形石藻灰岩, 但低于壳源硅铝质岩的锶同位素平均值 (图 2)。纹层状热水沉积岩的组构分析, 已证实隐晶质的矿物组分大都为热流体的直接结晶沉淀物, 由于岩性致密, 所经历的后期成岩蚀变改造很弱, 因此, 其锶同位素比值可代表热水矿物沉淀时热流体的初始锶同位素组成。

4) “水爆角砾岩”的锶同位素组成有 2 个特点: 其一是同一角砾岩中的角砾与胶结物的锶同位素组成基本一致; 其二是不同采样位置的“水爆角砾岩”锶同位素组成变化较大, 其中采自柳 104 井热水喷流口内的角砾和胶结物 (QX07 和 08) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.712 76 和 0.712 25, 平均值为 0.712 51, 系所有热水沉积岩样品的最低值, 且低于代表正常湖水来源的下沟组核形石藻灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值, 而采自热水喷流口外的其它样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.715 49~0.716 71, 平均值为 0.715 99, 变化范围和平均值都与纹层状热水沉积岩基本一致。

5) 代表幔源锶来源的早峡沟口下沟组水下喷发的枕状碱性拉斑玄武岩, 其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.706 78~0.706 96, 平均值为 0.706 87, 远远低于壳源硅铝质岩锶同位素平均值 0.720 ± 0.005 ^[31], 与全球幔源锶同位素 0.703 50 的平均值^[33] 比较则略有偏高 (图

3), 说明岩浆运移过程中有来自基底壳源硅铝质岩高放射性锶的混染。该套玄武岩呈夹层分布于湖相地层中, 经同位素测年证实与青西凹陷热水沉积岩同为早白垩世产物^[18], 稀土元素和微量元素地球化学特征表明其形成于大陆拉张环境, 源区为富集地幔^[19]。

3.3 有关锶同位素地球化学特征的成因意义讨论

根据上述锶同位素分析结果, 对研究区热水沉积岩锶同位素地球化学特征成因意义讨论如下:

1) 已有的研究成果已初步证实该地区下沟组湖底热水沉积作用发生在具备还原、偏碱性条件的深源热卤水池环境中, 热液喷流沉积过程中断陷盆地的深水、高压和封闭的环境条件, 限定了湖底热卤水池很小的热流体/湖水混合比例^[11]。除一件采自喷流口内的样品, 所有的热水沉积岩样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值均远高于代表幔源锶来源的下沟组玄武岩和高于代表正常湖水来源的下沟组核形石藻灰岩, 但明显低于基底沉积的壳源硅铝质岩平均值, 表明热水沉积岩中的锶不可能直接由湖水提供, 可能部分来源于下覆基底沉积, 部分来自同期幔源岩浆热流体, 显示出某种复杂成因的混合热流体来源性质。

2) 代表热卤水池环境的各类纹层状热水沉积岩的采样位置虽然不同, 但 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化范围较小, 说明来自各喷流口的热流体在热卤水池的聚集过程中已发生锶同位素的均一化作用而具有相似的性质, 在沉淀热水矿物的过程中也未发生强烈的 Sr 同位素分馏。

3) 采自不同位置的“水爆角砾岩”锶同位素组成变化较大, 但同一位置的样品角砾与胶结物锶同位素组成基本一致的特点, 可说明如下 2 个问题: ①由于“水爆角砾岩”产自喷流口内或喷流口附近, 更能代表热水矿物沉淀时热流体的初始锶同位素组成特征; ②形成胶结物和角砾的热流体在沉淀过程中未发生 Sr 同位素分馏, 说明两者在热水沉积的成因意义上不具备差别, 应属于同期热水不同阶段和不同方式形成的产物。

4) 代表正常湖水锶同位素组成的下沟组核形石藻灰岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值相比热水沉积岩具有较低的锶同位素组成, 可能的原因除了热水沉积岩中的锶部分来源于下覆壳源硅铝质岩基底沉积外, 是否存在低等藻类生物对湖水中锶同位素具有分馏作用还有待进一步的研究。

