

热液流体活动的识别方法及 油气地质意义研究进展

张兰馨^{1,2}, 张凤奇^{1,2}, 赵振宇³, 高建荣³, 李程善⁴, 王庆利⁵, 朱志锋⁵

1 西安石油大学地球科学与工程学院; 2 陕西省油气成藏地质学重点实验室;

3 中国石油勘探开发研究院; 4 中国石油长庆油田公司勘探事业部; 5 中国石油长庆油田公司第四采油厂

摘要 基于大量的文献调研,归纳总结了热液流体活动的识别方法,并系统梳理了热液活动对油气成藏的影响。目前热液流体活动的主要识别方法可归纳为3大类,分别为岩石矿物学特征组合法、温感参数异常法、地球化学元素含量异常法。在具体应用时,应尽可能选取多种方法进行综合判识。热液流体活动对油气成藏的影响体现在4个方面:深部热液流体通过提供烃源岩成熟演化所需要的热能、外源氢和催化剂等方式为烃类物质的形成创造了良好的条件;热液流体对油气储层的影响既有建设性也有破坏性,以热液溶蚀的建设性为主;深部热液流体可以增强盖层封闭性;热液流体可促进烃源岩生烃并形成生烃增压,从而促进油气的初次运移,热液流体的溶蚀作用可改善储层物性进而促进油气的二次运移。

关键词 热液流体; 识别方法; 地球化学; 溶蚀作用; 油气聚集; 研究进展

中图分类号:TE122.1 **文献标识码**:A

0 前言

“热液”一词是指所有高温水溶液(温度范围为50~400℃),其中含有许多化学物质^[1],如CO₂、H₂S等酸性气体和多种阴阳离子,通常沿着由裂缝形成的通道从深部向浅部活动,同时携带大量的热能^[2]。世界范围内发现了许多经过热液改造的地区,如美国和加拿大东部密执根盆地的Lima-Indiana油田和Albion-Scipio油田储量非常丰富,其中45%的产能来自于由断裂构造控制的热液白云岩储层,被称为“金色峡谷”^[3];在渤海海域渤中凹陷,热液溶蚀作用产生大量的次生孔隙改善了地层的输导性能,为油气运移提供了良好的通道^[4];在塔里木盆地,热液流体活动导致碳酸盐岩储层溶蚀孔隙发育,溶蚀后的碳酸盐岩储层成为了重要的油气储层^[5-6]。不仅碳酸盐岩地层会受到深部热液流体活动的改造,碎屑

岩地层也易受其影响。在渤海湾盆地济阳坳陷和苏北盆地黄桥CO₂气藏中,热液流体活动对砂岩储层进行溶蚀改造,溶蚀产物在上覆盖层的微孔隙中沉淀,形成特征矿物,提高了盖层封闭性,最终形成了重要的天然气聚集区^[7]。越来越多的研究成果证明深部热液流体参与到油气成藏的全过程,因此,深部热液流体活动对油气成藏具有十分重要的影响。

国内外许多学者对热液流体活动进行了大量研究^[1,5,8-12],提出了较多识别方法,并且逐渐认识到热液流体活动对油气的生成、运移以及储层、盖层的形成和发育会产生重要且十分复杂的影响。前人对热液流体活动的研究通常是选取某一特定地区进行实例研究,这样不同地区通常选用不同的识别方法。在热液流体活动对油气成藏影响方面,前人多分析热液流体活动对个别成藏条件的影响。

收稿日期:2022-09-08; 改回日期:2023-02-23; 网络出版日期:2023-07-21

本文受国家自然科学基金“压力-应力耦合对前陆冲断带深层-超深层碎屑岩储层异常高原生孔隙的保存机制研究”(编号:42172164)、中国石油“十四五”前瞻性基础性科技攻关项目“深层超深层油气成藏过程与油气分布规律研究”(编号:2021DJ0203)、陕西省自然科学基金计划项目“致密砂岩储层多尺度微观孔隙分布表征及其含油有效性”(编号:2017JM4004)和陕西省教育厅重点实验室科研计划项目“强非均质性致密砂岩储层石油形成的流体动力学机制研究——以鄂尔多斯盆地延长组长7油层组为例”(编号:17JS110)联合资助

第一作者:张兰馨,硕士研究生在读,研究方向为油气成藏地质学。通信地址:710065 陕西省西安市雁塔区电子二路18号 西安石油大学;E-mail:2455635987@qq.com

通信作者:张凤奇,博士,教授,硕士生导师,主要从事油气形成机制与油气成藏动力学研究。通信地址:710065 陕西省西安市雁塔区电子二路18号 西安石油大学;E-mail:zhangfengqi68@126.com

目前,针对热液流体活动的识别方法及对油气成藏的影响方面尚未开展过系统梳理和总结。因此,本文基于大量的文献调研,梳理和归纳了深部热液流体活动的识别方法,并系统总结了热液流体活动对油气成藏方面的影响,以期受沉积盆地深部热液流体活动改造的油气成藏条件研究提供借鉴。

1 热液流体活动的识别方法

热液流体具有的高温高压特性会改变流经地层的温度和压力,同时其携带的 CO_2 、 H_2S 等酸性气体和高热能,能显著影响和改变流经地层的岩石结构和物理化学组成。因此,热液流体活动会对含油气盆地中的烃源岩、储层和盖层产生显著影响,并被记录下来作为热液流体活动的标志。前人研究发现的热液流体活动的识别方法较多,可将其主要分为3个大类:岩石矿物学特征组合法、温感参数异常法、地球化学元素含量异常法^[9, 13-14]。

