

新疆塔木铅锌矿成矿流体特征与矿床成因

杨向荣^{1,2,3}, 彭建堂¹, 胡瑞忠^{1*}, 戚华文¹, 刘 燊¹

(1. 中国科学院地球化学研究所 矿床地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002; 2. 新疆大学 地质与勘查工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830049; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049)

摘 要: 新疆塔木铅锌矿赋存于石炭系碳酸盐岩断层破碎带中, 矿体和手标本尺度呈现管/脉构造特点。管/脉壁主要由闪锌矿、方铅矿构成, 管/脉中心充填白云石 II, 管内可见钡-钾长石微粒, 暗示成矿流体淋滤下伏地质体。充填期白云石 II 较第 I 期白云岩化灰岩表现出贫 ¹³C、¹⁸O 的特点, 反映成矿过程可能存在贫 ¹³C、¹⁸O 的物质加入。鉴于白云石 II 流体包裹体均一温度为 119 ~ 191 °C、闪锌矿流体包裹体存在 CH₄、C₂H₆、H₂S 气相组分、邻区达木斯乡和什拉甫剖面下石炭统有 4 个沥青显示点和 24 个荧光显示点、麦盖提斜坡海相石炭系曲 1 井、麦 3 井原油 δ¹³C 介于 -34‰ ~ -31‰ 之间及流体包裹体液相组分未见 SO₄²⁻, 可以推测成矿作用与热化学硫酸盐还原(TSR)过程相关。综合上述因素, 可以认为新疆塔木铅锌矿为后生的与 TSR 作用相关的矿床。

关键词: 热化学硫酸盐还原; 稳定同位素; 矿床成因; 碳酸盐岩; 塔木铅锌矿; 新疆

中图分类号: P596; P618.4 文献标识码: A 文章编号: 0379-1726(2009)06-0536-13

Fluid characteristic and ore genesis of Tamu lead and zinc ore deposit, Xinjiang

YANG Xiang-rong^{1,2,3}, PENG Jian-tang¹, HU Rui-zhong^{1*}, QI Hua-wen¹ and LIU Shen¹

1. State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;

2. College of Geology and Engineering of Exploration, Xinjiang University, Ürümqi 830049, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Tamu lead and zinc ore deposit locates in a fault fragmental belt of Carboniferous carbonate. Pipe-like ore bodies distribute in the fragmental belt on macro scale and hand specimen scale. Sphalerite and galena constitute the wall of pipe, and the core is filled by dolomite II. The particulate of hyalophane found in the pipe for the first time implies some parts of deeper materials have been leached. Comparing with dolomite I, dolomite II is depleted in ¹³C and ¹⁸O, implying addition of ¹³C and ¹⁸O depleted materials. Taking account of the homogeneous temperature of fluid inclusions in dolomite II (119 - 191 °C), the CH₄-C₂H₆-H₂S gas composition of sphalerite fluid inclusions, four bitumen points and 24 fluorescence points in Heshilafu section, the negative δ¹³C of -34 to -31 per mille of marine Carboniferous oil of Qu-1 well and Mai-3 well in Magaiti slope, and the absence of SO₄²⁻ in the fluid inclusion, it is likely that the ore deposit was associated with thermal sulfate reduction (TSR). Therefore, Tamu lead and zinc ore deposit is epigenetic.

Key words: thermal sulfate reduction (TSR); stable isotopes; deposit genesis; carbonate rock; Tamu lead and zinc ore deposit; Xinjiang

收稿日期(Received): 2008-12-13; 改回日期(Revised): 2009-04-02; 接受日期(Accepted): 2009-07-04

基金项目: 中国科学院知识创新工程领域前沿项目(KZCX2-YW-107-6); 国家科技支撑计划项目(2006BAB07B04-04)

作者简介: 杨向荣(1972-), 男, 博士, 副教授, 矿物、岩石、矿床学专业。E-mail: paul_yxr@sina.com

* 通讯作者(Corresponding author): HU Rui-zhong, E-mail: huruizhong@vip.gyig.ac.cn, Tel: +86-851-5891962

0 引言

塔木铅锌矿赋存于塔里木西南缘铁克里克块隆晚古生代浅海相碳酸盐岩台地建造断层角砾岩带中,由于其所处台地相碳酸盐岩建造及其周边已发现多处铅锌矿矿点和矿化点,与密西西比河谷型(MVT)铅锌矿有着一定的相似性,因而受到了广泛的关注^[1-5]。前人在稀土元素、微量元素、矿石碳氧同位素、流体包裹体等研究的基础上,对该矿床成因提出了“受三个古含水层控制的 MVT 型”^[1,4]和“海底热液”活动^[2,6]这两种主要观点。由于前人对矿石结构构造、角砾和填隙物的研究较为薄弱,使得矿物生成顺序、矿化期次划分难以反映矿床实际,影响了对该矿床的成因认识。同时塔木铅锌矿同生或后生和成矿流体是否为多来源异地混合等问题,亦成为该类矿床研究的重点并被关注^[7-14]。本文拟通过矿体与围岩的接触关系、矿石结构构造、稳定同位素组成、稀土元素分布模式、固态沥青和钡-钾长石来讨论上述基本问题,为该类矿床的研究提供思路。

1 区域地质概况

塔木铅锌矿位于新疆阿克陶县库斯拉甫乡,区域出露地层为中、上泥盆统、石炭系及二叠系碎屑岩-碳酸盐岩建造,属塔里木西南缘铁克里克块隆晚古生代浅海相碳酸盐岩台地,下伏前寒武系变质岩,上覆侏罗系-白垩系碎屑岩夹碳酸盐岩及膏岩建造。NNW 向构造控制区域整体面貌(图 1)。铁克里克块隆除局部出露少量的辉绿岩脉外,缺乏岩浆活动产物。

上泥盆统奇自拉夫组(D_{3q})为一套滨海-陆相正常沉积的碎屑岩,由紫红、灰绿色石英砂岩、粉砂岩和砾岩组成,与上覆克里塔克组(C_{1k}),下伏克孜勒陶组(D_{2kz})为整合接触,局部为断层接触,分界的标志为沉积物变细,生物碎屑灰岩出现。该组含少量植物化石,形成时代依据 *Leptophloeum rhombicum* 植物化石而定为晚泥盆世。下石炭统克里塔克组(C_{1k})为一套含海相珊瑚、腕足类、腹足类、双壳类的碳酸盐岩夹少量碎屑岩建造,与上覆和什拉甫组及下伏奇自拉夫组均为整合接触,与下伏奇自拉夫组的分界标志为红色陆相粗碎屑岩出现。该组化石丰富,根据岩石组合特征及所产化石,应属浅海相沉积环境,形成时代为早石炭世早期^[15]。

区域上,邻区达木斯乡和什拉甫剖面下石炭统有 4 个沥青显示点和 24 个荧光显示点。前人在北侧邻区麦盖提斜坡曲 1 井、麦 3 井海相石炭系地层中查明有石油^[16]。

2 矿床地质特征

塔木铅锌矿主矿体受区域 NNW 向断层控制,另一组断层以 NEE 向为主,在其与 NNW 向断层的交汇部位多形成高品位的矿化富集地段。

塔木铅锌矿主要由四个矿体组成,主要经济矿体为矿体 I,目前生产中段为 2590 和 2560。矿体主

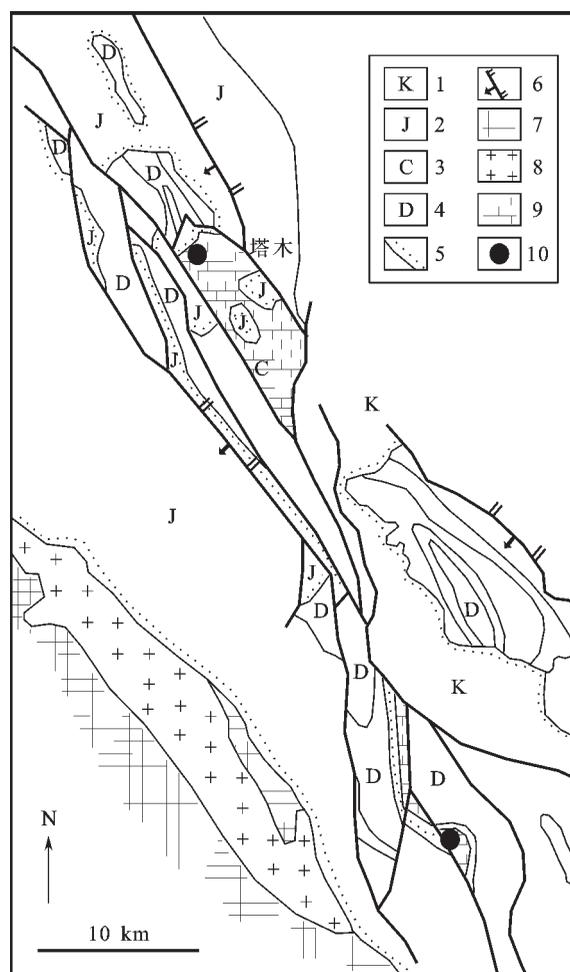


图 1 塔木铅锌矿床区域地质略图

Fig. 1 The geology sketch map of Tamu lead and zinc ore deposit
1 - 白垩系; 2 - 侏罗系; 3 - 石炭系; 4 - 泥盆系; 5 - 不整合界限; 6 - 逆冲断层; 7 - 中、新元古界变质岩; 8 - 花岗岩; 9 - 碳酸盐岩; 10 - 铅锌矿床。

1 - Cretaceous; 2 - Jurassic; 3 - Carboniferous; 4 - Devonian; 5 - unconformable contact boundary; 6 - thrust fault; 7 - Meso- and Neo-proterozoic metamorphosed rock; 8 - granite; 9 - carbonate rock; 10 - lead and zinc ore deposit.