表2 不同地区“白烟型”热水沉积岩 Sr同位素组成与热流体来源对比

Table 2 Comparison of strontium isotope composition and hydrothermal fluid source between different “white smoke type” hydrothermal sedimentary rock

样品类型	样品数	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值		热流体来源
		变化范围	平均值	
贵州天柱大河边和玉屏热水沉积重晶石 ^[28]	17	0.708 31~0.708 96	0.708 59	海水与海底幔源热卤水混合热流体
滇西兰坪—思茅盆地热水沉积重晶石 ^[22]	2	0.711 50~0.711 97	0.711 74	壳源与幔源混合热流体
滇西兰坪—思茅盆地热水沉积铁白云石 ^[35]	2	0.708 74~0.712 32	0.712 02	
甘肃西成矿化集中区热水沉积灰岩 ^[27]	5	0.709 94~0.718 11	0.712 42	海水与壳源热卤水的混合热流体
青海锡铁山热水喷流沉积大理岩 ^[36]	9	0.711 31~0.715 21	0.712 59	海水与壳源热卤水的混合热流体
下沟组“水爆角砾岩”铁白云石重晶石胶结物	3	0.712 25~0.716 71	0.714 82	湖盆壳源与少量幔源混合的热卤水
下沟组“水爆角砾岩”铁白云石钠长石角砾	3	0.712 76~0.715 88	0.714 84	
热水沉积的纹层状泥微晶钠长石铁白云石岩	8	0.715 06~0.717 81	0.716 20	

5) 据黄思静研究^[34],正常沉积岩在埋藏成岩过程中相对晚期沉淀的碳酸盐胶结物,特别是铁白云石胶结物由于放射性成因铷的加入,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值会高于相对早期沉积物。然而本研究区热水沉积岩中的铁白云石胶结物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,无论是变化范围还是平均值都低于同生期热水直接沉淀形成的纹层状泥微晶铁白云石(表2),表明铁白云石胶结物并非正常湖相沉积期后的胶结物,而是喷流口内或喷流口附近因超温、超压的热水沸腾爆炸而形成的热水角砾岩并与之伴生的热流体迅速沉淀、结晶和充填胶结作用的产物。

6) 通过不同地区“白烟型”热水沉积岩铷同位素组成特征对比,对应的热流体来源呈现出以海底幔源热卤水为主的混合热流体,逐渐向陆(湖)相壳源热卤水为主的混合热流体过渡的规律(表2和图3),伴随各类型热水沉积岩受陆相高放射性成因铷加入的影响增强, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值加大的变化趋势明显,反映这些热水沉积岩的铷同位素组成与热流体来源、性质和演化有着不同的因果关系,如幔源铷来源的热水沉积岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值偏低,反之亦然。另外,下沟组湖相热水沉积的胶结物“水爆角砾”纹层状热水沉积岩的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值呈现逐渐加大的演化趋势,且明显高于同期玄武岩铷同位素组成,说明青西凹陷下沟组湖相热水沉积岩的铷来源主要受壳源铷影响,但据研究区热水沉积岩与玄武岩的稀土元素和微量元素对比关系分析,显示两者具有一定的相似性和亲缘性^[11 15],推测热流体的铷同位素组成中存在少部分来自同期玄武岩喷发活动时幔源铷的混入,如采自柳104井喷流口内的“水爆角砾岩”相对较低的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,可能与玄武岩喷发活动时幔源铷混入热流体有关。