1.1 岩石矿物学特征组合法

在热液流体沿断裂等通道从深部向浅部运移

的过程中,会与围岩发生一系列的水-岩反应,从而改变流经地层的岩石结构、矿物组成以及黏土矿物的转化等特征^[11,13]。因此,在热液流体活动影响下,以岩石和矿物的结构和组成的异常改变为特征,并将这些特征方法组合起来统称为岩石矿物学特征组合识别法。

1.1.1 岩石结构特征

深层高温高压热液流体沿着深大断裂进入地层时,容易与围岩发生一系列的物理化学反应,改变围岩的颜色和岩石结构,形成热液角砾岩、岩石的斑马状结构和岩石的热褪色结构^[5,11],通过这些特征可以指示热液流体活动的存在。

(1) 热液角砾岩

深部高温高压热液流体向上运移的方式常具有爆发性,会引起围岩的脆性破裂,随后 CO_2 分压降低导致热液矿物快速沉淀,形成热液角砾岩(图1a)。热液角砾岩常与断裂和裂缝系统相伴生^[13],在热液白云岩储层中非常普遍,通常被认为是热液流体活动的典型标志。



(a) 热液角砾岩。Bre为茅三段热液角砾岩; Cd为白云石胶结物。四川盆地, 丰都放牛坝剖面
(b) 斑马状构造。ZF为斑马状构造; D2为茅二段细-中晶白云岩。四川盆地, 洪雅张村剖面
(c) 泥岩褪色呈土黄色。歧口凹陷, GG16102井2 182.30 m, 上古生界太原组。岩心

图1 热液流体改造的典型岩石学特征(据文献[11,14])

Fig. 1 Typical petrology characteristics of hydrothermal transformation (cited from references [11,14])

(2) 岩石的斑马状结构

斑马状结构是一系列相互平行的亮带与暗带交替出现的条带状结构,这些条带一般为毫米至厘米级别(图1b)。高压热液流体侵入导致压裂作用使围岩形成雁列式的裂隙^[14],富 CO_2 酸性热液流体进入裂隙溶蚀储层增加了围岩的渗透性,导致压力下降使裂缝被快速沉淀的热液矿物充填,最终形成热液矿物亮带与围岩暗带叠复出现的斑马状结构^[11]。斑马状结构是热液白云岩最明显的岩石学

特征,成为了热液流体活动最容易识别的特征。

(3) 岩石的热褪色结构

热褪色就是在热液流体活动的作用下,局部或全部岩石的颜色由深变浅甚至变白的现象(图1c)。深部热液在运移的过程中经常处于超临界状态,能够萃取并富集周围地层中分散的有机质,由于分散的有机质是暗色泥岩最主要的致色因素,因此,有机质的散失会导致泥岩明显褪色^[11,15]。在高温热液流体的烘烤作用下,也会导致岩石明显褪色^[16]。虽然热褪色作

用可以用来识别热液流体活动,但岩石在经历强还原地球化学作用或泥岩重结晶胶结式硅化时同样会发生褪色^[17],因此不能单独用来识别热液流体活动,可以与其他标志相结合,共同指示热液流体活动。

1.1.2 矿物组成特征

深部热液流体可以与围岩发生反应,在温压条件改变的情况下沉淀形成矿物,成为热液流体活动研究可追溯的印记,如黄铁矿、鞍状白云石、萤石、片钠铝石、绢云母、地开石、磷灰石等^[12,18-19]。

酸性热液流体容易与碳酸盐岩发生反应并产生自生黄铁矿、鞍状白云石和萤石等矿物。其中黄铁矿在扫描电镜下晶形完整,呈自形一半自形(图2a)^[12]。前人按照形态将黄铁矿分成3类^[20]: I类黄铁矿呈自形立方体,II类黄铁矿为半自形立方体,III类黄铁矿呈胶状或莓球状。其中,I类黄铁矿一般被认为与高温热液成矿作用相关,因此黄铁矿的自形立方体形态可以用来指示热液流体活动。同

时,热液成因的黄铁矿,其Co/Ni值多大于1^[4]。鞍状白云石被看作是热液流体活动的指示剂,主要以粗粒的马鞍形晶体集合为特征(图2b)^[21]。鞍状白云石中¹⁸O的富集也是热液流体活动的典型标志^[3]。萤石是深部热液流体和储层围岩进行交代作用形成的热液矿物(图2c),如反应式(1)所示:



当萤石形成后,颗粒体积减小了33.5%,使储层物性得到改善^[22]。

热液流体活动会使碎屑岩储层发生溶蚀作用,主要表现为长石被溶蚀后产生片钠铝石(反应式(2))、高岭石(反应式(3))和石英的次生矿物组合,并产生次生孔隙^[23]:

