

引用格式:李迎瑞,马奔奔,陆永潮,等. 2026. 塔西南地区石炭系碳酸盐岩储层热液流体识别及储层改造意义[J]. 沉积学报, 44(2):614-630.

LI YingRui, MA BenBen, LU YongChao, et al. 2026. Hydrothermal Fluid Identification in Carboniferous Carbonate in the Southwestern Tarim Basin and Its Significance for Reservoir Alteration[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(2): 614-630.

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.067

CSTR: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.067

# 塔西南地区石炭系碳酸盐岩储层热液流体识别及储层改造意义

李迎瑞<sup>1,2</sup>, 马奔奔<sup>1,2</sup>, 陆永潮<sup>1,2</sup>, 杨瑞彬<sup>1,2</sup>, 耿锋<sup>3</sup>, 沙旭光<sup>3</sup>

1. 中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室, 武汉 430074

2. 中国地质大学(武汉)资源学院, 武汉 430074

3. 中国石油化工集团有限公司西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011

**摘要** 【目的】深层碳酸盐岩储层具有巨大油气勘探潜力,但其成岩作用复杂,储层非均质性较强且多受后期流体活动改造,导致优质储层识别与表征难度大。本文旨在明确热液流体活动的发育特征及其对碳酸盐岩储层的影响机制。【方法】以塔里木盆地西南地区上古生界石炭系为研究对象,通过岩心观察、铸体薄片、扫描电镜、稳定同位素及稀土元素等分析资料,查明研究区石炭系碳酸盐岩储层热液流体的识别标志,建立热液流体对碳酸盐岩储层的改造模式。【结果】热液流体活动的识别标志,包括典型热液矿物、碳酸盐岩具有锶同位素异常高值、氧同位素异常低值、轻重稀土元素配分不明显以及铕(Eu)正异常等。【结论】热液流体对碳酸盐岩储层改造具有两面性,建设性作用以热液溶蚀作用为主,改善孔隙结构与储层物性,测井响应呈高声波时差、中子孔隙度和低自然伽马、电阻率值的特点,主要分布在靠近深层断裂邻近热源区域,溶蚀孔缝大面积连片发育且大多未被充填;破坏性作用以热液充填作用为主,破坏孔隙结构、降低储层物性,测井响应呈高电阻率值和低声波时差、中子孔隙度及自然伽马的特点,主要分布在深层断裂远端远离热源区域,溶蚀孔缝多孤立发育且被大量充填。

**关键词** 热液流体;碳酸盐岩;储层改造;石炭系;塔西南地区

**第一作者** 李迎瑞,男,1999年出生,硕士研究生,储层地质学,E-mail: lyr7536@163.com

**通信作者** 马奔奔,男,教授,流体-岩石反应机理与深层-超深层储层预测,E-mail: mabenben@cug.edu.cn

中图分类号:P618.13 文献标志码:A 文章编号:1000-0550(2026)02-0614-17

## 0 引言

深层海相碳酸盐岩已成为全球各大含油气盆地的重要勘探靶区,盆地内深部热液流体活动对成岩过程和储层改造模式引发广泛关注(何治亮等,2017;马永生等,2020)。热液流体作为水-岩相互作用的载体,其自身往往富含 $H_2S$ 、 $CO_2$ 和 $SO_2$ 等化学活动性强的物质并释放出大量热能,进而引起复杂的流体-岩石作用过程,对碳酸盐岩储层改造具有多重作用:一方面,热液溶蚀作用可以产生大量次生孔隙,对改善储层段物性起关键性作用(王清斌等,2019);另一方面,热液流体在孔缝内沉淀一系列热液矿物,堵塞原有储集空间,降低储层物性(梁杰等,

2015)。前人基于 $CO_2$ - $H_2O$ - $CaCO_3$ - $NaCl$ 的热力学平衡模型计算认为,随着温度和压力降低,热液流体对碳酸盐岩的溶蚀强度具有先增加后减小的特征,而且呈现深部溶蚀、浅部充填的规律(胡明毅等,2009;朱东亚等,2012)。因此,正确认识盆地内热液流体对储层的改造作用是碳酸盐岩储层评价与预测的关键。

塔里木盆地曾在震旦纪-寒武纪、奥陶纪、二叠纪和白垩纪发生4期重要地质热事件(Lan *et al.*, 2023),深入探究盆地内碳酸盐岩深埋藏环境、流体成岩过程和热液作用尤为必要。研究表明,碳酸盐岩在中-深埋藏阶段所发生的溶蚀作用主要与热液流体的运移及有机酸的注入有关(Cai *et al.*, 2001; Li

收稿日期:2024-04-09;修回日期:2024-05-12;录用日期:2024-07-12;网络出版日期:2024-07-12

基金项目:湖北省自然科学基金项目(2022CFB031);中国石化西北油田分公司协作项目(34400008-22-ZC0607-0046)

*et al.*, 2010; Jiu *et al.*, 2020), 断裂与不整合为深部热液流体活动提供上升通道, 火山活动及深部大断裂的发育状况控制热液流体的空间展布(何治亮等, 2010)。热液流体具有化学活动性较强的物质和较高的热能, 在运移过程中往往溶蚀围岩, 生成特殊矿物。前人研究认为, 萤石、重晶石、地开石和鞍状白云石等典型热液成因矿物在成岩过程中能够记录热液流体的运移过程(朱东亚等, 2013; Ma *et al.*, 2021), 可作为判别热液流体活动的标志性证据。热液流体沿深部断裂活动过程中, 能够将特殊化学元素带入并与围岩发生化学反应引起某些化学元素异常, 出现明显的轻稀土元素(LREE)富集、重稀土元素(HREE)亏损及铕(Eu)正异常等现象(朱东亚等, 2009)。Al-Aasm(2003)通过对热液改造后的白云岩研究发现, 高温热液流体会导致氧同位素( $\delta^{18}\text{O}$ )负偏、锶同位素( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )升高。

目前针对塔里木盆地深层碳酸盐岩储层热液流体活动的研究多集中于塔北、塔中地区, 该地区热液流体多源于火山作用, 自地幔沿断裂、裂缝和不整合面等进入地层, 对碳酸盐岩储层进行溶蚀改造, 沿热液通道两侧形成一定范围的溶蚀改造区, 成为油气聚集新场所(丁茜等, 2019)。塔西南地区勘探程度低、钻井资料少, 受热液性质及矿物成分的影响, 热液流体识别标志以及热液溶蚀—充填机制尚不明确, 从而导致热液流体对碳酸盐岩储层改造机理与优质储层分布规律认识不清。本文旨在系统开展塔西南地区石炭系碳酸盐岩储层的野外露头、薄片观察与矿物地球化学综合研究, 总结热液流体成岩矿物学与地球化学的识别标志, 探讨热液流体对碳酸盐岩储层的改造作用, 明确热液流体对储层的测井响应, 为塔西南地区深层碳酸盐岩储层预测和油气勘探提供依据。

## 1 区域地质背景

塔里木盆地位于中国西北地区新疆维吾尔自治区境内, 盆地面积约为 $56\times 10^4\text{ km}^2$ , 盆地被天山山脉、西昆仑山脉及阿尔金山脉等环绕, 是我国最大的内陆多旋回复合叠加含油气盆地。盆地经过多次沉降、隆升, 地势呈现明显的“西高东低”特征, 以“四隆六拗”的构造格局将盆地划分出10个一级构造单元(图1a): 塔北隆起、塔中隆起、东南隆起、巴楚隆起、库车拗陷、满加尔拗陷、阿瓦提拗陷、东南拗陷、塘古拗陷

及西南拗陷(Jiu *et al.*, 2022; 王丹, 2024)。位于盆地西南部的塔西南地区主要由巴楚隆起、麦盖提斜坡、喀什凹陷、叶城凹陷、和田凹陷、昆仑山前冲断带及塘古拗陷西缘等构造单元组成, 区域内构造断裂带较为发育, 大致呈北西向和北东向(图1b), 北西向断裂自西向东呈弧形大致平行于昆仑山前冲断带的走向展布; 北东向断裂以走滑断裂为主, 将北西向断裂错断, 控制区域内次级小构造发育(廖晓, 2018)。

研究区自寒武系以来主要经历了由拗陷到隆起和稳定斜坡到活动前缘隆起等构造演化阶段, 目的层段石炭系在晚泥盆—中二叠世伸展期主要沉积浅海台地相碳酸盐岩, 沉积厚度总体上呈现东薄西厚趋势, 喀什凹陷厚度达最大约1 800 m(张蔚, 2020)。研究区目的层自下而上依次发育巴楚组( $C_1b$ )、卡拉沙依组( $C_1k$ )和小海子组( $C_{1x}$ )(图1c), 巴楚组下部为泥质灰岩夹灰色生屑灰岩, 上部以灰黑色白云岩、灰岩夹膏盐岩为主; 卡拉沙依组以碎屑岩沉积为主, 岩性以棕色、褐色及灰色粉砂质泥岩夹砂岩为主, 顶部含灰岩段上覆小海子组灰岩; 小海子组是一套以灰岩为主的地层, 受古地形影响该组台地边缘高能相带分布较广, 颗粒灰岩厚度大范围广(Ma *et al.*, 2019)。

## 2 样品与方法

本次研究实验分析样品均来自塔西南地区石炭系钻井岩心及典型碳酸盐岩野外露头剖面取样(重点井位及野外露头信手剖面见图1b和图1d), 岩石矿物学与地球化学分析测试在中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室开展。

在石炭系各层位采集了90个钻孔岩心样品, 用蓝色环氧树脂浸渍280个标准抛光薄片, 并用铁氰化钾与茜素红-S混合染色, 通过400点计数, 对薄片进行检查, 以初步确定骨架成分、成岩矿物和孔隙度。碳氧同位素测试依据和方式为DZ/T 0184.17—1997《碳酸盐矿物或岩石中碳、氧同位素组成的磷酸法》, 使用方解石或白云石粉末与磷酸在室温条件下充分反应, 通过Finnigan MAT-253型同位素比值质谱仪将所释放出的 $\text{CO}_2$ 进行测试获得同位素比值结果, 所得出的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值采取VPDB标准表示, 测试精度低于0.2‰; 锶同位素测试方式和依据为GB/T 17672—1999《岩石中铅锶钨同位素测定方法》, 测试环境相对湿度为20%, 温度为20℃, 使用方解石或白云石粉末溶解于盐酸溶液, 在100℃~110℃条件下充分反