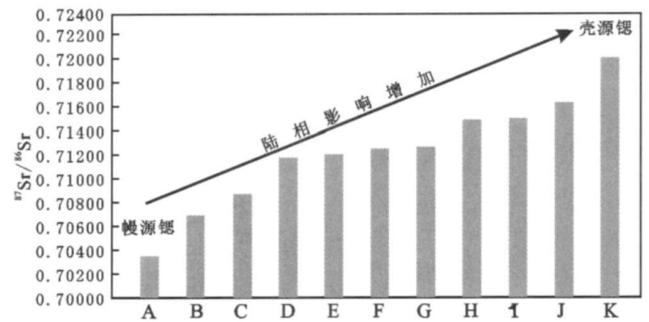


图3 不同地区热水沉积岩铷同位素组成均值直方图

Fig 3 Histogram for mean $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ average value of different “white smoke type” hydrothermal sedimentary rock

A. 幔源铷; B. 旱峡沟口玄武岩; C. 贵州天柱和玉屏热水沉积重晶石; D. 滇西兰坪—思茅热水沉积重晶石; E. 滇西兰坪—思茅热水沉积铁白云石; F. 甘肃西成热水沉积灰岩; G. 青海锡铁山热水沉积大理岩; H. 下沟组“水爆角砾岩”胶结物; I. 下沟组“水爆角砾岩”角砾; J. 下沟组纹层状泥微晶钠长石铁白云石岩; K. 壳源硅铝质岩

综上所述,在不同地质环境条件下,热水沉积岩中的铷同位素组成和变化范围不同。由于热流体中的Sr是源区Sr和热流体运移过程中途径基岩Sr的综合叠加效应的结果,包含了流体源区和途径基岩的信息,因此,Sr同位素是示踪流体来源和流经途径的有效示踪剂^[37]。通过上述针对青西凹陷湖相热水沉积岩铷同位素组成特征研究,可推测其主要来源于深循环的下渗湖水与少量来自同期玄武岩喷发活动带来的幔源岩浆水构成的混合热流体,并以早白垩世伸展构造控制的北东向次级基底断裂作为通道和萃取硅铝质基底岩石中的高放射性成因铷,从线性断裂带喷出和结晶沉淀热水矿物而形成化学成因的湖相热水沉积岩。从贵州天柱大河边和玉屏热水沉积重晶石→滇西兰坪—思茅盆地热水沉积重晶石和铁白云石→甘肃西成矿化集中区热水沉积灰岩→青海锡铁

山热水喷流沉积大理岩[→]青西凹陷湖相热水沉积钠长石铁白云石岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值平均值呈现逐渐增大趋势(表 2和图 3),对应的热流体来源研究呈现出以海底幔源热卤水为主的混合热流体逐渐向壳源热卤水为主的混合热流体过渡为典型规律(表 2),可进一步旁证研究区高锶热流体来源于湖盆壳源与少量幔源混合热卤水的推断是可靠的,结合青西凹陷早白垩世受基底次级断裂控制的断陷湖盆构造背景,以及热水沉积岩微量元素和稀土元素地球化学特征与下沟组玄武岩具有一定的亲缘性,也为热流体中含有幔源组分提供佐证。

4 结论

通过上述阐述和对比研究,可得出以下几点结论:

(1) 来自不同喷流口位置的热流体在湖底热卤水池聚集过程中有均一化作用,直接化学结晶沉淀的纹层状泥微晶热水沉积岩⁸⁷Sr/⁸⁶Sr比值可代表均一化的热卤水池流体锶同位素组成;不同喷流口位置的热流体锶同位素初始值不一致,可能与不同喷流口位置的热流体受到的幔源锶不同程度的混入有关,因此,指示不同喷流口位置的“水爆角砾岩”锶同位素组成变化较大。

(2) 各类热水沉积岩锶同位素变化范围和均值远高于下沟组玄武岩和同期海水,略高于早白垩世海水,但低于硅铝质基底岩石,结合不同地区热水沉积岩锶同位素组成特征对比研究结果,表明热流体很可能属于富集硅铝质基底岩石高放射性成因 Sr 的深循环下渗湖水与少量上升幔源岩浆水构成的混合热流体。