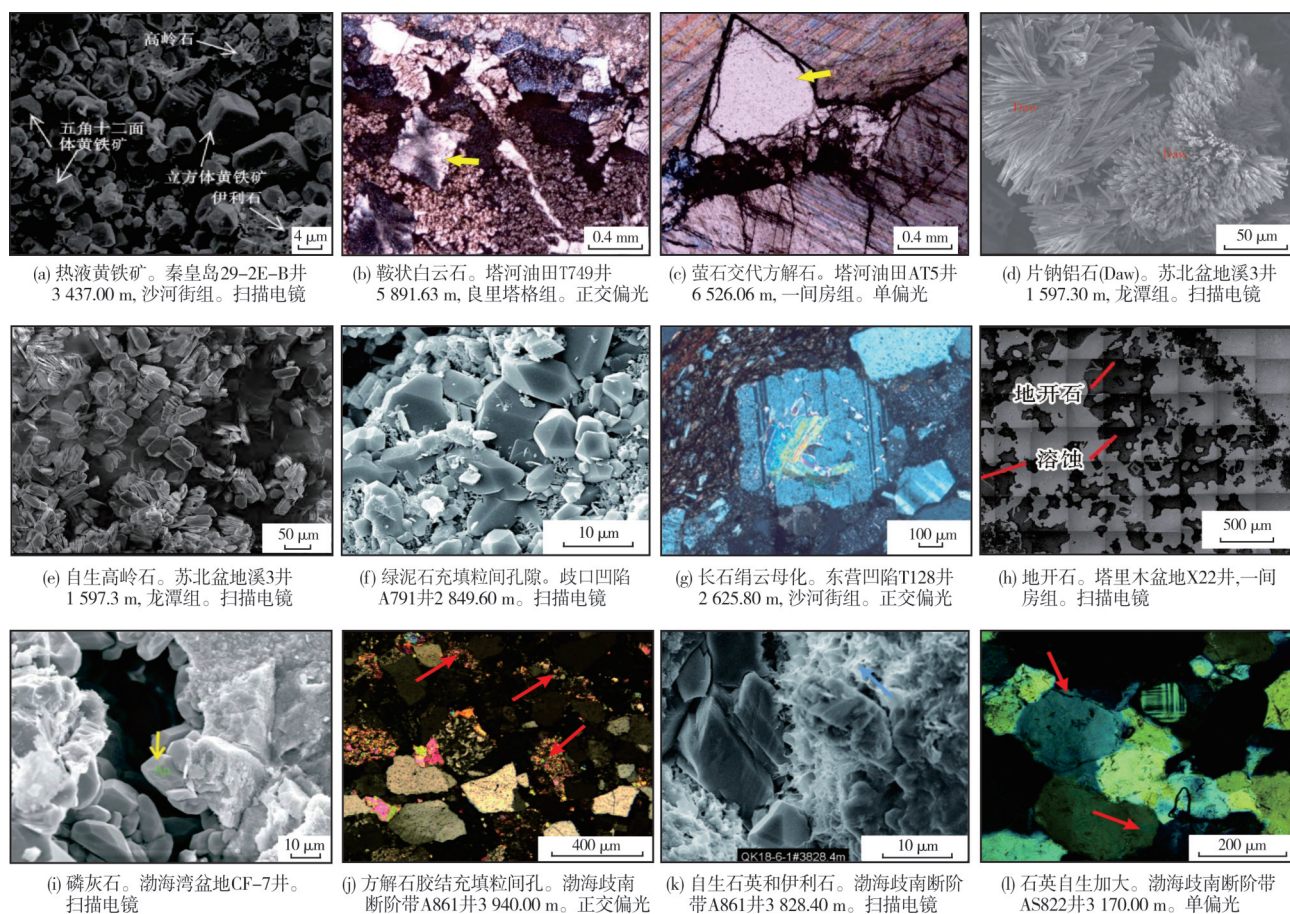
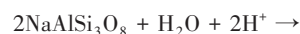
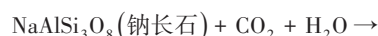


图2 热液改造的典型矿物特征(据文献[11-12,18,20,24-27])

Fig. 2 Typical mineral characteristics of hydrothermal transformation (cited from references [11-12,18,20,24-27])

在溶蚀产物中,片钠铝石主要以针状、放射状集合体生长于孔隙内(图2d)^[18],被认为是高CO₂分压条件下的标志性矿物^[28];高岭石主要以六方板状书页状集合体(簇状)分布于碎屑颗粒之间(图2e)。

热液流体活动会使花岗岩发生热液蚀变,并导致绿泥石化(图2f)、绢云母化(图2g),形成地开石(图2h)和磷灰石(图2i)。地开石是形成于高温(大于90℃)环境中的高岭石的同族矿物^[19],它是花岗岩黏土热液蚀变的证据^[29]。

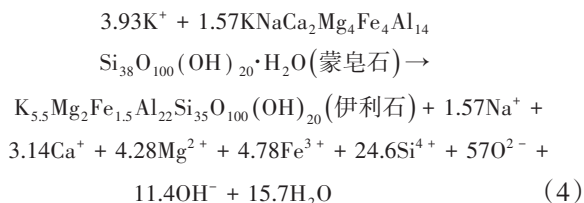
另外,在热液溶蚀过程中,随着热液流体温度下降和运移速度的降低,热液流体携带的溶解物会在裂缝中沉淀析出,形成方解石(图2j)和自生石英充填(图2k,2l)^[26]。

由于矿物成因的复杂性,以某一种矿物特征作为该地区热液流体活动的标志往往是不准确的^[13],必须出现多种矿物或矿物组合,才能准确地识别出热液流体活动^[12]。

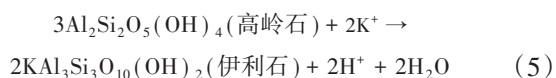
1.1.3 黏土矿物转化特征

黏土矿物对温压条件的变化较为敏感,因此常被用来指示成岩环境^[30]。具有酸性的高温高压热液流体活动会改变其流经岩石的温度、酸碱度和压力,从而改变地层的成岩环境,整体上对黏土矿物的转化具有促进作用^[9]。