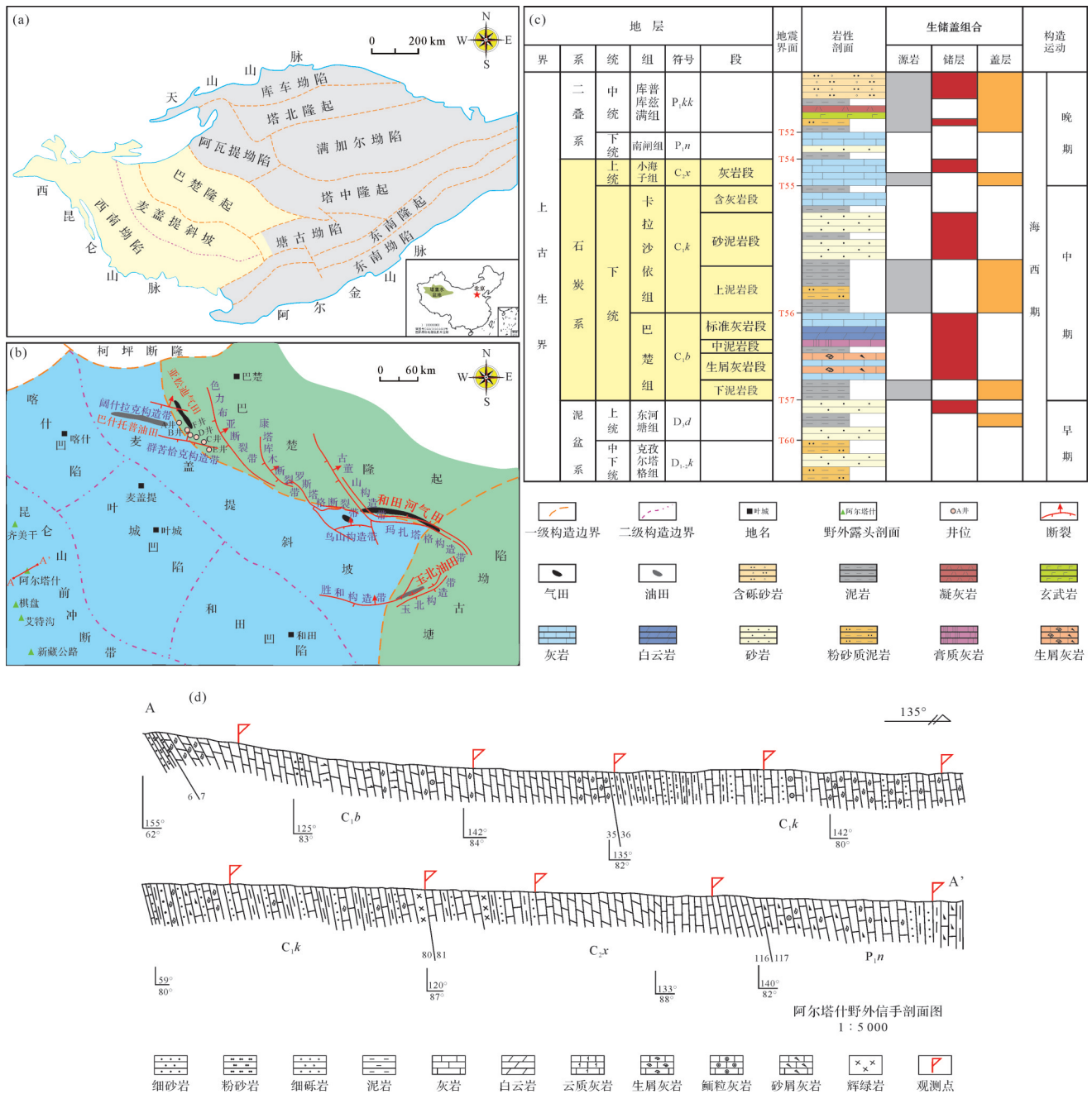


图1 塔里木盆地西南部区域构造简图

(a)塔里木盆地构造单元划分(据Jiu et al., 2022修改);(b)塔西南地区构造单元划分;(c)塔西南地区地层柱状图(据Ma et al., 2019修改);(d)阿尔塔什野外信手剖面(据韩睿,2022修改)

Fig.1 Structural sketch map of the southwestern Tarim Basin

应,采用AG 50WX12型离子交换树脂层析柱处理提取铈,最后使用ISOPROBE-T热电离质谱仪分析测试得出<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr比值,分析精度优于0.001‰;稀土元素测试方式和依据为DZ/T 0223—2001《电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)方法通则》,测试环境相对湿度为30%,温度为20℃,采用Finnigan MAT-HR-ICP-MS(Element I)型仪器测定,采用最新球粒陨石稀土元

素含量对稀土元素数据进行标准化处理(李义曼等,2022)。

### 3 热液流体活动识别

#### 3.1 岩石学特征

受热液流体作用后的碳酸盐岩会呈现一系列岩

相学及地球化学等方面的特征。目前多数学者认为盆地内热液流体活动多与二叠纪强烈的火山作用相关(金之均等,2006),研究区部分井石炭系巴楚组钻遇玄武岩,玄武岩多具间隐结构,其中新鲜柱状斜长石的含量较高,部分斜长石遭受后期风化具有黏土化现象(图2a),表明区域内曾发生火山活动带来高温岩浆,进而侵入上部地层引发强烈水-岩相互作用(Lu *et al.*,2023)。目的层系普遍以颗粒灰岩、泥-粉晶白云岩及过渡性碳酸盐岩为主,颗粒灰岩泥晶化强烈,部分颗粒内部发生新生变形,见少量粒内溶孔,孔隙相对孤立,连通性差(图2b,c)。白云岩白云石晶形较小,自形程度普遍较差,多呈半自形-他形,表面较脏,部分粉晶白云岩中可见雾心亮边结构,且泥质含量较高(图2d),晶间溶孔发育,呈不规则形状,溶孔发育处的白云石晶体自形程度较高,多数溶孔未充填或被方解石和泥质半充填,面孔率较高(图2e,f,h)。过渡性碳酸盐岩主要为灰质云岩及云质灰岩,矿物组成较复杂,其残余粒屑的粒间胶结物和生屑等均存在热液溶蚀作用,孔隙十分发育,具

有大量粒间孔、晶间孔及沿缝合线不规则扩容裂缝充填方解石(图2g,i)。

### 3.2 典型矿物学标志

#### 3.2.1 萤石

萤石作为一种低温热液矿物,是富含F的流体与碳酸盐岩中Ca<sup>2+</sup>相互反应的产物,碳酸盐岩中萤石的沉淀一般与热液活动有关,在研究区A井和D井均发现萤石矿物,粒径多大于2 mm,阴极发光下萤石颗粒发蓝色光(图3a~c)。

#### 3.2.2 重晶石

重晶石(BaSO<sub>4</sub>)产于低温热液矿脉中,在碳酸盐岩中多呈结核状出现,研究区A井扫描电镜照片中发现结核状矿物,通过能谱分析发现Ba含量异常高,确定为重晶石(图3d,e)。通常热液成因Ba的富集多与岩浆喷发有关,热液对玄武岩(尤其是玄武岩中的长石)以及深层沉积物进行淋滤(Ogawa *et al.*,2005;Hein *et al.*,2007;周锡强等,2016),从而导致Ba富集,在海相碳酸盐岩中形成热液成因重晶石。

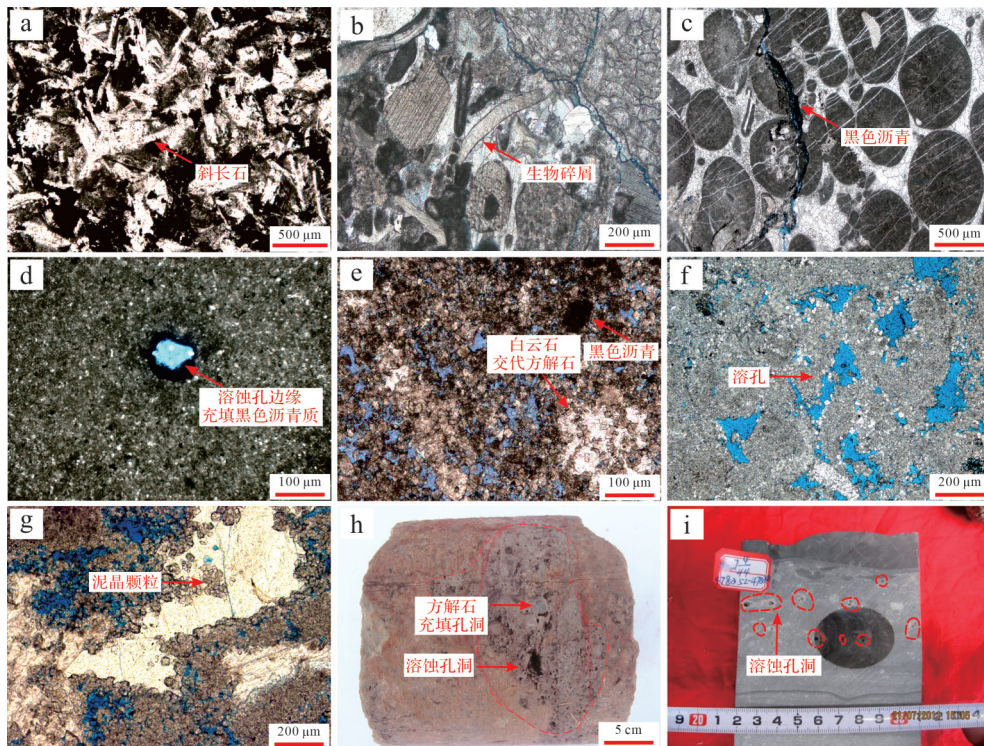


图2 塔西南地区石炭系碳酸盐岩储层岩石学特征

(a)A井,4 768.03 m,巴楚组,玄武岩,间隐结构,岩石无空隙;(b)阿尔塔什剖面,第8小层,巴楚组,亮晶生屑灰岩,生屑以有孔虫为主,微裂缝发育;(c)阿尔塔什剖面,第52小层,卡拉沙依组,亮晶颗粒灰岩,见微裂缝内充填黑色沥青质,若干条溶蚀缝发育;(d)C井,4 901.80 m,巴楚组,泥晶云岩,方解石含量较高,溶蚀孔发育,边缘见黑色沥青质;(e)A井,4 761.13 m,巴楚组,粉晶云岩,后期白云石交代方解石,多条缝合线内充填黑褐色沥青质,溶孔发育;(f)D井,4 508.62 m,小海子组,粉-泥晶云岩,颗粒间充填粉晶白云岩,粒间溶孔、粒内溶孔发育;(g)B井,4 306.60 m,小海子组,泥晶颗粒灰质云岩,颗粒多呈椭圆形,粒间溶孔发育;(h)D井,小海子组,4 506.21 m,黄灰色鲕粒云岩,溶蚀孔洞发育,部分充填方解石;(i)A井,小海子组,4 782.52 m,灰色含灰质云岩,溶蚀孔洞较发育

Fig.2 Petrological characteristics of Carboniferous carbonate reservoir in the southwestern Tarim Basin