要位于克里塔克组断层角砾岩带中(图2),角砾岩带白云岩化发育,角砾可根据角砾形态特征和角砾接触关系分为内碎屑角砾(圆状-次圆状、颗粒支撑或杂基支撑、白云质胶结,图3a和图3b)、成岩角砾(棱角状-次棱角状、颗粒支撑、白云质胶结、角砾有轻微溶蚀与白云质胶结物接触界线清晰,图3c和图3d)、后生角砾(次棱角状-次圆状、颗粒支撑、角砾边缘具有明显的溶蚀现象,图3e和图3f)、崩塌角砾(棱角状-次棱角状、杂基支撑、白云质胶结、填隙物嵌晶结构,图3g和图3h)和断层角砾(棱角状、具平坦断面和断层擦痕,图3i和图3j),断层角砾可进一步分为矿化断层角砾(图3j)和无矿化断层角砾(图3i)。总体上除矿化断层角砾外,角砾均不含硫化物,硫化物主要分布在填隙物中。填隙物可以根据结构特征分为沉积期填隙物(纹层构造,图3k)、成矿期溶蚀-交代阶段填隙物(管/脉构造,图3l;填隙物多为中-细晶白云石、雾心亮边结构,图3m)和成矿期充填阶段填隙物(粗晶白云石、自形-半自形结构,图3n)。填隙物中可见球粒状或不规则状固态沥青(图4)。

塔木铅锌矿硫化物分布在填隙物中,主要表现

为管/脉构造。通过对塔木铅锌矿矿石管/脉截面的观察(图5),含矿白云岩化灰岩起源于灰岩(图5(1))。初期的溶蚀-交代作用主要导致第I期白云岩化灰岩(图5(2))的形成,包括局部晚期重结晶的第I期白云岩(图5(3))。进一步的溶蚀-交代导致形成了局部星点状纯的白云石I(图5(4))。充填阶段形成结晶较粗的白云石II(图5(5))。白云岩化过程伴随碳酸盐矿物的溶解及孔洞的形成。这些孔洞多被粗粒白云石(图5(5))(白云岩II)充填。

伴随着第I期白云岩化灰岩的溶蚀-交代,形成了星点状的暗黑色闪锌矿(闪锌矿I,图5(6)),进一步的溶蚀-交代作用导致第I期白云岩化灰岩的崩解和大量暗黑色闪锌矿的出现并在局部出现纯白云石(白云石I)随后出现大量的暗绿色-暗黄色闪锌矿(闪锌矿II,图5(7))。闪锌矿II总体出现于充填期白云石(白云石II)靠溶蚀壁一侧,白云石从侧壁向内粒度变粗。闪锌矿I与闪锌矿II呈渐变接触关系,向孔洞中心粒度变粗,孔洞侧壁形成的闪锌矿II呈类管壁特征。继续的溶蚀-交代导致空洞继续扩大,空洞最终被白云石II所充填并嵌布着自形-半自形亮黄色或浅棕色粗粒闪锌矿(闪锌矿III,

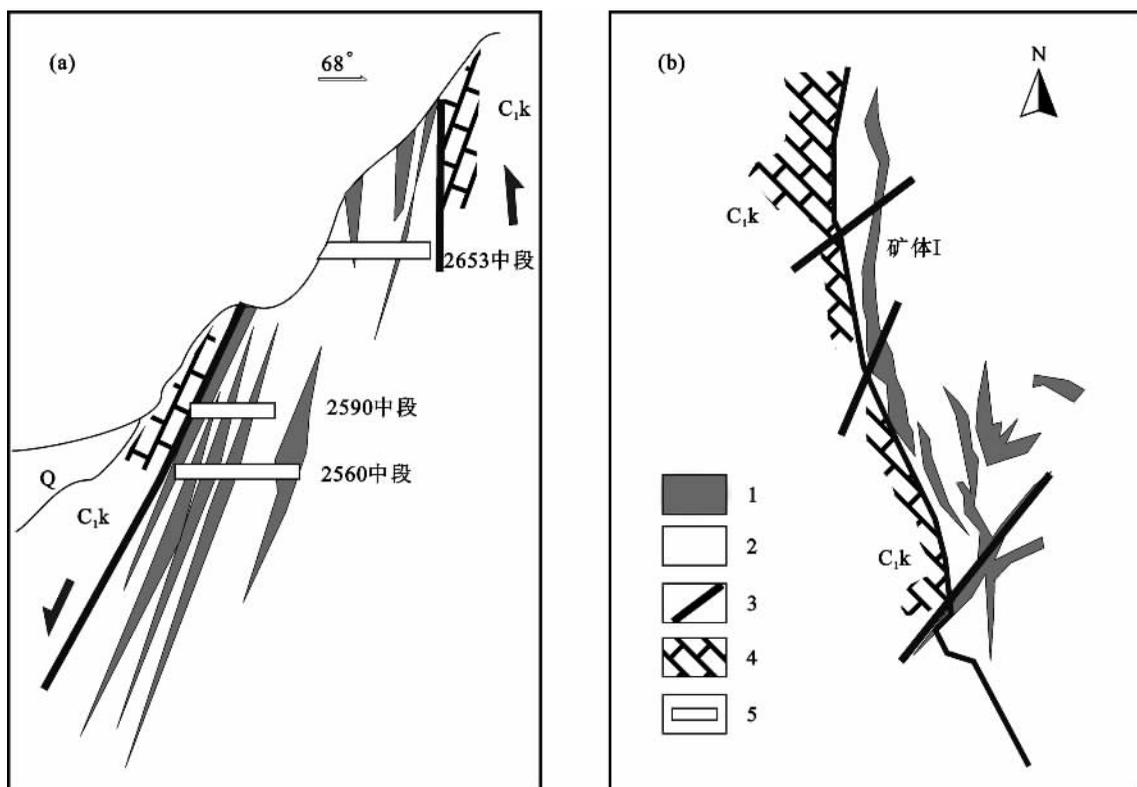


图2 塔木铅锌矿床剖面示意图(a)及地质略图(b)^[17]

Fig. 2 Section sketch map (a) and regional sketch map (b) of Tamu lead and zinc deposit^[17]

1 - 矿体; 2 - 角砾岩带; 3 - 断层; 4 - C₁k 白云岩化灰岩; 5 - 中段; (a)图中的粗箭头表示断裂带两侧相对运动方向。

1 - Orebody; 2 - breccia belt; 3 - fault; 4 - dolomitized carbonate, C₁k; 5 - level.