热液流体活动会通过改变地层温度而影响黏土矿物转化。在没有热液流体侵入时,黏土矿物纵向上呈现出规律性变化,即随着地层深度和温度的增高,蒙皂石逐渐转化为伊蒙混层最终转化为伊利石,如反应式(4)所示:

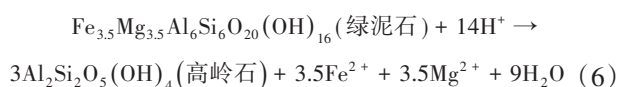


但是,高温热液流体在地层中运移会增加围岩的温度,造成黏土矿物的超前演化,使得蒙皂石与伊利石之间的转化存在突变,生成较多的伊利石^[1]。同时,高岭石在120~150℃之间会变得极不稳定,并在富钾条件下转化为伊利石,如反应式(5)^[31]所示:

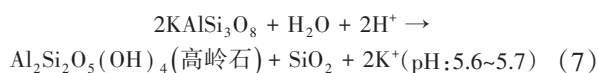


最终导致伊利石含量异常增大。

热液流体活动会通过改变流体酸碱度影响黏土矿物转化。通常情况下,高岭石会随埋深和温度的增大逐渐向伊利石和绿泥石转化。但随着深部酸性热液流体的侵入,孔隙流体转变为酸性,使得蒙皂石更易转换成高岭石,绿泥石也会变得极不稳定,消失进而转化为高岭石,如反应式(6)^[32-33]所示:



热液流体中携带的有机酸溶蚀长石等碎屑颗粒也会形成高岭石,如反应式(3)、反应式(7)^[34]所示:



最终导致高岭石含量异常增高。

热液流体活动会形成异常压力抑制黏土矿物的转化。深部热液流体常具较大的压力,可以形成异常高压区^[34]。过高的压力不仅抵消了温度和酸碱度对黏土矿物转化的积极影响,还会使黏土矿物的转化速度变慢^[35]。

深部热液流体会通过提高地层温度、改变地层酸碱度和形成异常压力等方式影响黏土矿物的转化,使得黏土矿物的含量出现异常。高温热液流体活动导致伊利石含量异常增加会造成储层物性变差,不利于优质储层的形成。

1.2 温感参数异常法

热液流体活动会导致盆地内温度和压力的改变,其中温度场的变化可通过对温度十分敏感的参数反映出来。较为有效的参数有镜质组反射率、流体包裹体的均一温度、热解参数、碳氧同位素组成等指标^[36-37]。将在热液流体活动的影响下,温度参数异常改变的识别方法称为温感参数异常法。

1.2.1 碳氧同位素组成异常

人们普遍认为氧同位素具有“温度计效应”^[38]。深部热液流体作用地区一般呈现出碳同位素组成值偏正,氧同位素组成值偏负的特征^[39]。

在盐度一定的条件下,氧同位素值会随着温度的升高而降低。高温热液流体侵入使地层温度升高,氧同位素在高温条件下发生热分馏导致¹⁸O含量急剧减少。有多项研究表明,热液流体成因碳酸盐矿物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般小于-10‰^[12]。同时,深部的富含¹³C的热卤水注入的影响会使得碳同位素的组成

值偏正,而温度和酸碱度等对碳同位素组成的影响不大。如图3所示,渤海海域碳酸盐岩储层中不同方解石的氧同位素组成差异明显^[16],受热液流体活动影响的方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显小于 -10‰ 。

由于大气淡水和成岩流体作用容易影响到氧同位素组成,因此在识别热液流体活动时,通常将其与碳同位素或流体包裹体均一温度相结合,以确保分析的准确性^[40]。

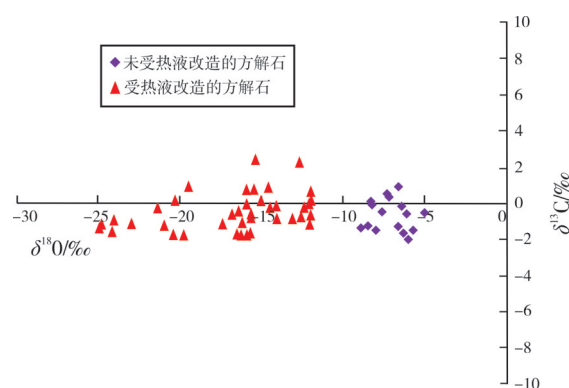


图3 渤海海域碳酸盐岩储层中方解石的碳氧同位素组成特征(据文献[16])

Fig. 3 Carbon and oxygen isotope composition of calcite in carbonate reservoir in Bohai Sea area(cited from reference [16])

1.2.2 流体包裹体均一温度异常

流体包裹体长期以来被认为是原始流体的可靠记录^[37,41]。热液流体入侵会使地层温度明显增高,产生明显的热异常,从而被包裹体所记录,表现出较高的均一温度^[4,42]。

将流体包裹体均一温度和埋藏史相结合是识别热液的重要方法^[43]。将所测得的流体包裹体的均一温度与模拟出的最大埋藏温度作对比,若包裹体均一温度大都高于地层最大埋藏温度,则表明地层受到了热液流体活动的影响^[11]。莺歌海盆地流体包裹体均一温度分布特征(图4)^[30]显示:在热液流体活动的影响下,流体包裹体均一温度随埋深逐渐升高,最终大于地层最高温度(图4b),显示出异常高的均一温度并被记录下来。