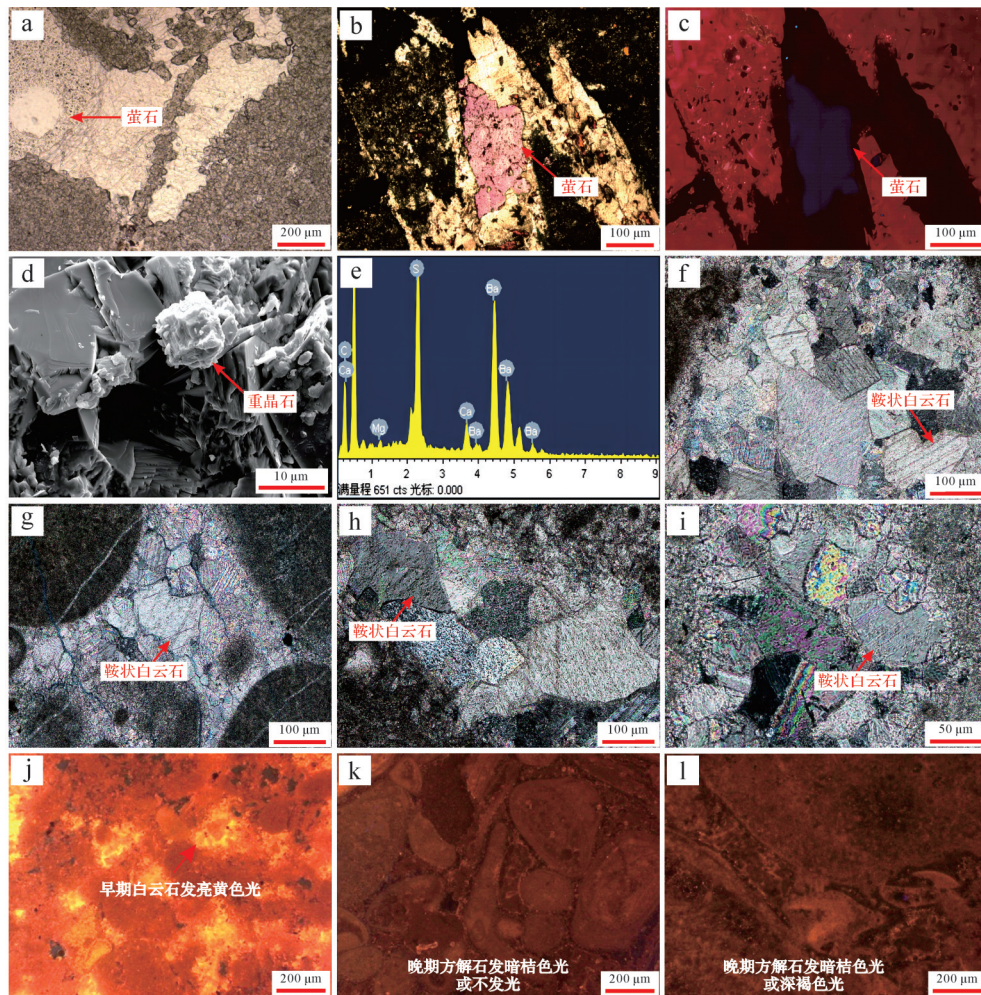


图3 研究区热液流体活动岩矿学证据

(a)D井,4 505.81 m,小海子组,颗粒云岩,云质含量较高,萤石交代云质;(b)A井,4 562.45 m,巴楚组,泥晶云岩,萤石交代硬石膏;(c)A井,4 562.45 m,巴楚组,照片b阴极发光,蓝色为萤石;(d)A井,4 762.45 m,巴楚组,灰质云岩,扫描电镜下重晶石;(e)A井,4 762.45 m,巴楚组,照片d重晶石能谱图;(f)阿尔塔什剖面,第31小层,巴楚组,亮晶颗粒灰岩,鞍状白云石;(g)阿尔塔什剖面,第52小层,卡拉沙依组,亮晶颗粒灰岩,鞍状白云石;(h)阿尔塔什剖面,第66小层,卡拉沙依组,泥晶灰岩,鞍状白云石;(i)阿尔塔什剖面,第82小层,小海子组,亮晶颗粒灰岩,鞍状白云石;(j)C井,4 443.16 m,小海子组,亮晶砂屑灰岩,早期白云石发亮黄色光;(k)C井,4 445.53 m,小海子组,生屑灰岩,晚期方解石发暗橘黄色或不发光;(l)C井,4 896.38 m,巴楚组,生屑灰岩,晚期方解石发暗橘黄色或深褐色光

Fig.3 Petrological and mineralogical evidence of hydrothermal fluid activity in the study area

### 3.2.3 鞍状白云石

鞍状白云石是最为典型的热液成因标志性矿物,通常在成岩温度与原岩温度相差  $20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  时高温瞬变而产生。单偏光下晶面呈不规则弯曲、正交偏光下呈波状消光是热液成因鞍状白云石的典型特征(Davies and Smith, 2006)。研究区内鞍状白云石呈楔状发育或在颗粒边缘充填生长,与早期中一粗晶白云石晶体呈镶嵌接触(图3f-i)。

## 3.3 地球化学记录

### 3.3.1 锶同位素( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ )特征

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  不会发生分馏作用,因此海相碳酸盐岩的地层年代、物质来源及流体性质等可利用锶同位

素反演推算。研究发现研究区内多数碳酸盐岩矿物锶同位素显著高于同时期古海水锶同位素值(McArthur *et al.*, 2001),且均高于海相碳酸盐岩正常锶同位素值(0.707 8)(图4)。在矿物形成之后,锶同位素不会随时间推移而发生改变,只有受到后期成岩流体改造时才会发生改变(Banner, 2004; 杨海军等, 2012)。研究区碳酸盐岩高锶同位素值被初步认定有两种可能:地层受壳源锶影响导致储层遭受大规模大气淡水淋滤,使富锶物质沉淀;火山喷发后的热液流体流经碎屑岩地层与云母或钾长石等矿物相互作用导致锶的大量富集。强阴极发光是碳酸盐岩经历大气淡水成岩作用改造的重要特征(黄思静,

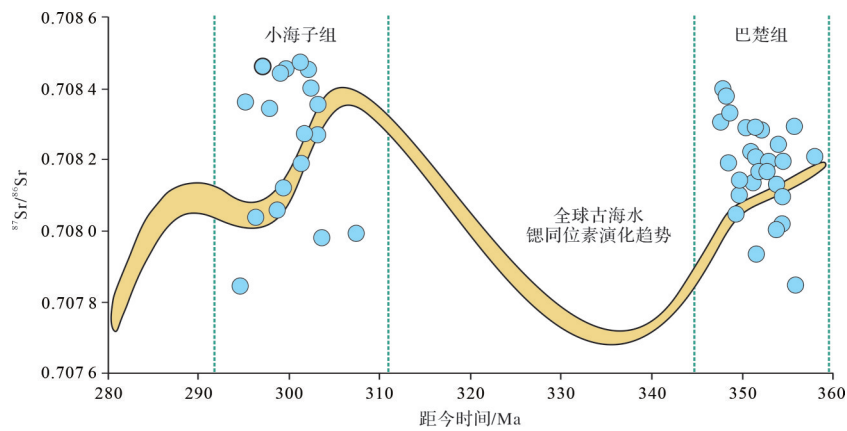


图4 研究区石炭系碳酸盐岩锶同位素特征(全球古海水锶同位素演化趋势据 McArthur *et al.*, 2001 修改)  
 Fig.4 Strontium isotope characteristics of Carboniferous carbonate rocks in the study area (evolution trends of strontium isotopes in global paleoseawaters modified from McArthur *et al.*, 2001)

2010)。结合研究区B井埋藏史图(图5)可知,石炭纪地层虽抬升较浅易受大气淡水淋滤作用,但在研究区内少见强阴极发光碳酸盐岩(图3j),部分高锶同位素值的碳酸盐岩样品具有弱阴极发光特征(图3k,l)。综合塔西南地区石炭纪地层柱状图(图1c)发现,热液流体流经下伏泥盆系东河塘组砂岩和石炭系中部卡拉沙依组砂岩时,与砂岩中的钾长石、白云母等富钾硅酸盐矿物发生溶蚀反应,导致热液流体放射性增加。因此,热液流体进入埋深更浅的巴楚组和小海子组碳酸盐岩储层时锶同位素更加富集,导致小海子组锶同位素均值(0.708 5)略高于巴楚组(0.708 3),故初步认为锶的异常高值是源于地壳深部热液活动富集。

3.3.2 碳( $\delta^{13}C$ )、氧( $\delta^{18}O$ )同位素特征

研究区大多数样品数据落在低温热液沉积碳酸

盐成因区域(C区),部分样品落在低温热液沉积碳酸盐(C区)与高温岩浆热液沉积碳酸盐(D区)之间(图6a)。由于成岩改造对碳酸盐岩矿物的碳同位素影响较小,其主要受碳来源控制,但氧同位素具有强烈的热敏性(黄思静,2010),受成岩环境(温度、流体性质)的影响变化较大。

根据氧同位素分馏特征图版(图6b)可知,大气淡水  $\delta^{18}O_{v_{SMOW}}$  约为  $-8‰$ ,而现代海水  $\delta^{18}O_{v_{SMOW}}$  约为  $0‰$ ,大气淡水  $\delta^{18}O_{v_{SMOW}}$  与具强阴极发光的碳酸盐岩氧同位素  $\delta^{18}O_{v_{PDB}}$  ( $-11.82‰ \sim -6.04‰$ ) 较为一致。若对应海水沉积环境,其碳酸盐矿物沉淀温度为  $68\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,明显与实际海水环境不符;若对应大气淡水沉积环境,其碳酸盐矿物沉淀温度为  $25\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 62\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,符合大气淡水能够作用的温度范围。因此,强阴极发光的碳酸盐矿物受大气淡水影响较大。

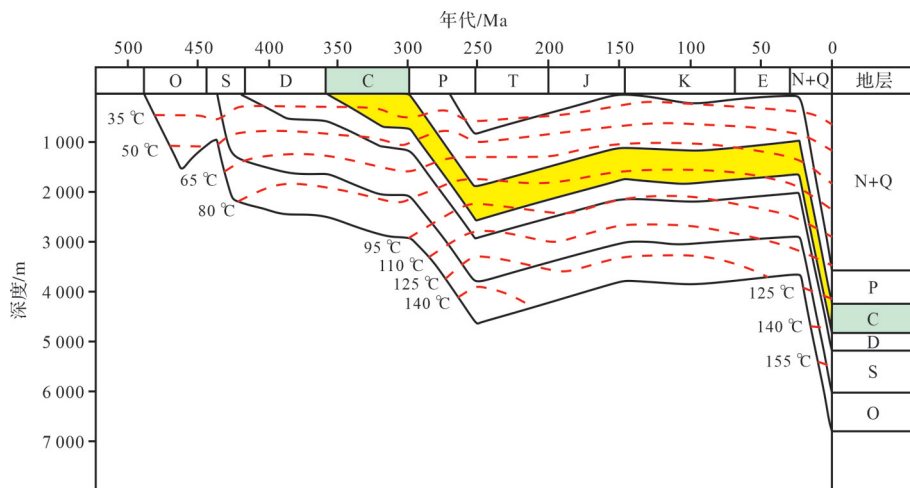


图5 研究区B井埋藏史图(据林斌,2014 修改)  
 Fig.5 Burial history of well B in the study area (modified from Lin, 2014)