(3) 推测酒泉盆地青西凹陷早白垩世以伸展构造控制的北东向次级基底断裂作为通道,来自深部的混合热流体沿基底断裂运移和萃取基底中硅铝质岩石高放射性成因锶,从线性断裂带喷出和在湖底低洼部位聚集形成热卤水池,并从中结晶、沉淀出重晶石、钠长石和铁白云石等热水矿物,从而形成罕见的、以铁白云石为主的角砾状和纹层状湖相“白烟型”热水沉积岩。

致谢 论文撰写过程中得到了黄思静教授和刘文均教授的指导与帮助,在此谨表谢意。

参考文献 (References)

- 1 Reyes A G, Masoth G, Ronde C D, *et al*. Hydrothermal mineralization in arc-type submarine volcanoes [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 2006, 70(18): A528
- 2 Koschinsky A, Seifert R, Knappe A, *et al*. Hydrothermal fluid emanations from the submarine Kickán Jenny volcano, Lesser Antilles island arc [J]. *Marine Geology*, 2007, 244(1-4): 129-141
- 3 肖荣阁, 杨忠芳, 杨卫东, 等. 热水成矿作用 [J]. *地质前缘*, 1994, 1(3-4): 140-147 [Xiao Rongge, Yang Zhongfang, Yang Weidong, *et al*. Hydrothermal mineralization [J]. *Earth Science Frontiers* 1994, 1(3-4): 140-147]
- 4 梁华英, 王秀璋, 程景平. 吉林四平银(金)矿床 Rb-Sr 定年及热液活动的时间跨度 [J]. *大地构造与成矿学*: 2001, 25(2): 194-198 [Liang Huaying, Wang Xiuzhang, Cheng Jingping. Rb-Sr isotope age and the time scale of hydrothermal activities for the Siping Ag(Au) deposit, Jilin province [J]. *Geotectonica et Metallogenia* 2001, 25(2): 194-198]
- 5 方维萱, 胡瑞忠, 谢桂青, 等. 墨江镍金矿床(黄铁矿)硅质石的成岩成矿时代 [J]. *科学通报*, 2001, 46(10): 857-860 [Fang Weixuan, Hu Ruizhong, Xie Guiqing, *et al*. The rock-forming and ore-forming ages of the silica rock (pyrite) in the nickel-gold deposits in Mojiang [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(10): 857-860]
- 6 李江海, 牛向龙, 冯军. 海底黑烟筒的识别研究及其科学意义 [J]. *地球科学进展*, 2004, 19(1): 17-24 [Li Jianghai, Niu Xianglong, Feng Jun. The identification of the fossil black smoker chimney and its implication for scientific research [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19(1): 17-24]
- 7 冯军, 李江海, 程素华. 河北兴隆中元古代古海底黑烟筒中微生物化石的发现及其意义 [J]. *微体古生物学报*, 2007, 24(2): 205-209 [Feng Jun, Li Jianghai, Cheng Shuhua. The discovery of microbial fossils in the mesoprozoic submarine black smoker chimneys and its implications [J]. *Acta Micropaleontologica Sinica* 2007, 24(2): 205-209]
- 8 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]
- 9 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]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2003, 30(1): 1-8 [Zheng Rongcai, Wang Chengshan, Zhu Lidong, *et al*. Discovery of the first example of “white smoke type” of exhalative rock (hydrothermal sedimentary dolostone) in Jixi basin and its significance [J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2003, 30(1): 1-8]
- 10 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*, 2006, 22(12): 3027-3038 [Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Fan Mingtao, *et al*. Lithological characteristics of sublacustrine white smoke type exhalative rock of the Xigou Formation in Jixi Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica* 2006, 22(12): 3027-3038]
- 11 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*, 2006, 26(4): 41-47 [Zheng Rongcai, Wen Huaguo, Gao Hongcan, *et al*. Characteristics