1.2.3 镜质组反射率突变异常

镜质组反射率(R_o)一般随深度增大呈现规律性增加^[1]。热液流体的异常高温促进了有机质成熟,使镜质组反射率的斜率显示明显的突变^[37]。

热液流体活动影响地区的 R_o 分布大致可分为2类,即座椅型和反“S”型(图5):座椅型的 R_o 值,

在某个深度会出现明显的跃变,之后随着深度的增加 R_o 接近垂直变化;反“S”型的 R_o 值在拐点上下具有明显不同的变化斜率,下部斜率明显比上部斜率更缓^[36]。

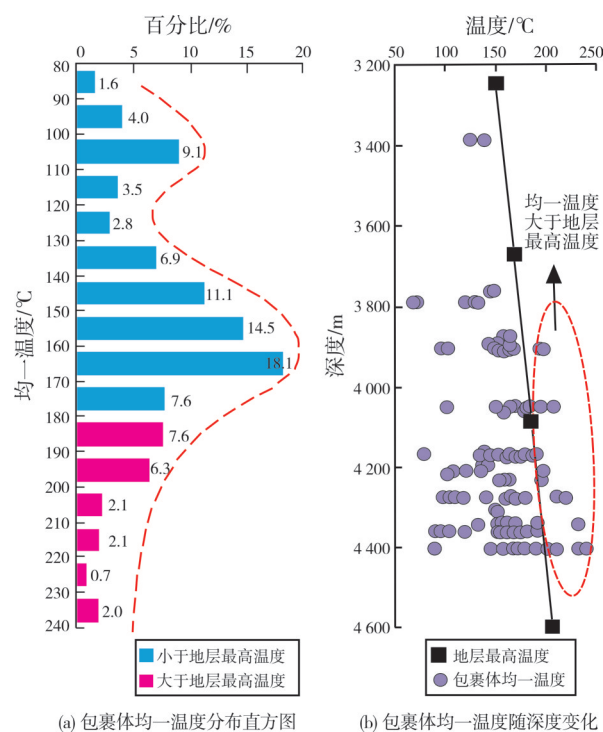


图4 莺歌海盆地 LDX 区黄流组流体包裹体均一温度分布特征(据文献[30])

Fig. 4 Homogeneous temperature distribution of fluid inclusions of Huangliu Formation in LDX block, Yinggehai Basin (cited from reference [30])

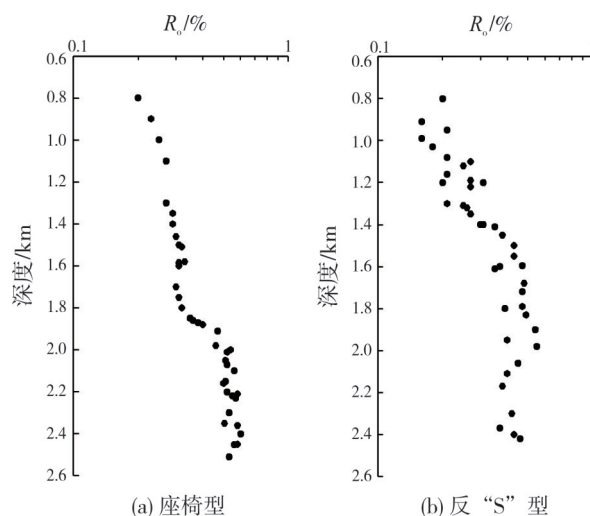


图5 莺歌海盆地底辟区 R_o 值变化样式(据文献[36])

Fig. 5 R_o variation pattern in the diapiric belt of Yinggehai Basin (cited from reference [36])

座椅型和反“S”型这两种样式一方面反映热液流体活动影响的深度和程度,另一方面拐点附近的变化样式还可能指示沉积地层对热液流体的输导和封闭能力,其中座椅型地层的封闭能力强于反“S”型。

1.3 地球化学元素含量异常法

热液流体会携带地表罕有的化学物质沿裂缝从深部向浅部运移并与围岩发生化学反应,从而导致一些化学元素含量出现异常^[11,44]。将这种由热液流体活动引起的化学反应导致的元素含量异常变化的识别方法统称为地球化学元素含量异常法。地球化学元素含量异常法主要包括:地层水矿化度异常、Fe和Mn含量异常、稀土元素含量异常等方法。

1.3.1 地层水矿化度异常

高矿化度的地层水的形成经常被认为与富CO₂热液流体作用密切相关^[11]。这些异常高矿化度地层水的形成主要是由于受到深部上涌的高矿化度热卤水的影响^[45]。在断裂以及热液流体活跃期,这些高矿化度热卤水会沿深大断裂进入到储层之中并与围岩发生反应,显示出异常高的地层水矿化度值,并被作为热液流体活动的标志记录下来。歧口凹陷在热液流体活动的影响下,显示出地层水矿化度异常高的特点^[11](图6)。