图6 研究区石炭系碳酸盐矿物碳、氧同位素特征

(a)碳酸盐成因分析图(据王大锐和张映红,2001);(b)氧同位素分馏特征图版(据Friedman and O'Neil,1977)

Fig.6 Carbon and oxygen isotope characteristics of Carboniferous carbonate minerals in the study area

随着埋深增加以及水—岩反应程度加剧,初始地层水的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ 会逐渐正偏。根据岩相学特征(图3j~l)可知,弱阴极发光的碳酸盐矿物形成时间晚,故近似使用石炭系现今地层水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ (3.29‰)(林春明等,2002)来代替碳酸盐矿物沉淀时的孔隙流体 $\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ 。利用氧同位素分馏公式计算可知,弱阴极发光的碳酸盐岩矿物沉淀温度在160 °C~172 °C,已高于目前石炭系最大埋深的地层温度(图5),因此推测弱阴极发光碳酸盐岩矿物受到晚期热液流体改造影响。根据目前样品观察统计以及稳定氧同位素证据,可知早期强阴极发光碳酸盐岩矿物分布较为局限,更多的是晚期弱阴极发光的碳酸盐岩矿物分布,说明石炭系碳酸盐岩储层受到早期大气淡水和晚期热液流体的共同改造影响,但以晚期热液流体改造为主。

### 3.3.3 稀土元素特征

稀土元素(Rare Earth Element, REE)在碳酸盐岩矿物中具备稳定性,因此常被应用于地球化学示踪。稀土元素以原子质量分数大小划分为轻稀土元素(LREE)及重稀土元素(HREE),在地壳经历地球化学作用过程中,其主要受岩浆作用影响,经热液流体改造的碳酸盐岩稀土元素具有轻稀土元素富集,重稀土元素亏损的配分模式(侯中帅等,2019)。 $\delta\text{Eu}$ 为铕异常系数,若 $\delta\text{Eu}>1$ 为正异常;若 $\delta\text{Eu}=1$ 为无异常;若 $\delta\text{Eu}<1$ 为负异常; $\delta\text{Ce}$ 一般反映沉积环境的氧化还原条件,通常 $\delta\text{Ce}>1$ 为正异常,表示还原环境; $\delta\text{Ce}<0.95$ 为负异常,表示偏氧化环境(蒋裕强等,2018)。

通过对研究区11块碳酸盐岩样品进行稀土元素分析可知,其稀土元素质量分数总体较低,介于

$0.03\times 10^{-6}\sim 43.10\times 10^{-6}$ ,平均值为 $3.18\times 10^{-6}$ ;  $\delta\text{Eu}$ 值介于1.03~1.37,平均值为1.19,显示明显正异常, Eu正异常与含 $\text{Eu}^{2+}$ 的流体发生水—岩作用有关,  $\text{Eu}^{2+}$ 的稳定存在需要流体温度超过250 °C,故 $\text{Eu}^{2+}$ 常在热液流体中富集,热液流体与岩石发生水—岩作用后使岩石呈现Eu正异常(侯中帅等,2021)。 $\delta\text{Ce}$ 值介于0.87~1.06,平均值为0.94,显示流体环境主要为氧化—弱氧化环境(表1),考虑到该地区曾经历过大面积火山活动,故可以认为Eu正异常可能是碳酸盐岩对岩浆热液活动的地球化学响应。同时,稀土元素配分曲线(图7)表明其整体具有右倾特征,表现出轻稀土元素富集、重稀土元素亏损,这就充分证实研究区碳酸盐岩后期经历了强烈的热液流体改造。

## 4 热液流体对储层改造意义

热液流体因具有特殊的化学活动性,侵入岩石后会对不稳定组分进行溶蚀,上涌的深部热液流体由于地层温压差异对储层进行溶蚀改造。热液流体对储层的改造作用可划分为改善储层物性的建设性作用和破坏储层物性的破坏性作用。

### 4.1 建设性作用

建设性作用多发生在热液活动早期,改造区域以临近热源区为主,主要表现是热液流体对通道围岩的溶蚀改造及扩缝作用。热液流体在热事件早期温度高、流速快,能够与围岩发生热液蚀变与机械冲刷作用,进一步扩大运移通道(朱亚杰,2020)。

#### 4.1.1 热液溶蚀作用

前人研究表明碳酸盐岩储层相较碎屑岩储层更易受到溶蚀作用的影响(王清斌等,2019)。当热液

表1 研究区石炭系碳酸盐岩稀土元素含量及相关参数

Table 1 Rare earth element contents and related parameters of Carboniferous carbonate rocks in the study area

序号	井号	深度/m	层位	岩性	稀土元素含量/ $\times 10^{-6}$														$\frac{\sum LREE}{\sum HREE}$	$\delta Eu$	$\delta Ce$
					La	Ce	Pr	Nd	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu			
1	B井	4 270.50	小海子组	灰岩	24.10	43.10	5.09	19.20	2.66	1.25	3.29	0.64	3.55	0.62	1.75	0.28	1.77	0.27	7.84	1.29	0.87
2	B井	4 273.48	小海子组	灰岩	23.40	43.10	5.21	19.80	2.70	0.96	2.66	0.47	2.44	0.43	1.44	0.23	1.52	0.24	10.10	1.10	0.88
3	B井	4 277.92	小海子组	白云岩	2.13	4.17	0.48	1.88	0.49	0.20	0.44	0.09	0.49	0.10	0.30	0.05	0.25	0.04	5.31	1.31	0.93
4	B井	4 294.55	小海子组	白云岩	4.46	9.13	0.99	4.13	0.90	0.37	0.91	0.16	1.15	0.19	0.61	0.09	0.55	0.08	5.35	1.23	0.98
5	B井	4 306.06	小海子组	白云岩	6.43	13.90	1.44	5.67	0.99	0.37	1.15	0.21	1.10	0.20	0.59	0.10	0.60	0.10	7.11	1.06	1.03
6	B井	4 310.88	小海子组	白云岩	5.30	9.91	1.08	4.39	1.02	0.44	1.20	0.21	1.19	0.24	0.65	0.12	0.60	0.09	5.16	1.21	0.92
7	B井	4 317.23	小海子组	白云岩	11.80	21.20	2.47	9.64	1.21	0.47	1.20	0.36	2.07	0.40	1.11	0.17	1.01	0.17	7.20	1.19	0.88
8	C井	4 439.20	小海子组	灰岩	3.08	6.01	0.68	2.47	0.64	0.33	0.85	0.10	0.53	0.10	0.29	0.05	0.31	0.04	5.83	1.37	0.94
9	C井	4 442.91	小海子组	灰岩	14.50	31.40	3.06	11.60	1.55	0.50	1.40	0.43	2.28	0.46	1.22	0.20	1.14	0.17	8.59	1.04	1.06
10	C井	4 451.00	小海子组	灰岩	2.41	4.31	0.48	1.89	0.54	0.25	0.64	0.07	0.37	0.07	0.21	0.03	0.18	0.03	6.17	1.30	0.89
11	C井	4 896.63	巴楚组	灰岩	6.77	14.50	1.70	6.40	0.92	0.33	1.04	0.17	0.80	0.15	0.43	0.07	0.41	0.07	9.79	1.03	0.98

注:  $\delta Eu = Eu_N / (Sm_N \times Gd_N)^{0.5}$ ,  $\delta Ce = 2Ce_N / (La_N + Pr_N)$ , N表示球粒陨石标准化后的数值。

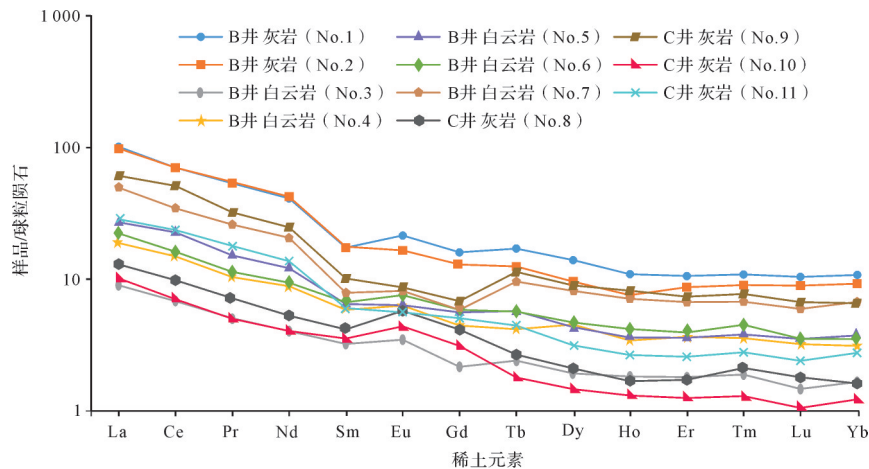


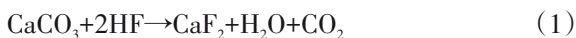
图7 研究区石炭系碳酸盐岩稀土元素配分曲线

Fig.7 Rare earth element content of Carboniferous carbonate rocks in the study area

流体沿先前存在的孔隙、裂缝进入碳酸盐岩储层时,大量酸性物质在储层岩石内发生扩径溶蚀,形成复杂的缝洞复合体(图8a~c)。热液对储层的溶蚀改造能够有效增大储层孔隙度、渗透率,改善孔隙结构。

4.1.2 萤石化作用

地层深部热液流体中氟化氢(HF)与地层中方解石(CaCO<sub>3</sub>)发生交代,生成萤石(CaF<sub>2</sub>)的过程称为萤石化作用,如下反应式(1)所示:



上述化学式反应表明,在萤石交代方解石过程中,1个方解石分子被1个萤石分子所取代。前人研究发现:相同数量下萤石体积远小于方解石体积,具体通过分子晶胞参数计算得出上述过程晶粒体积减

少33.5%(朱东亚等,2005)。体积的缩小导致萤石中产生大量的晶间孔,为热液流体活动创造空间,使原生孔隙溶蚀扩大,进一步改善储层物性(图8d)。

4.2 破坏性作用

破坏性作用多发生在热液活动晚期,改造方式以充填储层孔缝洞为主,在远离热源区最为显著(朱亚杰,2020)。在热事件晚期,随着温度和压力的降低,热液流体流动性减弱,初始所携带的物质不断析出与围岩发生交代,形成新的矿物组合充填或半充填先存的孔缝洞。针对研究区多口井取心样品进行观察发现,样品中大部分先存孔缝洞被方解石、燧石及萤石等矿物充填(图8e~i),这些充填矿物会堵塞油气运移通道,降低储层物性。