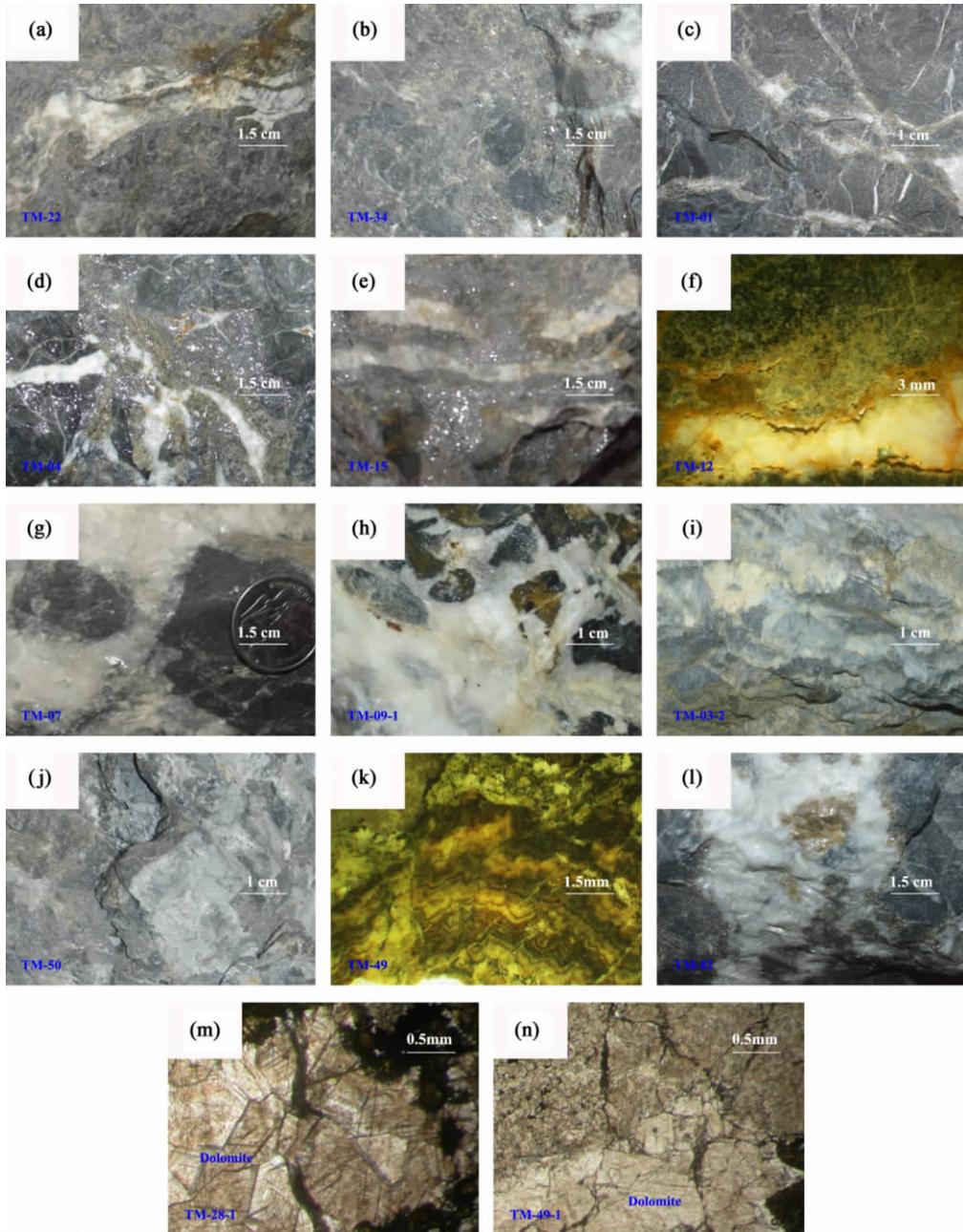


图 3 塔木铅锌矿矿体 I 矿石结构构造

Fig. 3 Ore structures and textures of ore-body I, Tamu lead and zinc ore deposit

(a) 内碎屑角砾, 2590 中段; (b) 内碎屑角砾, 2560 中段; (c) 成岩角砾, 2590 中段; (d) 成岩角砾, 2590 中段; (e) 后生角砾, 2590 中段; (f) 后生角砾, 2653 中段; (g) 崩塌角砾, 2590 中段; (h) 崩塌角砾, 2653 中段; (i) 断层角砾, 2590 中段; (j) 断层角砾, 2560 中段; (k) 纹层构造, 2560 中段, 薄片, 斜照光; (l) 管/脉构造, 2590 中段; (m) 雾心亮边结构, 2560 中段; (n) 雾心亮边结构, 2560 中段。

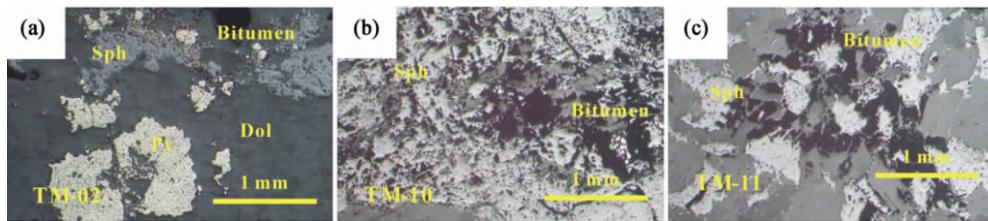


图 4 塔木铅锌矿矿体 I 中固态沥青

Fig. 4 Bitumen in Orebody I, Tamu lead and zinc ore deposit

(a) 反射偏光, 2590 中段; (b) 反射偏光, 2653 中段; (c) 反射偏光, 2653 中段。

Sph - 闪锌矿; Py - 黄铁矿; Dol - 白云石; Gal - 方铅矿; Dolomitized Carbonate - 白云岩化灰岩; Bitumen - 沥青。

YANG Xiang-rong et al. : Fluid characteristic and ore genesis of Tamu deposit

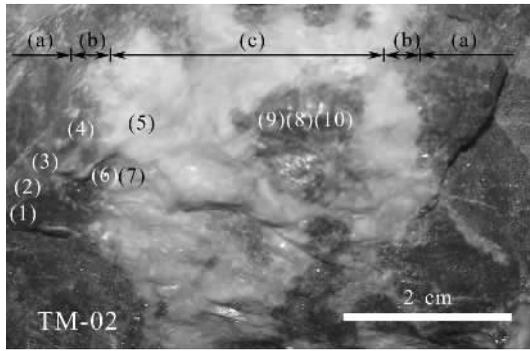


图5 矿石管/脉构造

Fig.5 Pipeline/vein structure of ore

- (1) 灰岩; (2) 第 I 期白云岩化灰岩; (3) 重结晶第 I 期白云岩; (4) 白云石 I; (5) 白云石 II; (6) 闪锌矿 I; (7) 闪锌矿 II; (8) 闪锌矿 III a; (9) 闪锌矿 III b; (10) 闪锌矿 III。
- (a) 白云岩化; (b) 交代成矿; (c) 空洞充填。
- (1) Limestone; (2) dolostone I; (3) recrystallized dolostone I; (4) dolomite I; (5) dolomite II; (6) sphalerite I; (7) sphalerite II; (8) sphalerite III a; (9) sphalerite III b; (10) sphalerite III.
- (a) Dolomitization; (b) ore replacement; (c) open space filling.

图 5(10)), 闪锌矿 III 可以分为两类, 即边缘处亮黄色粗粒闪锌矿 (闪锌矿 III b, 图 5(9)) 以及位于中心的亮黄色集合体闪锌矿 (闪锌矿 III a, 图 5(8))。方铅矿可以出现在溶蚀 - 交代和充填阶段, 但以闪锌矿 II 形成阶段为主, 矿物生成顺序见表 1。

3 取样及测试

本次研究样品主要取自塔木铅锌矿主要经济矿

体——矿体 I 的两个生产中段(2590 和 2560)。

充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 的流体包裹体显微测温利用中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室流体包裹体实验室冷热台 (Linkam THMSG600, 英国), 配备 Axiolab Pol 显微镜 (ZEISS, 德国), 测温范围 - 196 ~ 600 °C, 10 ~ 40 °C 时误差为 ±0.1 °C。

对白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩) 和充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 样品用日本岛津 EPMA-1600 型电子探针及 EDAX Genesis 能谱仪及 WDS 波谱仪进行了分析观测。

共对 7 对 (14 件) 具有典型的管/脉状样品进行了双目镜下单矿物挑选工作。对手工挑选出的充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 及白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩) 样品进行了稀土元素和微量元素测试, 测试仪器为 ELAN ICP-MS 600 DRC-e, 测试使用标准物质为 OU-6。

手工挑选出充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 和白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩) 样品 2 件以及溶蚀 - 交代阶段暗黑色、暗绿色闪锌矿 5 件, 在国土资源部宜昌地质矿产研究所同位素室进行了 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 测试, 全流程本底空白值 Rb 为 0.1 ng/g, Sr 为 0.3 ng/g, 标准物质选择 NBS-987 (实验室测定值为 0.71028 ± 0.00003, 标准值为 0.71024 ± 0.00026), 仪器为热电离子质谱仪 TRITON。

对挑选出的 7 对 (14 件) 充填阶段填隙物白云

表 1 塔木铅锌矿矿物生成顺序

Table 1 The sequences of mineral deposit in Tamu lead and zinc ore deposit

矿物	特征	沉积期	成岩期		后生期	
			成矿期	成矿后	表生	
						溶蚀-交代阶段
黄铁矿	草莓状					
	细粒自形					
	粗粒自形					
闪锌矿	胶状					
	暗黑色					
	暗绿色					
	暗黄色					
方铅矿	亮黄色					
	细粒					
黄铜矿	中-粗粒					
	细粒					
方解石	粗粒					
	细粒					
白云石						
沥青						

石(白云石 II)和白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)用 100% 正磷酸法通过 GV Euro3000 EA-IsoPrime 连续流质谱系统的进行了 C、O 同位素的测定,标准物质使用 GBW04405、GBW04406 和 GBW04417,测试精度优于 $\pm 0.2\%o(2\sigma)$ 。

4 测试结果

通过对充填阶段填隙物白云石(白云石 II)的流体包裹体观察,发现其中流体包裹体主要为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$, 大于 $10 \mu\text{m}$ 者少见。流体包裹体多为椭圆、多边形、不规则状,类型单一,主要为纯液相及气液两相流体包裹体,未见纯气相包裹体,包裹体主要为无色。对于气液两相流体包裹体,充填度多大于 90%。均一温度 (T_h) 分布在 $119 \sim 191 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间(图 6),盐度 $10.9\% \sim 11.4\%$, 压强 $2 \sim 39 \text{ MPa}$ 。