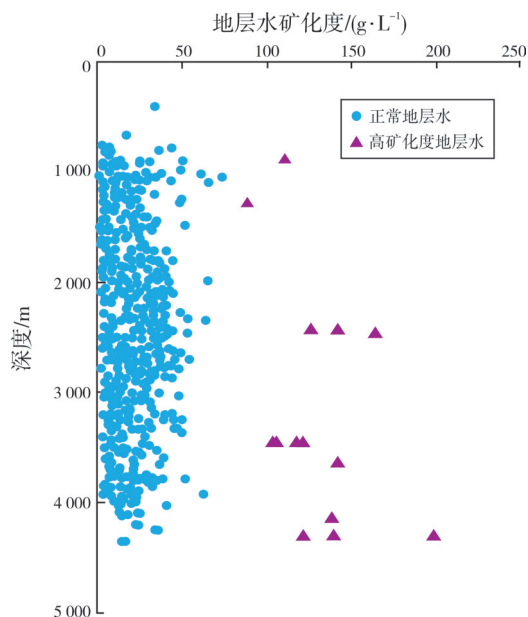


图6 地层水矿化度对热液流体活动的响应(据文献[11])

Fig. 6 Response of formation water mineralization to hydrothermal fluid activity (cited from reference [11])

1.3.2 Fe和Mn含量异常

热液流体在运移过程中会与围岩发生一系列的物理和化学反应,导致岩石中Fe和Mn元素的富集^[11,38,45],因此碳酸盐岩中Fe和Mn元素的增加常作为判别热液输入的指示^[5]。(Fe+Mn)/Ti值、Al/(Al+Fe+Mn)值常用于评价热液流体对沉积物的影响^[46-47],典型热液流体沉积物的这两个比值一般分布于0.4~15,这常作为评价各种沉积物中热液流体影响程度的重要指标^[8]。

1.3.3 稀土元素含量异常

稀土元素具有记载成岩流体和成岩环境的地球化学性质,是了解成岩流体的重要窗口^[48-49]。高温热液容易从地下超镁铁/镁铁岩中淋滤出Eu²⁺,使得在不同构造背景下的热液流体稀土元素配分模式通常具有显著的正Eu异常^[50]。同时由于Eu在不同的氧化还原条件下具有不同的化学行为,而且Eu²⁺的稳定存在需要流体温度超过250℃,故Eu²⁺常在热液流体中富集^[9]。因此在高温环境下,热液流体与岩石发生水-岩作用导致稀土元素出现显著的Eu正异常。

四川盆地盘龙洞三叠系飞仙关组局部受热液改造的鲕粒白云岩显现出明显的Eu正异常的特征(图7a)。另外,塔里木盆地下古生界白云岩同样表现出类似的热液改造特征(图7b),与热液接触的白云石边部正Eu异常明显,核部由于改造较弱保持了正常海水来源的特征。

2 热液活动对油气成藏的意义

多项研究表明,热液流体活动参与到沉积盆地中油气成藏的全过程,对油气储层和盖层的形成、改造与油气生成、运聚都会产生重要影响^[51]。

2.1 深部热液流体加速烃源岩生烃演化

根据前人研究,优质烃源岩的形成和演化常常与热液流体活动的影响有关。热液流体活动携带高热,能够提高地层温度。由阿仑尼乌斯公式可知,温度与生烃反应速度呈指数关系^[52],因此温度增加,可以提高烃源岩热演化进程^[12]。尽管大部分情况下热液流体运移有利于油气的生成和演化,但过高的温度和压力也会对油气的聚集与保存产生不利的影响^[14]。

深部富含C、H组分的深部热液流体可以为烃源岩提供外源氢,能有效促进高演化烃源岩生烃,提高生烃量^[34]。有机质生烃不仅需要热能,也是一个“去

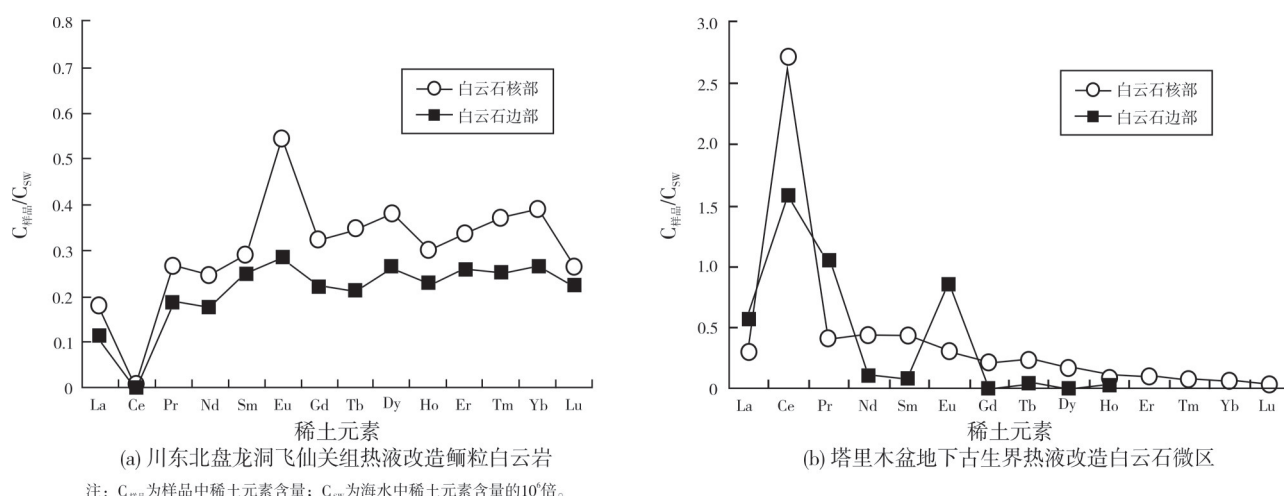


图7 热液作用白云岩稀土元素配分特征(据参考文献[48])