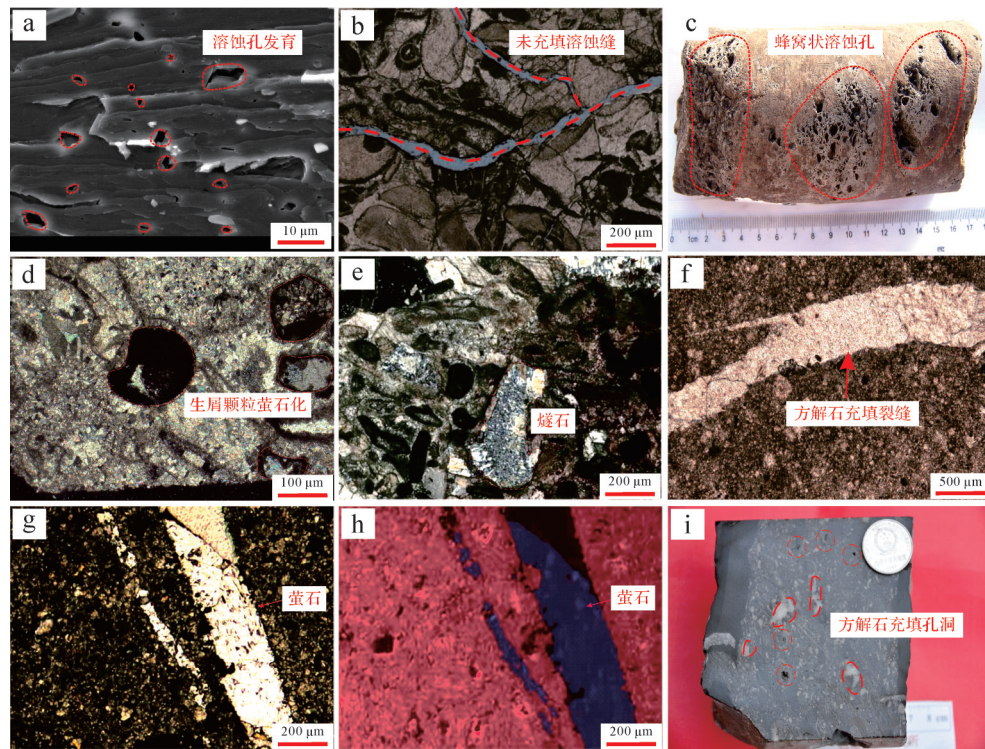


图8 研究区热液流体对碳酸盐岩储层改造特征

(a)C井,4 440.05 m,小海子组,生屑灰岩,溶蚀孔发育;(b)A井,4 778.62 m,巴楚组,亮晶云质灰岩,溶蚀缝未充填;(c)E井,4 598.64 m,小海子组,含鲕粒白云质灰岩,发育未充填溶蚀孔洞,鲕粒多被溶蚀;(d)D井,4 492.72 m,小海子组,亮晶生屑灰岩,生屑颗粒萤石化;(e)C井,4 899.80 m,巴楚组,云质灰岩,磁石充填;(f)A井,4 775.55 m,巴楚组,泥晶云岩,见方解石充填裂缝;(g)A井,4 762.45 m,巴楚组,灰质云岩,溶蚀缝充填磁石;(h)A井,4 762.45 m,巴楚组,照片g阴极发光,蓝色为萤石;(i)A井,4 786.74 m,巴楚组,灰色亮晶砂屑灰岩,方解石充填多数溶蚀孔洞

Fig.8 Characteristics of hydrothermal fluid alteration on carbonate reservoirs in the study area

#### 4.3 受热液改造碳酸盐岩储层测井响应特征

针对碳酸盐岩地层溶蚀孔洞及裂缝的发育,采用自然伽马测井、补偿中子测井、声波时差测井等手段对井位进行描述时,不同发育段获得的测井曲线会产生较大差异,利用测井曲线异常响应特征能很好反映储层缝洞发育情况。本文拟以研究区取心井岩心特征为研究对象,通过对不同类型热液溶蚀及孔缝发育层段测井曲线研究,以实现热液改造区域优质储层有效预测(图9~11)。

##### 4.3.1 储层孔缝溶蚀发育段

对研究区部分重点井位岩心观察及地球化学分析表明,孔缝洞发育良好的层段,热液对储层的改造主要为建设性作用,多见生屑颗粒被溶蚀的粒内溶孔、晶体外缘遭受溶蚀的晶间溶孔及蜂窝状溶洞密集发育,孔径最大10 mm,普遍大于5 mm,孔洞发育密集处可达15~25个/cm<sup>2</sup>,最大面孔率14%,平均面孔率6.5%,部分孔内可见油气显示。将其标定在测井曲线上发现总体具备“两高三低”的特征,即具有较高的声波时差(AC)、中子孔隙度(CNL)和较低的自然伽马

(GR)、电阻率(RD和RS)值。AC曲线通常出现轻微正异常,呈刺状,CNL曲线与AC曲线具有相似特征,呈峰丛式高值,GR曲线多无异常,呈稳定低值,RD、RS曲线响应值整体较低,出现明显幅度差(图9)。

##### 4.3.2 储层孔缝半溶蚀—半充填发育段

在热液流体活动中期,随着热液流体温度和围岩压力逐渐减弱,部分矿物逐渐充填早期热液溶蚀形成的储集空间,导致储层孔缝不完全发育,呈现半充填状态。孔洞内多见石膏和方解石半充填,裂缝由于早期受扩溶作用而加宽,多处于开启状态被半充填,孔径最大6 mm,普遍大于3 mm,最大面孔率8%,平均面孔率3.2%,部分孔内见油迹。在测井曲线上呈现出“两高两低—稳定”的特征,即中子孔隙度(CNL)和声波时差(AC)相较于充填发育段略有增大,电阻率(RD和RS)降低,但自然伽马(GR)变化幅度不大,曲线较平直且无异常(图10)。

##### 4.3.3 储层孔缝充填发育段

热液溶蚀过程产生的孔隙在改善储层的同时,也会使热液流体中大量的Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup>进入上覆地层并

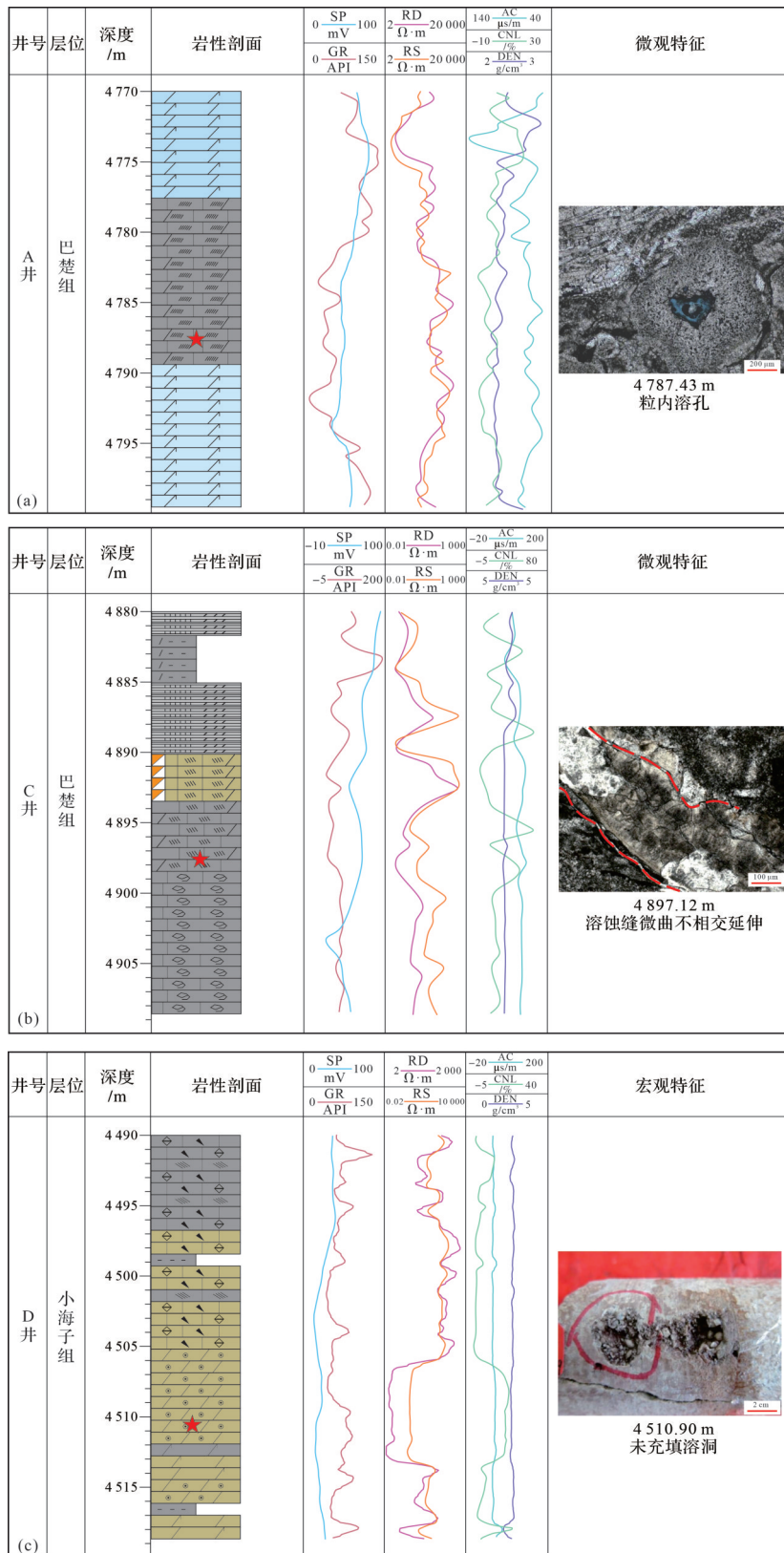


图9 研究区热液流体改造碳酸盐岩储层溶蚀发育段测井响应特征

(a)A井测井曲线特征;(b)C井测井曲线特征;(c)D井测井曲线特征

Fig.9 Logging response characteristics of dissolution-developed intervals in carbonate reservoirs altered by hydrothermal fluids in the study area