- of rare earth elements of lacustrine exhalative rock in the Xiagou Formation, lower Cretaceous in Qixi Sag, Jiuqi Basin [J]. *Journal of Mineralogy and Petrology*, 2006, 26(4): 41-47
- 12 Sherlock R L. The relationship between the McLaughlin gold-mercury deposit and active hydrothermal systems in the Geysers-Clear Lake area, northern Coast Ranges, California [J]. *Ore Geology Reviews*, 2005, 26: 349-382
 - 13 Granina L Z, Klerkx J, Callender E, *et al*. Bottom sediments and pore waters near a hydrothermal vent in Lake Baikal (Frolkha Bay) [J]. *Russian Geology and Geophysics*, 2007, 48(3): 237-246
 - 14 范铭涛, 杨麟科, 方国玉, 等. 青西凹陷下白垩统湖相喷流岩成因探讨及其意义 [J]. *沉积学报*, 2003, 21(4): 560-564 [Fan Mingtao, Yan Linko, Fang Guoyu, *et al*. Origin of lacustrine hydrothermal sedimentary rock (Lower Cretaceous) in Qixi Sag and its significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2003, 21(4): 560-564]
 - 15 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]. 四川: 成都理工大学, 2008 [Wen Huaguo. *Geochemical Characteristics and Genesis of Lacustrine “White Smoke Type” Hydrothermal Sedimentary Rock in Qixi Sag, Jiuqi Basin* [D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2008 1-152]
 - 16 罗平, 杨式升, 马龙, 等. 酒西坳陷青西坳陷湖相纹层状泥质白云岩中泥级斜长石成因、特征与油气勘探意义 [J]. *石油勘探与开发*, 2001, 28(6), 32-33 [Luo Ping, Yang Shisheng, Ma Long, *et al*. Origin, feature and its significance to the petroleum exploration of the clay size plagioclase in lacustrine laminated argillaceous dolomite, Qixi depression in Jiuqi Basin [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2001, 28(6), 32-33]
 - 17 翟裕生. 地球系统科学与成矿学研究 [J]. *地质前缘*, 2004, 11(1): 1-10 [Zhai Yusheng. *Earth system sciences and the study on metallogenesis* [J]. *Earth Science Frontiers*, 2004, 11(1): 1-10]
 - 18 杨经绥, 孟繁聪, 张建新, 等. 重新认识阿尔金断裂东段红柳峡火山岩的时代及构造意义 [J]. *中国科学: D 辑*, 2001, 44(增刊): 94-102 [Yang Jingsui, Meng Fancong, Zhang Jianxin, *et al*. The shoshonitic volcanic rocks at Hongliuxia: Pulses of the Alyn Tagh fault in Cretaceous [J]. *Science in China Series D*, 2001, 44 (Suppl): 94-102]
 - 19 王晓东, 张志诚, 郭召杰, 等. 酒西盆地南缘早白垩世火山岩地球化学特征及其构造意义 [J]. *高校地质学报*, 2004, 10(4): 570-577 [Wang Xiaodong, Zhang Zhicheng, Guo Zhaojie, *et al*. Geochemical characteristics and tectonic significance of the Early Cretaceous volcanic rocks in the southern margin of Jiuqi Basin [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2004, 10(4): 570-577]
 - 20 任战利, 刘池阳, 张小会, 等. 酒泉盆地群热演化史恢复及其对比研究 [J]. *地球物理学报*, 2000, 43(5): 635-645 [Ren Zhanli, Liu Chiyang, Zhang Xiaohui, *et al*. Recovery and comparative research of the thermal history on Jiuqi Basin Group [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(5): 635-645]
 - 21 Brown A C. Sediment-host of stratiform copper deposits [M]. *Geoscience Canada*, 1993, 19(3): 125-141
 - 22 王江海, 颜文, 常向阳. 陆相热水沉积作用 [M]. 北京: 地质出版社, 1998, 1-132 [Wang Jianghai, Yan Wen, Chang Xiangyang. *Terrestrial Hydrothermal Sedimentation* [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998, 1-132]
 - 23 Wickman F E. Isotope ratios: A clue to the age of certain marine sediments [J]. *Journal of Geology*, 1948, 56: 61-66
 - 24 高永丰, 侯增谦, 魏瑞华, 等. 冈底斯碱性次火山岩地球化学和 Sr-Nd-Pb 同位素: 碰撞后火山作用亏损地幔源区的约束 [J]. *岩石学报*, 2006, 22(3): 547-557 [Gao Yongfeng, Hou Zengqian, Wei Ruihua, *et al*. The geochemistry and Sr-Nd-Pb isotopes of basaltic subvolcanics from the Gangdise: Constraints on depleted mantle source for post-collisional volcanism in the Tibetan plateau [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 22(3): 547-557]
 - 25 赖绍聪, 秦江锋, 李永飞, 等. 青藏高原木苟日王新生代火山岩地球化学及 Sr-Nd-Pb 同位素组成——底侵基性岩浆地幔源区性质的探讨 [J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 37(3): 308-318 [Lai Shaocong, Qin Jiangfeng, Li Yongfei, *et al*. Geochemical characteristics and Sr-Nd-Pb isotopic composition of Cenozoic volcanic rock—Discussion of basic magmatic mantle source characteristics in Mugeriwang of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 2007, 37(3): 308-318]
 - 26 杨建国, 杨林海, 任有祥, 等. 北祁连山寒山金矿床成矿作用同位素地质年代学 [J]. *地球学报*, 2005, 26(4): 315-320 [Yang Jianguo, Yang Linhai, Ren Youxiang, *et al*. Isotopic geochronology of the ore-forming process in the Hanshan gold deposit of the North Qilian Mountains [J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 2005, 26(4): 315-320]
 - 27 孙省利, 曾允孚. 西成矿化集中区热水沉积岩物质来源的同位素示踪及其意义 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(1): 41-46 [Sun Shengli, Zeng Yunfu. Isotopic tracer of material origin for hydrothermal sedimentary rocks and significance in Xicheng mineralization area [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(1): 41-46]
 - 28 夏菲, 马东升, 潘家永, 等. 贵州天柱大河边和玉屏重晶石矿床热水沉积成因的锶同位素证据 [J]. *科学通报*, 2004, 49(24): 2592-2595 [Xia Fei, Ma Dongsheng, Pan Jiayong, *et al*. Strontium isotopic evidences of hydrothermal sedimentary barite deposits in Dahebian-Yuping, Guizhou [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2592-2595]
 - 29 郑永飞, 陈江峰. 稳定同位素地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 2000 [Zheng Yongfei, Chen Jiangfeng. *Stable Isotopic Geochemistry* [M]. Beijing: Science Press, 2000]
 - 30 Veizer J, Ala D, Azmy K B, *et al*. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chemical Geology*, 1999, 161: 59-88
 - 31 Faure G. *Principles of Isotope Geology* [M]. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 1986, 160-230
 - 32 牛洁, 张虎才, 常凤琴, 等. 柴达木察尔汗贝壳堤剖面 Sr 同位素及其环境意义 [J]. *高校地质学报*, 2007, 13(1): 14-22 [Niu Jie, Zhang Hucai, Chang Fengqing. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios of shellbar section at Charhan Lake, Qaidam Basin and its paleoenvironmental significance [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2007, 13(1): 14-22]
 - 33 Palmer M R, E Hefield H. Sr isotope composition of sea water over the past 75 Myr [J]. *Nature*, 1985, 314: 526-528