在电子探针分析过程中,充填阶段填隙物白云石(白云石 II)中观察到交代残余筛状具环带结构的钡-钾长石(图 7),波谱测试结果见表 2。

通过对充填阶段填隙物白云石(白云石 II)和白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)的稀土元素测试分析(表 3),充填阶段填隙物白云石(白云石 II)与白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)有着相似的稀土元素分布模式(如图 8a),但充填阶段填隙

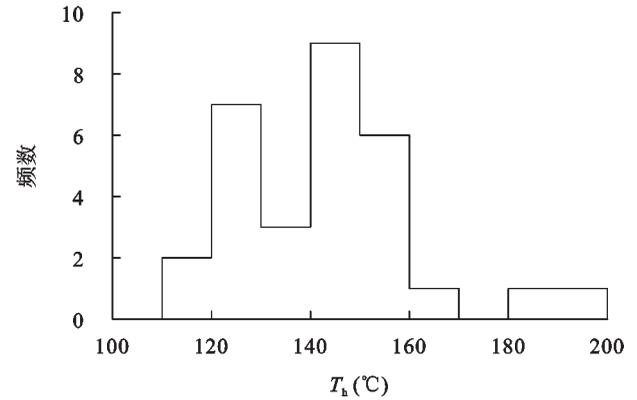


图 6 塔木铅锌矿充填阶段填隙物白云石(白云石 II)中流体包裹体均一温度 (T_h)

Fig. 6 Homogeneous temperatures (T_h) of fluid inclusions of dolomite II, Tamu lead and zinc ore deposit

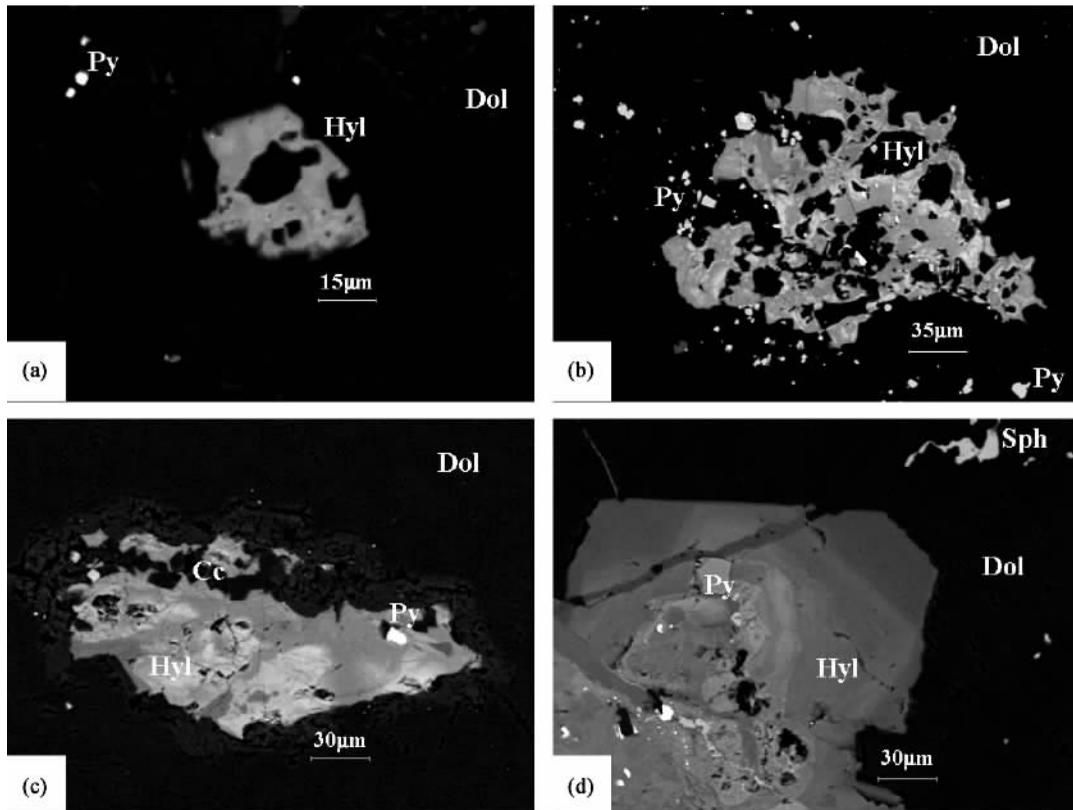


图 7 塔木铅锌矿钡-钾长石背散射电子影像

Fig. 7 The BSE image of hyalophane, Tamu lead and zinc ore deposit

(a) TM-23, 2560 中段, 矿体 I; (b) TM-31, 2560 中段, 矿体 I; (c) TM-49, 2560 中段, 矿体 I; (d) TM-49, 2560 中段, 矿体 I。Cc - 方解石; Dol - 白云石; Hyl - 钡-钾长石; Py - 黄铁矿; Sph - 闪锌矿。
(a) TM-23, 2560 level, orebody I; (b) TM-31, 2560 level, orebody I; (c) TM-49, 2560 level, orebody I; (d) TM-49, 2560 level, orebody I. Cc - calcite; Dol - dolomite; Hyl - hyalophane; Py - pyrite; Sph - sphalerite.

YANG Xiang-rong et al.: Fluid characteristic and ore genesis of Tamu deposit

表2 塔木铅锌矿钨 - 钾长石电子探针波谱分析结果 (%)

Table 2 The electron probe quantitative analysis of hyalophane, Tamu lead and zinc ore deposit (%)

样号	Na ₂ O	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	BaO	CaO	MgO	TiO ₂	FeO	Sum
TM-23	0.4	19.1	52.0	8.9	18.1	0.0	0.0	0.0	0.0	98.5
TM-31	1.3	17.9	48.5	6.4	20.9	0.0	0.0	0.0	0.0	95.0
TM-49	0.4	21.4	53.3	9.5	15.5	0.0	0.0	0.0	0.0	100.1
TM-49	0.4	22.2	49.4	7.6	20.7	0.0	0.0	0.0	0.0	100.3

表3 塔木铅锌矿矿体 I 白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩)、充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 稀土元素和微量元素组成 (μg/g)

Table 3 REE and trace elements compositions (μg/g) of dolostone I and dolomite II, Orebody I, Tamu lead and zinc ore deposit

样号	描述	La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu	δCe	δEu	Ba
TM-49D	填隙物	3.3	7.0	0.80	3.1	0.53	0.10	0.47	0.07	0.38	0.08	0.21	0.03	0.15	0.02	1.04	0.61	145
TM-49R	角砾	1.5	2.4	0.30	1.1	0.25	0.05	0.24	0.05	0.28	0.05	0.14	0.03	0.16	0.02	0.86	0.62	185
TM-37-2D	填隙物	1.6	2.2	0.29	1.2	0.26	0.10	0.27	0.05	0.24	0.06	0.15	0.02	0.11	0.01	0.78	1.15	668
TM-37-2R	角砾	1.0	1.3	0.18	0.7	0.16	0.03	0.19	0.03	0.18	0.03	0.11	0.01	0.08	0.01	0.74	0.53	752
TM-36D	填隙物	1.8	2.9	0.36	1.5	0.33	0.08	0.33	0.06	0.30	0.07	0.18	0.02	0.14	0.02	0.87	0.74	877
TM-36R	角砾	1.3	1.9	0.24	1.1	0.22	0.03	0.21	0.04	0.25	0.06	0.13	0.02	0.13	0.02	0.82	0.43	1420
TM-26D	填隙物	2.3	3.3	0.43	1.8	0.58	0.71	0.68	0.06	0.28	0.06	0.14	0.02	0.11	0.01	0.80	3.46	20900
TM-26R	角砾	1.9	3.0	0.34	1.5	0.31	0.03	0.28	0.05	0.28	0.06	0.17	0.02	0.14	0.02	0.90	0.31	1760
TM-46D	填隙物	1.9	3.5	0.45	1.9	0.40	0.09	0.40	0.07	0.41	0.10	0.27	0.04	0.23	0.02	0.91	0.69	629
TM-46R	角砾	1.5	2.4	0.31	1.2	0.26	0.06	0.25	0.05	0.29	0.06	0.19	0.02	0.17	0.02	0.85	0.72	145
TM-41D	填隙物	3.6	6.4	0.71	2.7	0.51	0.11	0.44	0.07	0.38	0.09	0.25	0.03	0.19	0.02	0.96	0.71	908
TM-41R	角砾	1.8	2.8	0.35	1.4	0.29	0.06	0.31	0.05	0.31	0.07	0.19	0.03	0.17	0.03	0.85	0.61	283
TM-34D	填隙物	4.0	9.4	1.21	4.7	0.93	0.13	0.71	0.13	0.64	0.14	0.39	0.05	0.30	0.03	1.03	0.49	634
TM-34R	角砾	1.4	2.2	0.26	1.1	0.23	0.06	0.23	0.04	0.26	0.05	0.15	0.02	0.13	0.02	0.88	0.80	867
CI		0.2	0.6	0.10	0.5	0.15	0.06	0.20	0.04	0.25	0.06	0.17	0.03	0.17	0.03	-	-	-