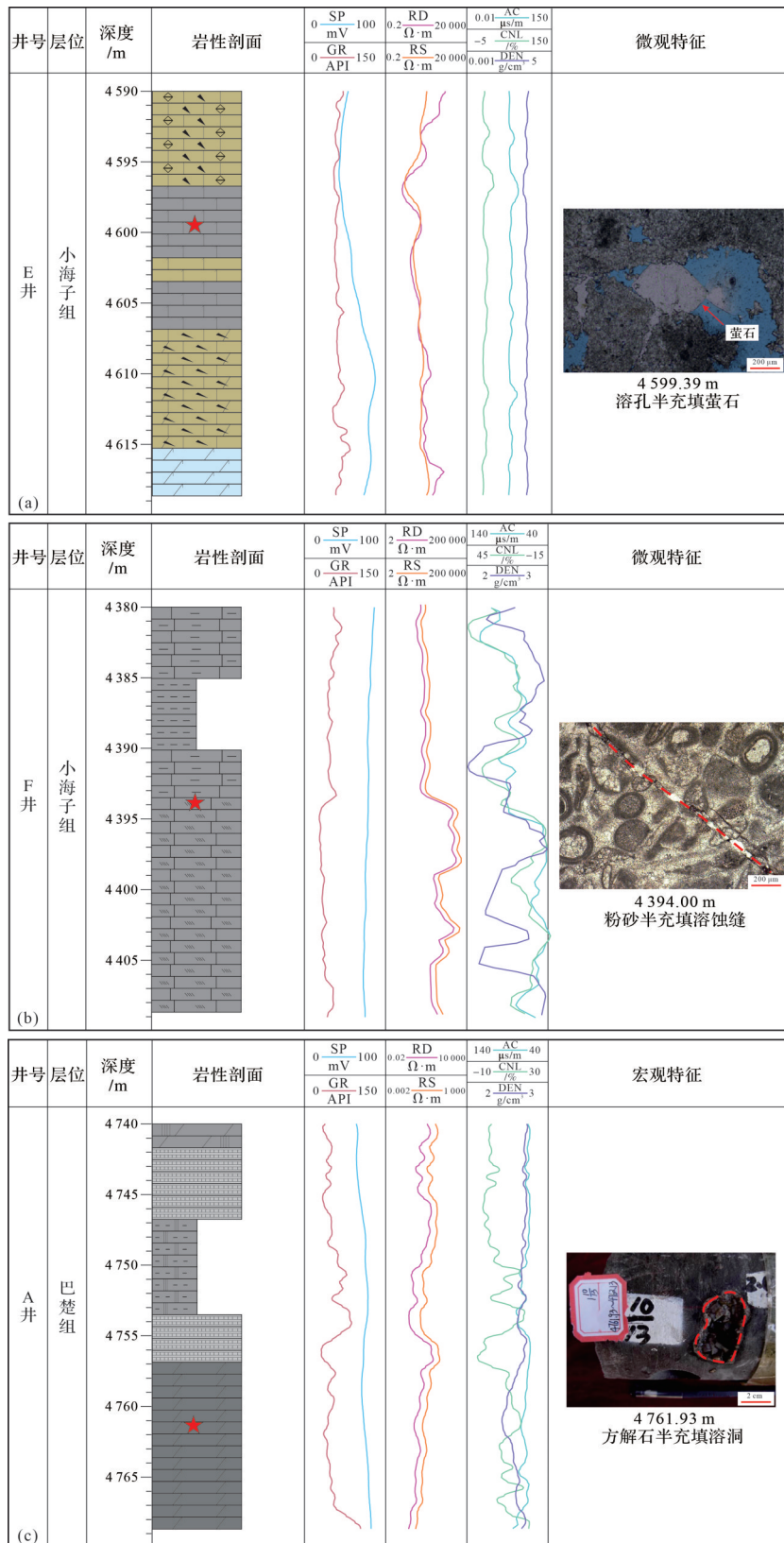


图10 研究区热液流体改造碳酸盐岩储层半溶蚀—半充填发育段测井响应特征

(a)E井测井曲线特征;(b)F井测井曲线特征;(c)A井测井曲线特征

Fig.10 Logging response characteristics of semi-dissolution and semi-filled intervals in carbonate reservoirs altered by hydrothermal fluids in the study area

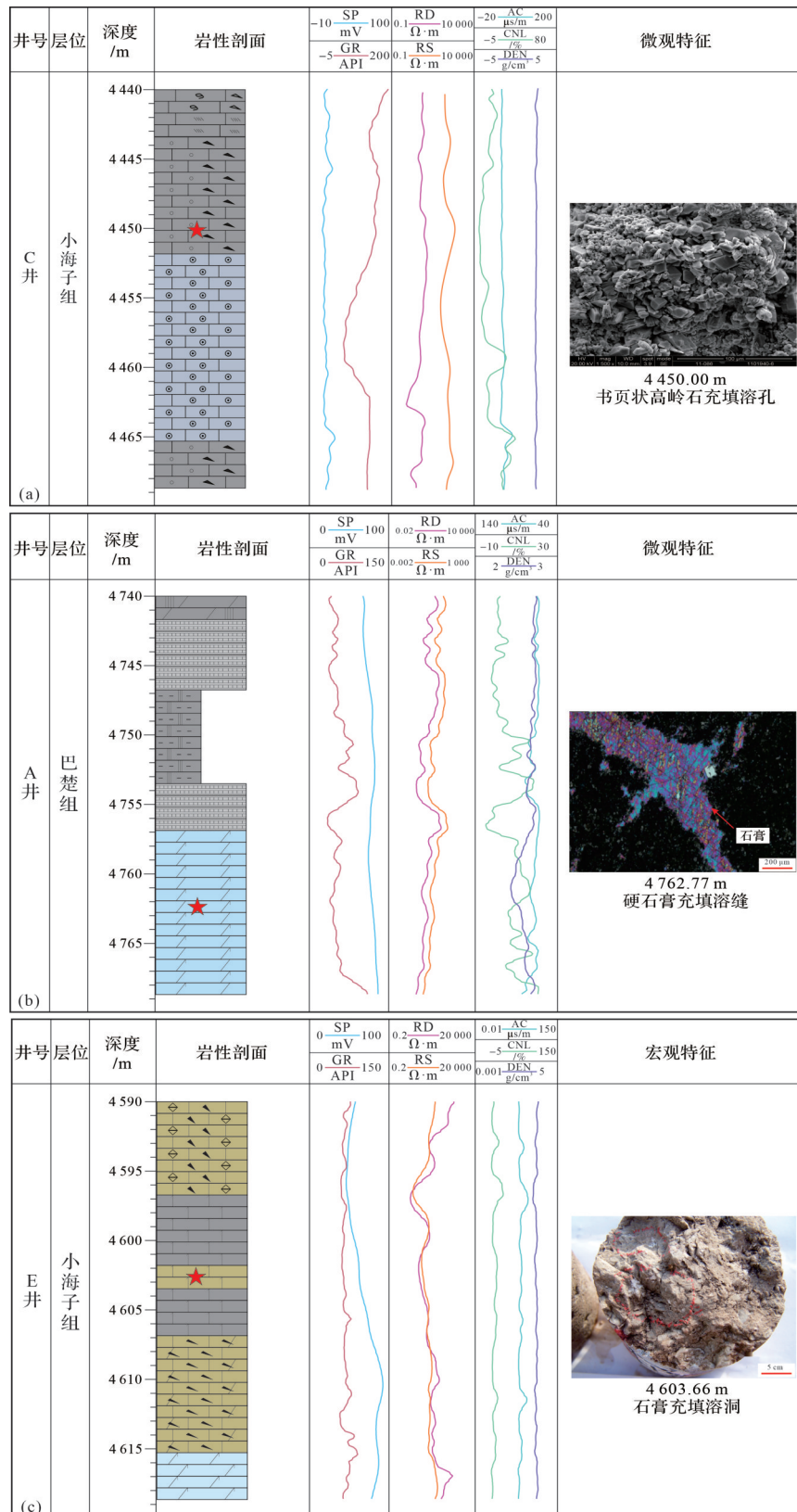


图11 研究区热液流体改造碳酸盐岩储层充填发育段测井响应特征

(a)C井测井曲线特征;(b)A井测井曲线特征;(c)E井测井曲线特征

Fig.11 Logging response characteristics of filled-developed intervals in carbonate reservoirs altered by hydrothermal fluids in the study area

以矿物沉淀的形式充填储集空间,严重破坏储集性能。充填物见硅质、黏土与膏盐胶结物充填早期溶蚀孔洞,镜下面孔率几乎为0,平均面孔率仅0.17%,油气显示较差。储层孔缝充填段在其测井曲线上依旧呈现“两高三低”的特征,即具有较高的电阻率(RD和RS)和较低的自然伽马(GR)、声波时差(AC)、中子孔隙度(CNL),RD及RS测井曲线值则表现为极高值,呈钟形,GR、AC、CNL测井曲线均为平直曲线,无异常(图11)。

#### 4.4 受热液改造碳酸盐岩储层物性演化

通过对研究区热液改造碳酸盐岩物性统计发现(图12),低孔低渗的物性特征多出现在热液充填发育段。后期充填的热液矿物破坏孔隙结构,降低储层物性,受热液溶蚀改造的碳酸盐岩物性多以中孔中渗为主,部分可达高孔高渗。同时对其具体岩性划分可知,热液改造白云岩物性整体好于热液改造灰岩,这是由于在岩石微观结构方面,研究区白云岩多为粉晶结构,灰岩多为细晶颗粒结构。细晶晶体排列形式较粉晶更加稳定,且细晶结构的孔隙率小于粉晶结构(顾展飞等,2023),在与流体发生反应时,粉晶结构与流体接触面积较大,故白云岩溶蚀程度大于灰岩。

#### 4.5 热液流体对碳酸盐岩储层改造模式

碳酸盐岩作为结晶岩,通常埋藏较深,岩性较致密,一般热液流体很难对其进行大规模的溶蚀和改造,仅能形成局部的微细孔隙或蚀变,因此热液流体对碳酸盐岩储层的溶蚀改造具有选择性。热液流体溶蚀或充填碳酸盐岩储层通常发生在地壳活动区、

构造活动强烈的断裂带附近,断裂带形成的大断层是热液流体活动的主要运移通道。

通过对塔西南地区石炭系热液流体活动及储层发育特征的研究,建立热液流体对碳酸盐岩储层的改造模式(图13)。研究区热液流体受地层断裂活动的影响,在地温梯度和压力梯度驱动下,沿不整合面、断裂破碎带和孔隙夹层等通道上涌进入碳酸盐岩地层。白云岩地层在靠近热源区时溶蚀作用较强,大面积发育溶蚀孔缝并将原先孤立孔缝连接起来,形成复杂的孔缝复合体,伴随着热液流体温度和地层压力降低,热液流体活动性减弱,初期从地下深处所携带的物质不断析出与碳酸盐岩及围岩发生反应,形成热液矿物充填孔缝。由于灰岩热液溶蚀作用弱于白云岩且以热液充填为主,故临近热源区孔缝发育程度弱于白云岩地层,热液矿物发育相对较少,方解石广泛出现,热液充填作用在远离热源区大面积发育,溶蚀孔缝普遍被热液矿物与硅质充填。

## 5 结论

(1) 研究区岩石类型以颗粒灰岩、泥—粉晶白云岩及云(灰)质灰(云)岩为主。灰岩孔隙较不发育且多被充填,连通性较差;白云岩多发育不规则状孔缝,热液流体在多孔白云石中循环速度快,水—岩相互作用彻底因此热液矿物充填较少,多以溶蚀增孔为主;云(灰)质灰(云)岩颗粒残余较多,热液流体多沿裂缝侵入且流速缓慢,在裂缝附近围岩发生溶蚀。

(2) 研究区碳酸盐岩储层中存在明显热液流体活动,发育萤石、重晶石和鞍状白云石等典型热液矿物,受热液流体影响的矿物呈现 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 异常高值、 $\delta^{18}\text{O}$ 异常低值、轻稀土元素富集、重稀土元素亏损且Eu正异常等地球化学响应。