Fig. 7 Rare earth element distribution characteristics of dolomite modified by hydrothermal solution (cited from reference [48])

氧、加氢和聚碳”的过程,注入的深部富 H^+ 热液流体直接以物质形式参与生烃过程,增加烃的产率^[51]。

另外,深部热液流体携带许多金属微量元素,如 Fe、Mn、Zn、Cu 等元素,随着深部热液流体上涌沿裂缝进入地层,这些微量元素在有机质生烃过程中起到催化剂的作用,能够促进地层中的有机碳与氢结合生成更多的烃,增加烃的产率^[53]。

综上所述,深部热液流体主要通过提供烃源岩生烃演化所需要的热能、外源氢和催化剂等方式,对有机质的生烃产生十分积极的影响。

2.2 深部热液流体对储层发育的影响

深部热液流体对油气储层的影响具有两面性,主要包括溶蚀、白云石化等作用的建设和热液流体充填的破坏性^[4,26]。

2.2.1 热液流体对储层发育的建设性

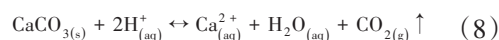
热液活动对储层会发生多种建设性的改造作用,主要包括碳酸盐岩的溶蚀作用、萤石化作用、白云石化作用及围岩热破裂作用^[34]。

(1) 溶蚀作用

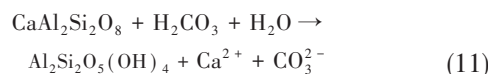
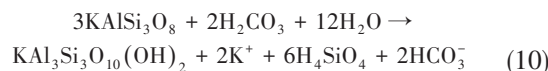
前人研究表明,与碎屑岩储层相比,碳酸盐岩储层更容易受到溶蚀作用的影响^[4]。溶蚀作用主要包括热液溶蚀作用和热液流体活动造成的有机酸溶蚀作用。

热液溶蚀作用主要是指富 CO_2 酸性热液流体通过深大断裂垂直运移对储层进行溶蚀,形成溶蚀孔洞(图 8a),改善储层的储集物性^[54]。具体来说,当热液流体沿孔隙、裂缝进入碳酸盐岩储层时,会携

带大量的 CO_2 、 H_2S 等酸性物质,在储层岩石内部发生一系列溶蚀反应,如反应式(8)、(9)所示:



溶蚀作用改善了碳酸盐岩储层品质,形成新的油气聚集空间^[26,38]。当热液流体沿孔隙、裂缝进入碎屑岩储层时,会引起长石类矿物的溶解,进而形成次生孔隙^[34],如反应式(10)、(11)所示:



有机酸溶蚀作用则是由于高温热液流体入侵使围岩温度不断升高,促进有机质成熟,并由于脱羧作用,会在成熟早期形成和释放出大量的有机酸和 CO_2 ,有机酸继续溶蚀储层产生大量的次生溶蚀孔隙(图 8b)^[1]。同时在热液流体异常的高温 and 高压共同作用下, CO_2 的溶解度变大形成酸性的流体环境,其对碳酸盐岩储层的溶解能力也就相应增强,溶蚀作用会更加显著,从而改善了储层物性。

(2) 萤石化作用

萤石化作用主要是深部酸性热液流体中的 HF 与地层中的方解石(CaCO_3)发生交代,生成萤石(CaF_2)的过程(反应式(1))。研究表明,萤石化作用的过程中,晶粒体积减小了 33.5%,从而能够形成额外孔隙,为热液流体流动提供了空间,最终使储层物性得到进一步改善^[26]。

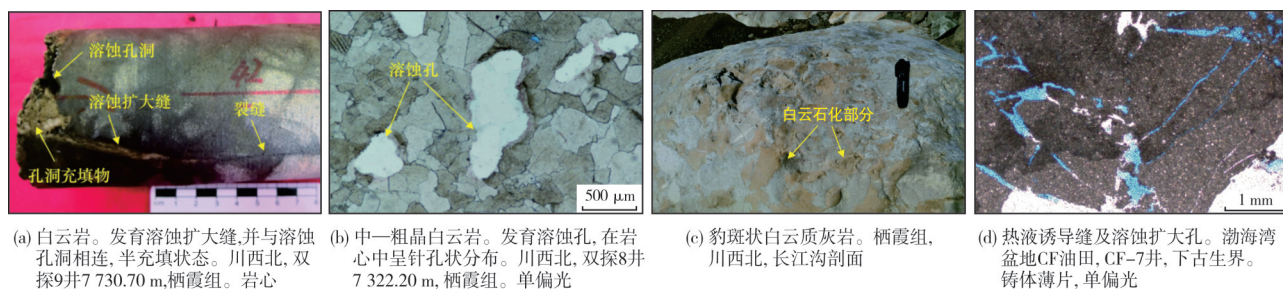


图8 热液对储层的建设性影响特征(据文献[23,55])

Fig. 8 Characteristics of the constructive effect of hydrothermal fluids on reservoir (cited from reference [23,55])

(3)白云石化作用

石灰岩白云石化作用(图8c)的实质是 MgCO_3 取代 CaCO_3 的过程。有研究表明,方解石转化成相同量的白云石,会导致孔隙体积增加13%^[23]。石灰岩白云石化后,白云石菱面体起到支撑格架的作用,可以缓解压实造成的空间减小,对孔隙度的保持有积极作用。