注: CI 球粒陨石稀土元素丰度据文献 [18] (除 La、Ce、Nd 保留小数点后 1 位外, 其他稀土元素测试值均保留小数点后 2 位, Tb 值有修订)。δCe = Ce_N / (La_N · Pr_N)^{1/2}; δEu = Eu_N / (Sm_N · Gd_N)^{1/2}。描述栏中“角砾”代表白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩, Dolostone I); “填隙物”代表充填阶段填隙物白云石 (白云石 II, Dolomite II)。

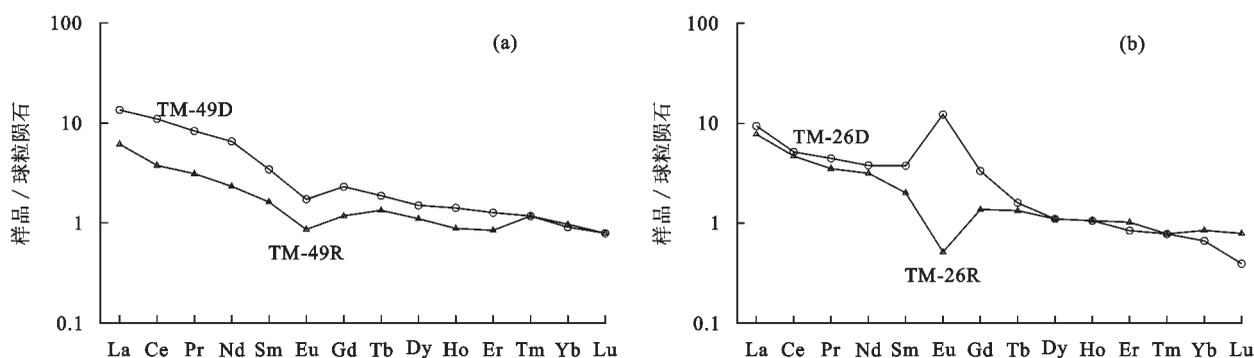


图8 塔木铅锌矿充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 和白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩) 球粒陨石标准化稀土元素分布模式

Fig. 8 The chondrite normalized REE distribution patterns of dolomite II and dolostone I, Tamu lead and zinc ore deposit

(a) TM-49, 2560 中段, 矿体 I; (b) TM-26, 2560 中段, 矿体 I。球粒陨石标准化值据 Evensen *et al.* [18]。

D - 充填阶段填隙物白云石 (白云石 II); R - 白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩)。

(a) TM-49, 2560 level, orebody I; (b) TM-26, 2560 level, orebody I. Chondritic values from Evensen *et al.* [18]

D - dolomite II; R - dolostone I.

物白云石(白云石 II) 稀土元素含量明显高于白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)。在这些测试结果中 TM-26D 样品显示出明显的 Eu 正异常(图 8b)。

对 TM-49 号样品中手工双目镜下选出的白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)、充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 和溶蚀-交代阶段暗黑色、暗绿色闪锌矿压碎浸出液进行的 Sr 同位素测试结果表明,样品白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)和充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 具有相同的 Sr 同位素组成, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 0.70995 附近。溶蚀-交代阶段闪锌矿 I(暗黑色、暗绿色)流体包裹体压碎浸出液,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 0.71011 ~ 0.71028 之间(表 4)。

本次测试的白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩) $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布范围为 +2.6‰ ~ +3.0‰(图 9), $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值分布在 +23.5‰ ~ +25.9‰ 之间(表 5)。充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 的 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值分布范围为 +1.7‰ ~ +2.4‰(图 9), $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 值在 +18.7‰ ~ +23.3‰ 之间(表 5)。白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)较充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 明显富集 ^{13}C 和 ^{18}O 。 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 的转换依据文献[19]。

由于强烈的白云岩化作用,白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)和充填阶段填隙物中的碳酸盐矿物均为白云石(图 10), 这为电子探针波谱分析结果(表 6)所证实。

5 分析讨论

根据塔木铅锌矿充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 的流体包裹体显微测温结果,充填期流体温度为 119 ~ 191 °C, 结合塔木铅锌矿闪锌矿-方铅矿-白云石矿物组合流体包裹体测温结果(130 ~ 170 °C)^[20], 充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 的形成温度与闪锌矿形成温度相接近或略低。同时本次研究观测到充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 中存在少量均一温度达到 191 °C 的流体包裹体, 暗示可能存在两种流体或充填期白云石形成具有多期脉动式充填的特点。

本次研究通过电子探针揭示出塔木铅锌矿充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 存在交代残余具有环带结构的钡-钾长石微粒, 该环带暗示其可能为钡冰长石。

表 4 TM-49 样品第 I 期白云岩化灰岩、白云石 II Sr 同位素构成

Table 4 Strontium isotope composition of dolostone I and dolomite II, TM-49, Tamu lead and zinc ore deposit

样品	描述	Sr ($\mu\text{g}/\text{g}$)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	2σ
RO-4	白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)	213.5	0.70995	0.00009
DO-4	充填阶段填隙物白云石(白云石 II)	335.9	0.70995	0.00005
DB-4	暗黑色闪锌矿压碎法浸出液	20.3	0.71011	0.00008
DB-6	暗黑色闪锌矿压碎法浸出液	24.14	0.71024	0.00002
DB-8	暗黑色闪锌矿压碎法浸出液	21.13	0.71021	0.00005
DG-4	暗绿色闪锌矿压碎法浸出液	12.13	0.71028	0.00001
DG-6	暗绿色闪锌矿压碎法浸出液	17.57	0.71023	0.00005

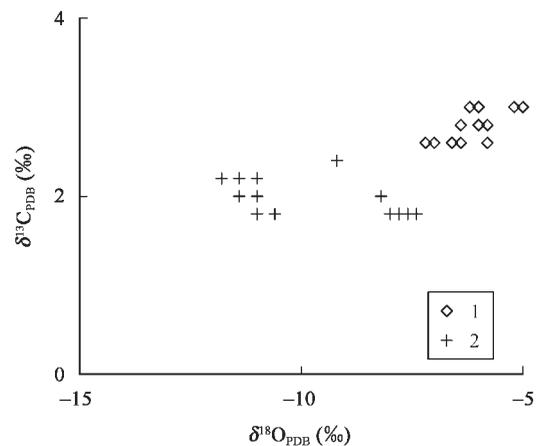


图 9 塔木铅锌矿矿体 I 白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)、充填阶段白云石(白云石 II) C、O 同位素组成

Fig. 9 Carbon and oxygen isotope compositions of dolostone I and dolomite II, Orebody I, Tamu lead and zinc ore deposit

1 - 白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩); 2 - 充填阶段填隙物白云石(白云石 II)。

1 - Dolostone I; 2 - Dolomite II.

稀土元素分析结果表明,充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 较白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)富集稀土元素,且均表现出轻稀土元素相对于重稀土元素的整体富集。由于现代海水的负 Ce_e、相对富集重稀土元素,且海水的稀土元素分布模式在显生宙并没有发生大的变化^[21], 因此就稀土元素分布模式而言,塔木铅锌矿充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 继承了白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)的特点,同时暗示钡-钾长石在稀土元素分布上对充填阶段流体的总体贡献不大。鉴于充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 富集稀土元素,且分布模式与白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)相同,因此充填阶段填隙物白云石(白云石 II) 中的

表 5 塔木铅锌矿矿体 I 白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)、充填阶段填隙物白云石(白云石 II)C、O 同位素组成
Table 5 Carbon and oxygen isotope compositions of dolostone I and dolomite II, Orebody I, Tamu lead and zinc ore deposit