- 34 黄思静, 石和, 张萌, 等. 锶同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用 [J]. 沉积学报, 2002, 20(3): 359-366 [Huang Sijing, Shi He, Zhang Meng *et al*. Application of strontium isotope stratigraphy to diagenesis research [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2002, 20(3): 359-366]
- 35 肖荣阁, 陈卉泉, 袁见齐. 云南中生代地质与矿产 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993 [Xiao Rongge, Chen Huiquan, Yuan Jianqi. *Geology and Mineral Resources of Mesozoic in Yunnan* [M]. Beijing: Ocean Publishing House, 1993]
- 36 祝新友, 邓吉牛, 王京彬, 等. 锡矿山喷流沉积矿床卤水与海水的相互作用 [J]. 地质论评, 2007, 53(1): 52-64 [Zhu Xinyou, Deng Jiniu, Wang Jingbin *et al*. Study on marble of the Xitianshan Lead-Zinc SEDEX deposit, Qinghai Province: Interaction between exhaled brine and seawater [J]. *Geological Review*, 2007, 53(1): 52-64]
- 37 彭建堂, 胡瑞忠, 邓海琳, 等. 湘中锡矿山锑矿床的 Sr 同位素地球化学 [J]. 地球化学, 2001, 30(3): 248-256 [Peng Jiantang, Hu Ruizhong, Deng Hailin. Strontium isotope geochemistry of the Xikuangshan antimony deposit, Central Hunan [J]. *Geochimica*, 2001, 30(3): 248-256]