(3) 根据测井曲线变化幅度、形态特征等分析,厘定了研究区储层溶蚀发育段、储层半溶蚀—半充填发育段及储层充填发育段的测井识别特征。

(4) 热液流体在活动早期主要通过基底断裂对通道围岩进行溶蚀作用及萤石化作用,沿断裂带产生大量次生溶蚀孔洞,对储层起建设性作用;在热液活动晚期远离断裂带处与围岩交代形成新的矿物组合充填溶蚀孔洞和裂缝,对储层起破坏性作用。

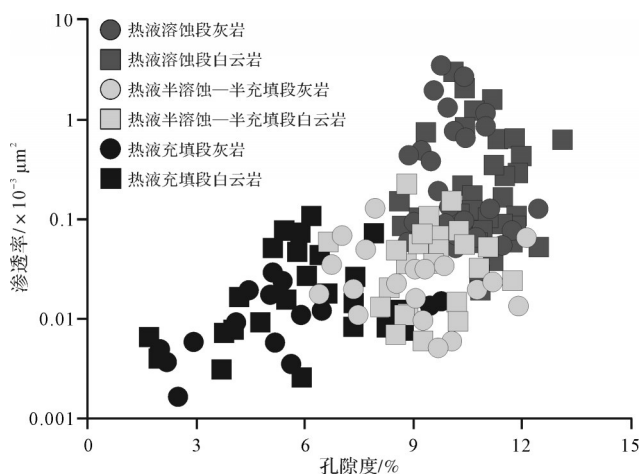


图12 研究区石炭系碳酸盐岩孔渗交会图

Fig.12 Porosity vs. permeability of Carboniferous carbonate rocks in the study area

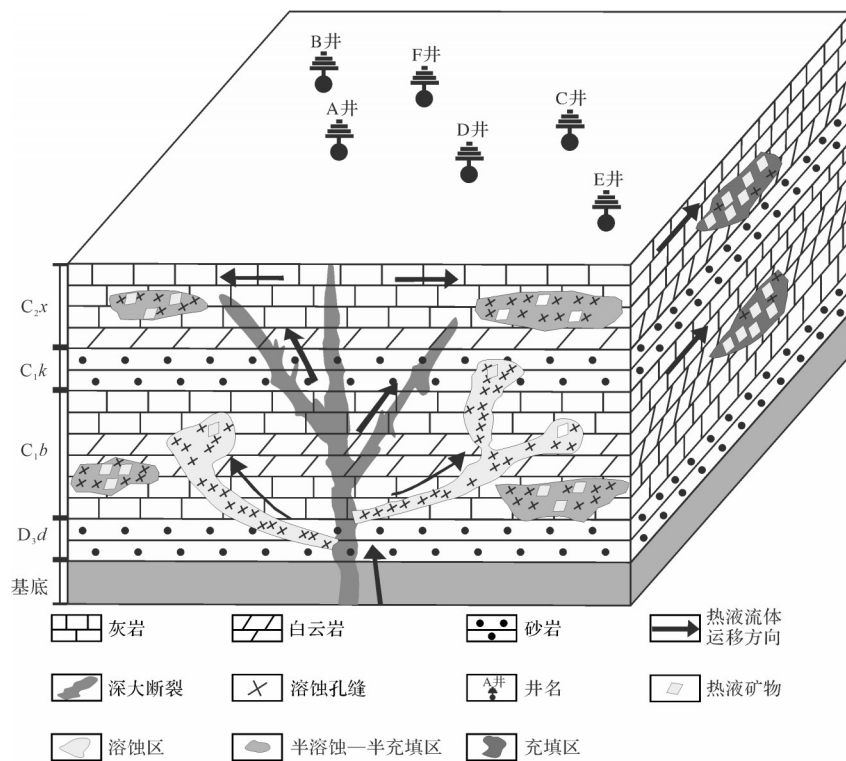


图 13 塔西南地区石炭系热液流体对碳酸盐岩储层成岩改造模式

D<sub>3</sub>d: 东河塘组; C<sub>1</sub>b: 巴楚组; C<sub>1</sub>k: 卡拉沙依组; C<sub>2</sub>x: 小海子组

Fig.13 Carbonate reservoirs diagenetic alteration model induced by Carboniferous hydrothermal fluid in the southwestern Tarim Basin

## 参考文献 (References)

- 丁茜, 胡秀芳, 高奇东, 等. 2019. 塔里木盆地奥陶系碳酸盐岩热液蚀变类型及蚀变流体的分带特征[J]. 浙江大学学报(理学版), 46(5): 600-609. [Ding Qian, Hu Xiufang, Gao Qidong, et al. 2019. The hydrothermal alteration types and zoning features of Ordovician carbonate in Tarim Basin[J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 46(5): 600-609.]
- 顾展飞, 黄冰砚, 刘之葵, 等. 2023. 振动荷载及温度对白云岩和石灰岩溶蚀影响试验研究[J]. 中国岩溶, 42(4): 834-841. [Gu Zhanfei, Huang Bingyan, Liu Zhikui, et al. 2023. Experimental study on the influence of vibration loads and temperatures on the dissolution of dolomite and limestone[J]. Carsologica Sinica, 42(4): 834-841.]
- 韩睿. 2022. 塔西南地区阿尔塔什剖面石炭系混合沉积及层序地层研究[D]. 桂林: 桂林理工大学: 17-22. [Han Rui. 2022. Mixed deposition and sequence stratigraphy of Carboniferous in Altash section, southwestern Tarim Basin[D]. Guilin: Guilin University of Technology: 17-22.]
- 何治亮, 彭守涛, 张涛. 2010. 塔里木盆地塔河地区奥陶系储层形成的控制因素与复合—联合成因机制[J]. 石油与天然气地质, 31(6): 743-752. [He Zhiliang, Peng Shoutao, Zhang Tao. 2010. Controlling factors and genetic pattern of the Ordovician reservoirs in the Tahe area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 31(6): 743-752.]

- 何治亮, 张军涛, 丁茜, 等. 2017. 深层—超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. 石油与天然气地质, 38(4): 633-644, 763. [He Zhiliang, Zhang Juntao, Ding Qian, et al. 2017. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. Oil & Gas Geology, 38(4): 633-644, 763.]
- 侯中帅, 陈世悦, 刘惠民, 等. 2019. 东营凹陷热液流体活动及其油气地质意义[J]. 中国矿业大学学报, 48(5): 1090-1101. [Hou Zhongshuai, Chen Shiyue, Liu Huimin, et al. 2019. Hydrothermal fluid activity and its hydrocarbon geological significance in Dongying Depression[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 48(5): 1090-1101.]
- 侯中帅, 周立宏, 金凤鸣, 等. 2021. 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造[J]. 地球科学, 46(1): 200-214. [Hou Zhongshuai, Zhou Lihong, Jin Fengming, et al. 2021. Hydrothermal fluid activity and its reformation on reservoirs in Qikou Depression[J]. Earth Science, 46(1): 200-214.]
- 胡明毅, 蔡习尧, 胡忠贵, 等. 2009. 塔中地区奥陶系碳酸盐岩深部埋藏溶蚀作用研究[J]. 石油天然气学报, 31(6): 49-54. [Hu Mingyi, Cai Xiyao, Hu Zhonggui, et al. 2009. Deep buried dissolution of Ordovician carbonates in Tazhong area of Tarim Basin[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 31(6): 49-54.]
- 黄思静. 2010. 碳酸盐岩的成岩作用[M]. 北京: 地质出版社: 108-111. [Huang Sijing. 2010. Carbonate diagenesis [M]. Beijing: Geological Publishing House: 108-111.]

- 蒋裕强,谷一凡,刘均,等. 2018. 川东北龙岗东地区二叠系—三叠系热液活动证据及意义[J]. 沉积学报, 36(1): 1-11. [Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Liu Jun, et al. 2018. The evidence of hydrothermal activity and its significance of Permian-Triassic strata, eastern Longgang area, northeastern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 36(1): 1-11. ]
- 金之钧,朱东亚,胡文瑄,等. 2006. 塔里木盆地热液活动地质地球化学特征及其对储层影响[J]. 地质学报, 80(2): 245-253. [Jin Zhijun, Zhu Dongya, Hu Wenxuan, et al. 2006. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 80(2): 245-253. ]
- 李义曼,陈凯,天娇,等. 2022. 广东丰顺汤坑地热田热水中稀土元素特征及其影响因素[J]. 地质论评, 68(3): 993-1005. [Li Yiman, Chen Kai, Tian Jiao, et al. 2022. REE characteristics and their influencing factors of the geothermal water in Tangkeng geothermal field, Fengshun, Guangdong province[J]. Geological Review, 68(3): 993-1005. ]
- 梁杰,温珍河,肖国林,等. 2015. 热液作用对北黄海盆地东部坳陷中生界储层的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 35(5): 117-123. [Liang Jie, Wen Zhenhe, Xiao Guolin, et al. 2015. The impact of hydrothermal activity on the reservoirs in the East Depression of the North Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 35(5): 117-123. ]
- 廖晓. 2018. 塔里木盆地西南坳陷中生代构造演化特征及对油气成藏的控制作用[D]. 西安:西北大学:14-15. [Liao Xiao. 2018. Meso-Cenozoic tectonic evolution characteristics and its controlling effects on hydrocarbon accumulation in the southwest Depression of Tarim Basin[D]. Xi'an: Northwest University: 14-15. ]
- 林斌. 2014. 塔里木盆地巴楚—麦盖提地区志留系与泥盆系油气成藏机制研究[D]. 长春:吉林大学:48-52. [Lin Bin. 2014. The research on accumulation mechanisms of petroleum reservoirs of the Silurian and Devonian in Bachu-Maigaiti area, Tarim Basin[D]. Changchun: Jilin University: 48-52. ]
- 林春明,凌洪飞,王淑君,等. 2002. 苏皖地区石炭纪海相碳酸盐岩碳和氧同位素演化规律[J]. 地球化学, 31(5): 415-423. [Lin Chunming, Ling Hongfei, Wang Shujun, et al. 2002. Evolution regularities of carbon and oxygen isotopes in Carboniferous marine carbonate rocks from Jiangsu and Anhui provinces[J]. Geochimica, 31(5): 415-423. ]
- 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等. 2020. 中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J]. 石油与天然气地质, 41(4): 655-672, 683. [Ma Yongsheng, Li Maowen, Cai Xunyu, et al. 2020. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: Advances, technological bottlenecks and basic scientific problems[J]. Oil & Gas Geology, 41(4): 655-672, 683. ]
- 王大锐,张映红. 2001. 渤海湾油气区火成岩外变质带储集层中碳酸盐胶结物成因研究及意义[J]. 石油勘探与开发, 28(2): 40-42. [Wang Darui, Zhang Yinghong. 2001. A study on the origin of the carbonate cements within reservoirs in the external metamorphic belt of the Bohai Bay oil-gas bearing region[J]. Petroleum Exploration and Development, 28(2): 40-42. ]
- 王丹. 2024. 塔北、塔中地区寒武系—奥陶系白云岩多成因模式[J]. 沉积学报, 42(3): 857-876. [Wang Dan. 2024. Geochemical characteristics and origins of the Cambrian-Ordovician dolomites in northern and central Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(3): 857-876. ]
- 王清斌,刘立,牛成民,等. 2019. 渤中凹陷北部陡坡带热液活动及其对湖相碳酸盐岩储层的影响[J]. 地球科学, 44(8): 2751-2760. [Wang Qingbin, Liu Li, Niu Chengmin, et al. 2019. The geological evidences and impacts of deep thermal fluid on lacustrine carbonate reservoir in the actic area of the north part of Bozhong Depression, Bohai Bay Basin[J]. Earth Science, 44(8): 2751-2760. ]
- 杨海军,李开开,潘文庆,等. 2012. 塔中地区奥陶系埋藏热液溶蚀流体活动及其对深部储层的改造作用[J]. 岩石学报, 28(3): 783-792. [Yang Haijun, Li Kaikai, Pan Wenqing, et al. 2012. Burial hydrothermal dissolution fluid activity and its transforming effect on the reservoirs in Ordovician in central Tarim[J]. Acta Petrologica Sinica, 28(3): 783-792. ]
- 张蔚. 2020. 塔里木盆地西南坳陷油气运聚成藏过程及富集特征[D]. 北京:中国石油大学(北京):11-12. [Zhang Wei. 2020. Hydrocarbon migration and accumulation and its enrichment characteristics in Southwest Depression of the Tarim Basin, NW China[D]. Beijing: China University of Petroleum: 11-12. ]
- 周锡强,遇昊,黄泰誉,等. 2016. 重晶石沉积类型及成因评述:兼论扬子地区下寒武统重晶石的富集机制[J]. 沉积学报, 34(6): 1044-1056. [Zhou Xiqiang, Yu Hao, Huang Taiyu, et al. 2016. Genetic classification of sedimentary barites and discussion on the origin of the lower Cambrian barite-rich deposits in the Yangtze Block, South China[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 34(6): 1044-1056. ]
- 朱东亚,胡文瑄,宋玉才,等. 2005. 塔里木盆地塔中45井油藏萤石化特征及其对储层的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 24(3): 205-215. [Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Song Yucai, et al. 2005. Fluoritization in Tazhong 45 reservoir: Characteristics and its effect on the reservoir bed[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 24(3): 205-215. ]
- 朱东亚,金之钧,胡文瑄. 2009. 塔中地区热液改造型白云岩储层[J]. 石油学报, 30(5): 698-704. [Zhu Dongya, Jin Zhijun, Hu Wenxuan. 2009. Hydrothermal alteration dolomite reservoir in Tazhong area[J]. Acta Petrologica Sinica, 30(5): 698-704. ]
- 朱东亚,孟庆强,胡文瑄,等. 2013. 塔里木盆地塔北和塔中地区流体作用环境差异性分析[J]. 地球化学, 42(1): 82-94. [Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Hu Wenxuan, et al. 2013. Differences between fluid activities in the central and north Tarim Basin[J]. Geochimica, 42(1): 82-94. ]
- 朱东亚,孟庆强,金之钧,等. 2012. 富CO<sub>2</sub>深部流体对碳酸盐岩的溶蚀—充填作用的热力学分析[J]. 地质科学, 47(1): 187-201. [Zhu Dongya, Meng Qingqiang, Jin Zhijun, et al. 2012. Thermo-