样号	描述	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$	样号	描述	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}(\text{‰})$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}(\text{‰})$
TM-49-1	角砾	+2.8	-5.8	+24.9	TM-49-1	填隙物	+1.8	-7.8	+22.9
TM-49-2	角砾	+2.8	-5.9	+24.8	TM-49-2	填隙物	+1.8	-7.8	+22.9
TM-49-3	角砾	+2.8	-5.8	+24.9	TM-49-3	填隙物	+1.8	-7.8	+22.9
TM-46-1	角砾	+2.8	-6.1	+24.6	TM-46-1	填隙物	+2.4	-9.1	+21.5
TM-46-2	角砾	+2.9	-5.9	+24.8	TM-46-2	填隙物	+2.4	-9.1	+21.5
TM-46-3	角砾	+2.8	-6.1	+24.6	TM-46-3	填隙物	+2.4	-9.2	+21.4
TM-41-1	角砾	+3.0	-6.1	+24.6	TM-41-1	填隙物	+1.9	-8.2	+22.5
TM-41-2	角砾	+2.8	-6.3	+24.4	TM-41-2	填隙物	+1.9	-8.0	+22.7
TM-41-3	角砾	+2.9	-6.0	+24.7	TM-41-3	填隙物	+1.9	-7.9	+22.8
TM-37-2-1	角砾	+2.7	-5.9	+24.8	TM-37-2-1	填隙物	+2.1	-11.4	+19.2
TM-37-2-1	角砾	+2.8	-5.8	+24.9	TM-37-2-1	填隙物	+2.0	-11.3	+19.3
TM-37-2-3	角砾	+2.7	-6.1	+24.6	TM-37-2-3	填隙物	+2.2	-11.0	+19.6
TM-36-1	角砾	+2.7	-7.1	+23.6	TM-36-1	填隙物	+2.0	-11.4	+19.2
TM-36-2	角砾	+2.7	-7.2	+23.5	TM-36-2	填隙物	+2.0	-11.4	+19.2
TM-36-3	角砾	+2.6	-6.6	+24.1	TM-36-3	填隙物	+2.1	-11.8	+18.7
TM-34-1	角砾	+3.0	-5.1	+25.7	TM-34-1	填隙物	+1.8	-7.4	+23.3
TM-34-2	角砾	+3.0	-5.1	+25.7	TM-34-2	填隙物	+1.7	-7.4	+23.3
TM-34-3	角砾	+2.9	-4.9	+25.9	TM-34-3	填隙物	+1.8	-7.5	+23.2
TM-26-1	角砾	+2.6	-6.3	+24.4	TM-26-1	填隙物	+1.9	-10.5	+20.1
TM-26-2	角砾	+2.6	-5.9	+24.8	TM-26-2	填隙物	+2.0	-11.1	+19.5
TM-26-3	角砾	+2.6	-5.8	+24.9	TM-26-3	填隙物	+1.9	-11.0	+19.6

注:描述栏中“角砾”代表白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩, Dolostone I);“填隙物”代表充填阶段填隙物白云石(白云石 II, Dolomite II)。

稀土元素来自白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)的释放,或导致白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)的流体与充填阶段填隙物白云石(白云石 II)的流体有着同源的特点,其中稀土元素可能为粘土矿物微粒所吸附,并随着充填阶段填隙物白云石(白云石 II)沉淀发生富集。但是 TM-26D(充填阶段填隙物白云石,白云石 II)却出现了与其他样品明

显不同的清晰的 Eu 正异常,结合该样品微量元素测试中出现的 Ba 高含量,推测该 Eu 正异常为充填阶段填隙物白云石(白云石 II)样品中存在机械混入的钡-钾长石微粒所致。因此就稀土元素分布模式而言,流体继承了白云岩化灰岩角砾的特征,但存在其中的钡-钾长石微粒暗示成矿流体并非完全来自赋矿地层,而该钡-钾长石可能暗示成矿流体的运

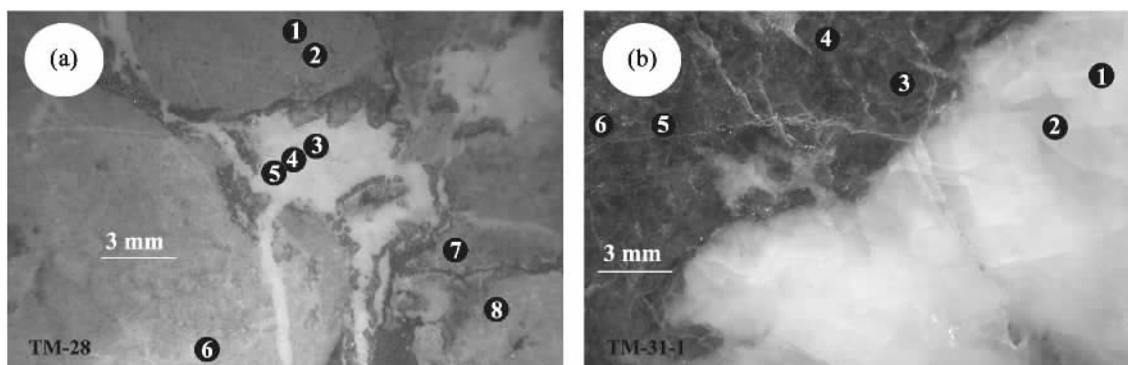


图 10 白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)和充填阶段填隙物白云石(白云石 II)电子探针波谱分析点分布图

Fig. 10 The positions of electron probe quantitative analysis of dolostone I and dolomite II

(a) TM-28, 2560 中段, 矿体 I; (b) TM-31-1, 2560 中段, 矿体 I。①~⑧为电子探针波谱分析测试点位置。

(a) TM-28, 2560 level, orebody I; (b) TM-31-1, 2560 level, orebody I. ①~⑧ positions of electronprobe quantitative analysis.

表 6 白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)和充填阶段填隙物白云石(白云石 II)电子探针测试结果(%)

Table 6 The electron probe quantitative analysis of dolostone I and dolomite II

样号	描述	点号	MgO	CaO	MnO	TFeO	SrO	Mg/Ca (摩尔比)
TM-28	角砾	1	20.9	29.8	0.1	0.4	0.0	1.0
TM-28	角砾	2	21.1	29.9	0.1	0.5	0.0	1.0
TM-28	填隙物	3	20.9	29.5	0.1	1.2	0.0	1.0
TM-28	填隙物	4	21.1	30.0	0.2	0.6	0.0	1.0
TM-28	填隙物	5	19.9	29.6	0.2	1.1	0.0	0.9
TM-28	角砾	6	20.2	29.1	0.2	2.0	0.0	1.0
TM-28	角砾	7	19.5	30.1	0.3	2.0	0.0	0.9
TM-28	角砾	8	19.0	29.9	0.3	2.7	0.1	0.9
TM-31-1	填隙物	1	20.9	30.2	0.1	0.2	0.0	1.0
TM-31-1	填隙物	2	21.5	30.2	0.1	0.1	0.0	1.0
TM-31-1	角砾	3	21.5	29.7	0.1	0.0	0.1	1.0
TM-31-1	角砾	4	21.7	30.3	0.0	0.0	0.0	1.0
TM-31-1	角砾	5	21.0	29.9	0.1	0.5	0.0	1.0
TM-31-1	角砾	6	21.5	29.6	0.1	0.5	0.0	1.0

注：“角砾”代表白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)；“填隙物”代表充填阶段填隙物白云石(白云石 II)。

移路径。

对白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)和充填阶段填隙物白云石(白云石 II)样品的 C、O 同位素测试结果表明，C、O 同位素组成表现出规律性的变化。与白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)相比，充填阶段填隙物白云石(白云石 II)清楚地显示出贫 ¹³C 和 ¹⁸O 的特征。塔木铅锌矿矿石方铅矿、闪锌矿爆裂法流体包裹体 H、O 同位素测定^[11]表明方铅矿 δD_{SMOW} 值为 -91‰，闪锌矿为 -85‰，方铅矿 δ¹⁸O_{SMOW} 值为 -9.7‰，闪锌矿为 -8.0‰，其 δ¹⁸O_{SMOW} 值低于与白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)在 25 °C 下平衡的水(-8.3‰ ~ -5.9‰)，暗示可能存在大气降水的加入。利用充填阶段填隙物白云石(白云石 II) δ¹⁸O 值、方铅矿与闪锌矿流体包裹体 δ¹⁸O 值和流体包裹体显微测温结果(119 ~ 191 °C)，通过 $10^3 \ln \frac{m_{白云石} \delta^{18}O_{SMOW,白云石} + X m_{水} \delta^{18}O_{SMOW,水,流体包裹体}}{m_{白云石} \delta^{18}O_{SMOW,白云石,填隙物} + X m_{水} \delta^{18}O_{SMOW,填隙物平衡水}}$ (公式 1~3) 对水/岩比(X)进行估算，计算显示封闭体系下充填阶段水/白云石摩尔比(X)为 0.16 ~ 0.67 (119 °C) 和 0.12 ~ 0.43 (191 °C)，开放体系下充填阶段水/白云石摩尔比为 0.13 ~ 0.37 (119 °C) 和 0.10 ~ 0.28 (191 °C)，该

水/白云石摩尔比与观察到的流体沿原生孔隙或裂隙溶蚀-交代这一现象一致。

$$m_{白云石} \delta^{18}O_{SMOW,白云石,角砾} + X m_{水} \delta^{18}O_{SMOW,水,流体包裹体} = m_{白云石} \delta^{18}O_{SMOW,白云石,填隙物} + X m_{水} \delta^{18}O_{SMOW,填隙物平衡水} \quad (1)$$