Characteristics of Strontium Isotopic Geochemistry of Sublacustrine Hydrothermal Sedimentary Rock of Xiagou Formation in Qingxi Sag, Jiuquan Basin

WEN Hua-guo¹ ZHENG Rong-cai¹ Haiuo QING² WU Guo-xuan³
XIA Pei-fen³ CHEN Hao-nu¹ LIAO Yi¹

(1 State Key Laboratory of Oil/Gas Reservoir Geology and Exploitation, Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059)

2 Department of Geology, University of Regina, Regina, SK, Canada S4S 0A2;

3. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092)

Abstract Based on the analysis of geologic background, hydrothermal material components and rock fabric, we carry out the study of Sr isotopic geochemistry on the lacustrine hydrothermal sedimentary albite-ankerite rock of Xiagou Formation, Lower Cretaceous in Qingxi Sag, Jiuquan Basin. The $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of hydrothermal sedimentary rock in the study area is 0.71225~0.71781 and the average value 0.71561 is much higher than the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of seawater and basalt of corresponding period and a little higher than the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of the algal limestone, which represents the strontium isotopes composition of lake water in early Cretaceous, but lower than the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio of underlying silicon-aluminum rock. It shows that the thermal fluid is not simple lake water or mantle magmatic water. The laminated mud-microcrystallite hydrothermal sedimentary rock is the product of hydrothermal mineral chemical precipitation and the variation range of its $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratio is less, which represent the composition of Sr isotope of thermal fluid in homogeneous hot brine pool. The composition of Sr isotope of "water bursting breccia rock" which indicates different jet orifice location has major variation, but the composition of Sr isotope of hydrothermal breccia and cementation are almost consistent in the same jet orifice, which shows that both of them are the same period and the same resource eruptive flow sediments. From strontium isotope geochemistry characteristics of hydrothermal sedimentary rock in Qingxi Sag, Jiuquan Basin, it is primarily speculated that early Cretaceous sublacustrine hydrothermal fluid in the area is the mixed hydrothermal fluid which is constituted of deep circulating lake water and a little of mantle-derived magmatic water and full of high radiogenic Sr of underlying silicon-aluminum basement rock. The preliminary report and study of strontium isotope composition of lacustrine hydrothermal sedimentary rock will lay foundation for the further research of the early Cretaceous sublacustrine hydrothermal fluid nature, circulatory geodynamic model of the hydrothermal fluid and hydrothermal sedimentary mode.

Key words Sr isotope, lacustrine hydrothermal sedimentary rock, hydrothermal fluid, lower Cretaceous, Jiuquan Basin