- dynamic analysis for carbonate dissolution-filling under influence of CO<sub>2</sub>-rich deep fluid[J]. *Chinese Journal of Geology*, 47(1): 187-201. ]
- 朱亚杰. 2020. 热液对碳酸盐岩储层的改造作用研究:以塔河地区为例[D]. 青岛:中国石油大学(华东):25-26. [Zhu Yajie. 2020. Study on the reformation of hydrothermal fluid on carbonate reservoir: Taking Ordovician in Tahe area as example[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China): 25-26. ]
- Al-Aasm I. 2003. Origin and characterization of hydrothermal dolomite in the western Canada sedimentary basin[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 78/79: 9-15.
- Banner J L. 2004. Radiogenic isotopes: Systematics and applications to earth surface processes and chemical stratigraphy[J]. *Earth-Science Reviews*, 65(3/4): 141-194.
- Cai C F, Hu W S, Worden R H. 2001. Thermochemical sulphate reduction in Cambro-Ordovician carbonates in central Tarim[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 18(6): 729-741.
- Davies G R, Smith L B. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1641-1690.
- Friedman I, O'Neil J R. 1977. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest[M]//Fleischer M. Data of geochemistry. 6th ed. Washington: United States Government Printing Office: 108-110.
- Hein J R, Zierenberg R A, Maynard J B, et al. 2007. Barite-forming environments along a rifted continental margin, southern California Borderland[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 54(11/12/13): 1327-1349.
- Jiu B, Huang W H, Li Y. 2020. The effect of hydrothermal fluids on Ordovician carbonate rocks, southern Ordos Basin, China[J]. *Ore Geology Reviews*, 126: 103803.
- Jiu B, Huang W H, Mu N N, et al. 2022. Petrology, mineralogy and geochemistry of Ordovician rocks in the southwest of Tarim Basin, implications for genetic mechanism and evolution model of the hydrothermal reformed-paleokarst carbonate reservoir[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 140: 105687.
- Lan Z W, Wu S T, Wang F Y, et al. 2023. A ca. 290 Ma hydrothermal calcite in Cambrian dolostone[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 147: 106011.
- Li S M, Pang X Q, Jin Z J, et al. 2010. Petroleum source in the Tazhong Uplift, Tarim Basin: New insights from geochemical and fluid inclusion data[J]. *Organic Geochemistry*, 41(6): 531-553.
- Lu L, Zhang Y T, Li Z F, et al. 2023. Petrogenesis of the alkali basalt and trachy-andesite suite in the northern Tarim Basin, NW China: Implications for crust-mantle interactions controlled by the Permian mantle plume[J]. *Gondwana Research*, 119: 86-103.
- Ma P J, Lin C Y, Jahren J, et al. 2021. Cyclic zoning in authigenic saddle dolomite-ankerite: Indications of a complex interplay between fault-rupturing and diagenetic alteration[J]. *Chemical Geology*, 559: 119831.
- Ma Q, Ma T, Yang H J, et al. 2019. Development characteristics of the third-order sequence of Upper Devonian – Lower Carboniferous shore-mixed shelf in Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 46(4): 701-710.
- McArthur J M, Howarth R J, Bailey T R. 2001. Strontium isotope stratigraphy: LOWESS version 3: Best fit to the marine Sr-isotope curve for 0-509 Ma and accompanying look-up table for deriving numerical age[J]. *The Journal of Geology*, 109(2): 155-170.
- Ogawa Y, Shikazono N, Ishiyama D, et al. 2005. An experimental study on felsic rock-artificial seawater interaction: Implications for hydrothermal alteration and sulfate formation in the Kuroko mining area of Japan[J]. *Mineralium Deposita*, 39(8): 813-821.

## Hydrothermal Fluid Identification in Carboniferous Carbonate in the Southwestern Tarim Basin and Its Significance for Reservoir Alteration

LI YingRui<sup>1,2</sup>, MA BenBen<sup>1,2</sup>, LU YongChao<sup>1,2</sup>, YANG RuiBin<sup>1,2</sup>, GENG Feng<sup>3</sup>, SHA XuGuang<sup>3</sup>

1. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources (China University of Geosciences), Ministry of Education, Wuhan 430074, China

2. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Northwest Oilfield Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China

**Abstract:** [Objective] Deep carbonate reservoirs have an enormous potential for oil and gas exploration. However, due to their complex diagenesis, they are highly heterogeneous and dense. To clarify the modifying effect of hydro-

**Foundation:** Natural Science Foundation of Hubei Province, No. 2022CFB031; The Project for Northwest Oilfield Company, SINOPEC, No. 3440008-22-ZC0607-0046

**Corresponding author:** MA BenBen, E-mail: mabenben@cug.edu.cn

thermal fluid activity on the carbonate reservoirs in a petroliferous basin, this study investigated Upper Carboniferous strata in the southwestern Tarim Basin. **[Methods]** The main study area includes some key well locations in the Bachu Uplift and Maigaiti Slope, and typical field outcrop profiles in the Kunlun piedmont thrust belt. Previous research on hydrothermal fluid activity has mainly focused on the northern and Tazhong region of the Tarim Basin, mostly concentrating on the Ordovician System. These studies have accumulated rich experience and obtained many results; however, generally little exploration has been carried out in the southwestern Tarim Basin. To strengthen the basic research, the method of combining geology and geochemistry was adopted in the study area: core observation, thin sections, cathodoluminescence, scanning electron microscopy, isotope data, rare earth element characteristics and previous information were used to identify the indicators of hydrothermal activity in the target formation, defining the alteration mode of carbonate reservoirs in the study area and establishing their logging responses to alteration by the heated fluid. **[Results]** A detailed classification of the petrology of the study area found that the presence of typical hydrothermal minerals (e.g., fluorite, barite, and saddle-shaped dolomite) is an indicator of hydrothermal fluid activity. The geochemical responses of these carbonate rocks to modification by hydrothermal fluids includes high  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  values, very low  $\delta^{18}\text{O}$ , light rare earth element enrichment, loss of heavy rare earth elements, and positive Eu anomalies. Hydrothermal fluids often contain many chemically active substances and release a large amount of heat energy in their interaction with rock and produce physical and chemical reactions with the rock. In particular, such reactions promote strong dissolution of carbonate rocks. **[Conclusions]** It has been demonstrated that hydrothermal fluids have both positive and negative effects on the alteration of carbonate rock reservoirs. In the constructive role, the high temperature and rapid flow rate of hydrothermal fluids have strong chemical dissolution and mechanical erosive effects on the rock, expanding migration channels, increasing reservoir porosity, improving pore structure, and generally enhancing reservoir physical properties. Most of these occur at the earliest stage of hydrothermal activity and in the proximity of fault zones. They are identified in the logging response by high acoustic time difference, neutron porosity, low natural gamma and low resistivity values. The dissolution pores and fractures are developed over a large zone, and most are not filled. Conversely, a destructive effect occurs at lower temperature and pressure of the hydrothermal fluid, and is recognized by hydrothermal mineral infill in pores and fractures. As the fluidity decreases, the material carried by the hydrothermal fluid is constantly precipitated, forming new mineral combinations filling pre-existing pores and fractures, which reduces reservoir porosity and damages pore structure. This type of alteration mostly occurs in the late stage of hydrothermal activity far from the fault zone. It is evident in logging response by high resistivity and low natural gamma and acoustic time difference, and low neutron porosity; the pores and fissures are mostly isolated and extensively filled. Overall, however, the target strata were mainly affected by constructive hydrothermal dissolution and its positive impact on reservoir development.

**Key words:** hydrothermal fluid; carbonate rocks; reservoir alteration; Carboniferous; southwestern Tarim Basin