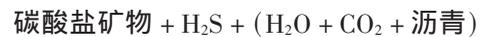
$$X_{封闭} = \frac{m_{白云石}(\delta^{18}O_{SMOW,白云石,填隙物} - \delta^{18}O_{SMOW,白云石,角砾})}{(m_{水}(\delta^{18}O_{SMOW,水,流体包裹体} - \delta^{18}O_{SMOW,填隙物平衡水}))} \quad (2)$$

$$X_{开放} = \ln(X_{封闭} + 1) \quad (3)$$

式中：X 为水-岩比；m 为单位物质氧摩尔数。

结合矿石的管/脉状特点，局部出现的固态沥青球粒，充填阶段填隙物白云石(白云石 II)较白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)贫 ¹³C 碳同位素，“方解石”流体包裹体成分分析显示气相含有 CH₄、H₂，液相未见 SO₄²⁻^[11]，充填阶段填隙物白云石(白云石 II)中流体包裹体均一温度为 119 ~ 191 °C 的特征，暗示存在热化学硫酸盐还原过程。

关于硫酸盐还原作用已有报道^[23-24]，其可以分为生物作用硫酸盐还原(Bacterial Sulfate Reduction, BSR)和热化学硫酸盐还原(Thermochemical Sulfate Reduction, TSR)作用^[9]，前人已经开展了大量的讨论^[25-29]，TSR 反应最低温度可达 140 °C^[30]，或者 120 ~ 150 °C^[31]，甚至 100 °C^[32-33]。通常该过程可以被概括为：



在反应部位，反应主要发生在气液接触带^[34]或在岩水接触面^[35]。同时塔里木盆地中部也已有相关的 TSR 过程报道^[36-38]。

值得注意的是，白云岩化灰岩角砾(第 I 期白云岩化灰岩)、充填阶段填隙物白云石(白云石 II)和溶蚀-交代阶段闪锌矿(暗黑色、暗绿色)浸出液 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 值均高于泥盆纪海水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值(0.7077 ~ 0.7095)和石炭纪海水的 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 经值(0.7076 ~ 0.7085)^[39]，暗示成矿流体淋滤了富放射成因 Sr 的地质体，这可能与在填隙物中发现溶蚀呈筛状的钡-钾长石有关。

考虑到塔木铅锌矿的邻区达木斯乡和什拉甫剖面下石炭统见有 4 个沥青显示点和 24 个荧光显示点这一现象^[16]，及麦盖提斜坡曲 1 井、麦 3 井产油层为石炭系，且通过 V/Ni 判别其为海相，原油 δ¹³C 介于 -34‰ ~ -31‰ 之间^[16]，因此塔木铅锌矿成矿流体可能为至少两种流体混合的结果。其一为可能与大气降水有关的贫 ¹⁸O 流体溶解了膏岩层并与富烃流体发生热化学硫酸盐还原作用形成最初的 HS⁻以及溶蚀空隙，另一种流体以氯的络合物、硫酸盐或

硫代硫酸盐方式携带了下伏地质体中的 Pb、Zn 等成矿物质并裹挟了微粒矿物如钡 - 钾长石等沿断层上涌进入破碎带, 与含烃流体相遇发生热化学硫酸盐还原反应, 导致围岩中的热化学硫酸盐还原平衡状态被打破, 所产生的 HS^- 与 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 结合形成闪锌矿、方铅矿, 并导致围岩进一步溶蚀, 从而形成管/脉。

最终溶蚀产生的大量空洞为充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 充填, 这时充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 受相对贫 ^{18}O 流体和含矿围岩 ^{18}O 的综合作用, 形成了相对于白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩) 贫 ^{18}O 的 O 同位素特点, 同时受石炭系烃源和含矿围岩碳酸盐矿物的综合作用产生了相对于白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩) 贫 ^{13}C 的 C 同位素特点, 这一现象为流体包裹体中 CH_4 、 C_2H_6 、 H_2S 气相成分所证实^[1]。同时在作为 C、O、Sr 库的碳酸盐岩这一巨大的缓冲体系作用下, 充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 较白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩) C、O 同位素呈现小幅的变化及 Sr 同位素几乎没有发生明显改变的现象, 但也可能该碳酸盐库 Sr 同位素组成与流体通过的下伏地质体 Sr 同位素差异很小。

6 结 论

(1) 塔木铅锌矿为后生矿床, 成矿期可划分为溶蚀 - 交代阶段和充填阶段, 溶蚀 - 交代阶段是主成矿阶段。

(2) 成矿为不同性质流体混合作用的结果。其一为可能与大气降水有关的贫 ^{18}O 流体溶解膏岩层并与富烃流体发生热化学硫酸盐还原作用形成最初的 HS^- 以及溶蚀孔隙, 另一种流体以氯的络合物、硫酸盐或硫代硫酸盐方式携带了 Pb、Zn 等成矿物质及微粒矿物如钡 - 钾长石等沿断层上涌进入破碎带, 与含烃流体相遇发生热化学硫酸盐还原反应, 导致围岩中的热化学硫酸盐还原平衡状态被打破, 产生的 HS^- 与 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 结合形成闪锌矿、方铅矿, 并导致围岩进一步溶蚀, 从而形成管/脉。

(3) 充填阶段填隙物中出现的钡 - 钾长石和白云岩化灰岩角砾 (第 I 期白云岩化灰岩)、充填阶段填隙物白云石 (白云石 II) 和溶蚀 - 交代阶段闪锌矿 (暗黑色、暗绿色) 浸出液的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值暗示成矿流体可能淋滤了下伏地质体。

(4) 成矿作用晚期, 溶蚀释放的大量 Ca^{2+} 、 Mg^{2+}

过饱和, 产生充填期填隙物白云石 (白云石 II), 残余成矿元素形成结晶较粗大的矿石矿物 (如充填阶段闪锌矿 III), 也可见脉动式流体导致再次沿管道发生溶蚀 - 交代甚至是充填。

中国科学院地球化学研究所安宁先生指导并帮助完成了稳定同位素测试; 胡静、黄艳女士指导并帮助完成了稀土元素及微量元素测试; 郑文勤工程师、刘世荣副研究员、周国富研究员为本次研究提供了电子探针指导; 李晓彪博士、周家喜博士为本次研究提供了岩矿光薄片鉴定便利, 耿跃成工程师为本次研究磨制了大量的光薄片; 特别是匿名审稿人为本文提出了宝贵的修改建议, 使本文得以完善, 在此一并表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] 王书来, 汪东波, 祝新友, 王京彬, 彭省临. 新疆塔木 - 卡兰古铅锌矿床成矿流体地球化学特征[J]. 地质地球化学, 2002, 30(4): 34 - 39.
Wang Shu-lai, Wang Dong-bo, Zhu Xin-you, Wang Jing-bin, Peng Sheng-lin. Ore-fluid geochemistry of Tamu-Kala Pb-Zn deposit in Xinjiang [J]. Geology-Geochemistry, 2002, 30(4): 34 - 39 (in Chinese with English abstract).
- [2] 印建平, 田培仁, 戚学祥, 陈克强. 西昆仑塔木 - 卡兰古铅锌铜矿带含矿岩系的地质地球化学特征[J]. 现代地质, 2003, 17(2): 143 - 150.
Yin Jian-ping, Tian Pei-ren, Qi Xue-xiang, Chen Ke-qiang. Characteristics of geology and geochemistry of ore-bearing formation in Tamu-Kalangu lead-zinc-copper ore belts in western Kunlun Mountain [J]. Geoscience, 2003, 17(2): 143 - 150 (in Chinese with English abstract).
- [3] 匡文龙, 高珍权, 印建平, 朱自强, 刘石华. 西昆仑地区塔木 MVT 型铅锌矿床成矿作用和成矿物质来源探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2002, 21(4): 253 - 257.
Kuang Wen-long, Gao Zhen-quan, Yin Jian-ping, Zhu Zi-qiang, Liu Shi-hua. Study on metallogenetic process of Tamu MVT type lead-zinc ore deposit and the source of metallogenetic material in west of Kunlun [J]. Bull Mineral Petrol Geochem, 2002, 21(4): 253 - 257 (in Chinese with English abstract).
- [4] 祝新友, 汪东波, 王书来. 新疆阿克陶县塔木 - 卡兰古铅锌矿带矿床地质和硫同位素特征[J]. 矿床地质, 1998, 17(3): 204 - 214.
Zhu Xin-you, Wang Dong-bo, Wang Shu-lai. Geology and sulfur isotope geochemistry of the Tamu-Kalangu lead-zinc deposits, Akto county, Xinjiang [J]. Mineral Deposit, 1998, 17(3): 204 - 214 (in Chinese with English abstract).
- [5] 董永观, 郭坤一, 廖圣兵, 肖惠良, 王涛. 新疆西昆仑科库西里克铅锌矿床地质及元素地球化学特征[J]. 地质学报, 2006, 80(11): 1730 - 1738.
Dong Yong-guan, Guo Kun-yi, Liao Sheng-bing, Xiao Hui-liang,

- Wang Tao. Geological and geochemical characteristics of the Kekuxilik lead-zinc ore deposit, west Kunlun, Xinjiang [J]. Acta Geol Sinica, 2006, 80(11): 1730–1738 (in Chinese with English abstract).
- [6] 印建平, 王旭东, 李明, 周志坚. 西昆仑卡拉塔什矿区含铜砂页岩中发现钴矿[J]. 地质通报, 2003, 22(9): 736–740.
Yin Jian-ping, Wang Xu-dong, Li Ming, Zhou Zhi-jian. A cobalt deposit discovered in copper-bearing sandstone-shale in the Karatax ore district, Western Kunlun Mountains [J]. Geol Bull China, 2003, 22(9): 736–740 (in Chinese with English abstract).
- [7] Brown J S. Mississippi Valley type lead-zinc ores: A review and sequel to the “Behre symposium” [J]. Mineral Deposita, 1970, 5(2): 103–119.
- [8] Kesler S E, Martini A M, Appold M S, Walter L M, Huston T J, Furman F C. Na-Cl-Br systematics of fluid inclusions from Mississippi Valley-type deposits, Appalachian Basin: Constraints on solute origin and migration paths [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1996, 60(2): 225–233.
- [9] Krouse H R, Viau C A, Eliuk L S, Ueda A, Halas S. Chemical and isotopic evidence of thermochemical sulphate reduction by light hydrocarbon gases in deep carbonate reservoirs [J]. Nature, 1988, 333(6172): 415–419.
- [10] Christensen J N, Halliday A N, Vearncombe J R, Kesler S E. Testing models of large-scale crustal fluid flow using direct dating of sulfides: Rb-Sr evidence for early dewatering and formation of Mississippi Valley-type deposits, Canning Basin, Australia [J]. Econ Geol, 1995, 90(4): 877–884.
- [11] Heijnen W, Muchez P, Banks D A, Schneider J, Kucha H, Keppens E. Carbonate-hosted Zn-Pb deposits in Upper Silesia, Poland: Origin and evolution of mineralizing fluids and constraints on genetic models [J]. Econ Geol, 2003, 98(5): 911–932.
- [12] Appold M S, Garven G. The hydrology of ore formation in the Southeast Missouri District: Numerical models of topography-driven fluid flow during the Ouachita Orogeny [J]. Econ Geol, 1999, 94(6): 913–935.
- [13] Kamona A F, Friedrich G H. Geology, mineralogy and stable isotope geochemistry of the Kabwe carbonate-hosted Pb-Zn deposit, central Zambia [J]. Ore Geol Rev, 2007, 30(3/4): 217–243.
- [14] Spangenberg J, Fontboté L, Sharp Z D, Hunziker J C. Carbon and oxygen isotope study of hydrothermal carbonates in the zinc-lead deposits of the San Vicente District, central Peru: A quantitative modeling on mixing processes and CO₂ degassing [J]. Chem Geol, 1996, 133(1–4): 289–315.
- [15] 蔡土赐. 新疆维吾尔自治区岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1999: 1–430.
Cai Tu-ci. Petrologic Strata of Xinjiang Uygur Autonomous Region [M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1999: 1–430 (in Chinese).
- [16] 董大忠, 肖安成. 塔里木盆地西南坳陷石油地质特征及油气资源[M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 1–206.
Dong Da-zhong, Xiao An-cheng. The Petroleum Geology Characteristics and Gas Resources of Southwest Depression, Tarim Basin [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1998: 1–206 (in Chinese).
- [17] 李博泉, 王京彬. 中国新疆铅锌矿床[M]. 北京: 地质出版社, 2006: 1–141.
Li Bo-quan, Wang Jing-bin. Lead-Zinc Deposits in Xinjiang, China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2006: 1–141 (in Chinese with English abstract).
- [18] Evensen N M, Hamilton P J, O’Nions R K. Rare-earth abundances in chondritic meteorites [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1978, 42(8): 1199–1212.
- [19] Coplen T B, Kendall C, Hopple J. Comparison of stable isotope reference samples [J]. Nature, 1983, 302(5905): 236–238.
- [20] 王书来, 汪东波, 祝新友. 塔里木西南缘 MVT 型铅锌矿床流体包裹体研究[J]. 矿产与地质, 2001, 15(4): 238–242.
Wang Shu-lai, Wang Dong-bo, Zhu Xin-you. The fluid inclusion in MVT lead-zinc deposit in southwest margin of Tarim [J]. Mineral Resour Geol, 2001, 15(4): 238–242 (in Chinese with English abstract).
- [21] Shields G A, Webb G E. Has the REE composition of seawater changed over geological time? [J]. Chem Geol, 2004, 204(1/2): 103–107.
- [22] Zheng Yong-Fei. Oxygen isotope fractionation in carbonate and sulfate minerals [J]. Geochem J, 1999, 33(2): 109–126.
- [23] Thode H G, Wanless R K, Wallouch R. The origin of native sulphur deposits from isotope fractionation studies [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1953, 5(6): 286–298.
- [24] Feely H W, Kulp J L. Origin of Gulf Coast salt-dome sulphur deposits [J]. AAPG Bull, 1957, 41(8): 1802–1853.
- [25] Kiyosu Y, Krouse H R. The role of organic acid in the abiogenic reduction of sulfate and the sulfur isotope effect [J]. Geochem J, 1990, 24(1): 21–27.
- [26] Carroll J J. A comment on “The prediction of methane solubility in natural waters to high ionic strength from 0 to 250°C and from 0 to 1600 bar” by Z. Duan, N. Möller, J. Greenberg, and J. H. Weare [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1992, 56(12): 4301–4302.
- [27] Duan Zhenhao, Möller N, Greenberg J, Weare J H. The prediction of methane solubility in natural waters to high ionic strength from 0 to 250°C and from 0 to 1600 bar [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1992, 56(4): 1451–1460.
- [28] Duan Z, Weare J H. Reply to comment by J. J. Carroll on “The prediction of methane solubility in natural waters to high ionic strength from 0 to 250°C and from 0 to 1600 bar” [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1992, 56(12): 4303.
- [29] Kiyosu Y, Krouse H R. Thermochemical reduction and sulfur isotopic behavior of sulfate by acetic acid in the presence of native sulfur [J]. Geochem J, 1993, 27(1): 49–57.
- [30] Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. Gas scouring by thermochemical sulfate reduction at 140°C [J]. AAPG Bull, 1995, 79(6): 854–863.
- [31] Rye D M, Williams N. Studies of the base metal sulfide deposits at McArthur River, Northern Territory, Australia: III, The stable isotope geochemistry of the H. Y. C., Ridge, and Cooley deposits

- [J]. *Econ Geol*, 1981, 76(1): 1 – 26.
- [32] Macqueen R W, Powell T G. Organic geochemistry of the Pine Point lead-zinc ore field and region, Northwest Territories, Canada [J]. *Econ Geol*, 1983, 78(1): 1 – 25.
- [33] Sassen R. Geochemical and carbon isotopic studies of crude oil destruction, bitumen precipitation, and sulfate reduction in the deep Smackover Formation [J]. *Org Geochem*, 1988, 12(4): 351 – 361.
- [34] Machel H G. Comment on “The effects of thermochemical sulfate reduction upon formation water salinity and oxygen isotopes in carbonate gas reservoirs” [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62(2): 337 – 341.
- [35] Worden R H, Smalley P C, Oxtoby N H. Reply to the comment by H. G. Machel on “The effects of thermochemical sulfate reduction upon formation water salinity and oxygen isotopes in carbonate gas reservoirs” [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1998, 62(2): 343 – 346.
- [36] Cai Chunfang, Xie Zengye, Worden R H, Hu Guoyi, Wang Lansheng, He Hong. Methane-dominated thermochemical sulphate reduction in the Triassic Feixianguan Formation east Sichuan Basin, China: Towards prediction of fatal H₂S concentrations [J]. *Mar Petrol Geol*, 2004, 21(10): 1265 – 1279.
- [37] Cai Chunfang, Worden R H, Bottrell S H, Wang Lansheng, Yang Chanchun. Thermochemical sulphate reduction and the generation of hydrogen sulphide and thiols (mercaptans) in Triassic carbonate reservoirs from the Sichuan Basin, China [J]. *Chem Geol*, 2003, 202(1/2): 39 – 57.
- [38] Cai Chunfang, Hu Wangshui, Worden R H. Thermochemical sulphate reduction in Cambro-Ordovician carbonates in central Tarim [J]. *Mar Petrol Geol*, 2001, 18(6): 729 – 741.
- [39] Veizer J, Ala D, Azmy K, Bruckschen P, Buhl D, Bruhn F, Carden G A F, Diener A, Ebner S, Godderis Y, Jasper T, Korte C, Pawellek F, Podlaha O G, Strauss H. ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr, δ^{13} C and δ^{18} O evolution of Phanerozoic seawater [J]. *Chem Geol*, 1999, 161(1 – 3): 59 – 88.