(4)围岩热破裂作用

在高温高压热液流体侵入的作用下,围岩会发生脆性破裂,产生一系列的诱导缝(图8d),连接孤立的裂缝和孔隙,从而形成复杂的裂缝体系,改善

了储层储集空间的连通性^[23]。

渤海湾盆地东营凹陷民丰—盐家地区沙四段深层砂砾岩的孔隙度-渗透率交会图(图9a)显示^[24],渗透率与孔隙度的相关关系可分为两支。其中,低孔隙度、较高渗透率的样品,主要集中于受深部热液流体侵位的地层。由于热液流体活动引发围岩热破裂作用,镜下观察发现砂砾岩内微裂缝发育(图9b)^[24]。另外,对渤海湾盆地CF油田下古生界碳酸盐岩储层岩心实测孔隙度与渗透率的关系(图9c)进行分析,发现热液流体的溶蚀作用导致碳酸盐岩溶蚀孔隙发育,从而改善了储层性能^[23]。

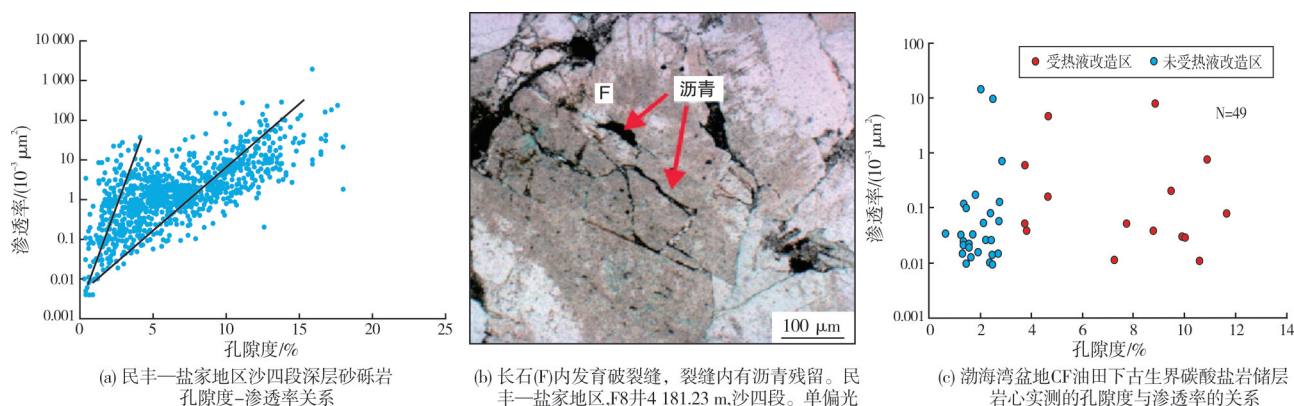


图9 热液流体对储层物性的影响(据文献[23-24])

Fig. 9 Effect of hydrothermal fluids on reservoir properties (cited from references [23-24])

热液流体入侵的影响范围主要与侵入体作用对象及其就位时的温度有关。于志超等^[37]对歧口凹陷古近纪热液流体活动的研究表明(图10):随着热液流体侵入距离的增加,储层物性逐渐变差,即热液流体侵入对储层物性起到了改善的作用,但随着距离的增加,这种改善作用逐渐减弱。歧口凹陷塘20井热液侵入体厚约10 m,对砂岩储层上下的影响范围约为52 m,相当于自身厚度的5倍左右^[37]。

2.2.2 热液流体对储层发育的破坏性

热液流体对储层的破坏作用主要是充填作用。一方面,由于温压条件的改变,深部热液流体在流动性减弱时,会在断层裂缝系统内沉淀形成特征矿物,充填早期形成的裂缝和溶蚀孔洞,使得储集空间减小。充填矿物主要包括铁白云石、石英、萤石等^[55]。另一方面,溶蚀过程中产生的孔隙虽然改善了储层的质量,但是溶蚀产物 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 会被热液流

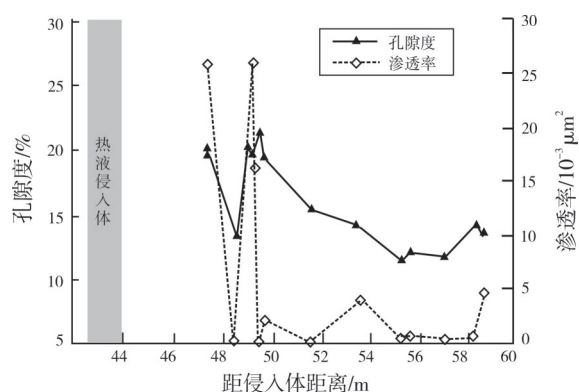


图10 岐口凹陷塘20井热液侵入体对储层影响范围的对比(据文献[37]修改)

Fig. 10 Comparison of the influence range of hydrothermal intrusion on reservoirs of Well Tang-20 in Qikou Depression (cited from reference [37], modified)

体携带到上覆地层或周边区域,以沉淀的形式充填储集空间^[1],使其他地层的储集性能减弱。

在四川盆地中西部地区,热液流体侵入茅口组白云岩地层注入了新的 Mg^{2+} 和 CO_3^{2-} ,因此粉—细晶白云岩经热液作用重结晶后形成细—中晶白云岩,白云岩的基质孔隙度会减小。对取自发育白云岩的茅口组露头 and 泰来6井的63件样品的物性统计(图11)^[14]表明:丰都放牛坝剖面粉—细晶白云岩的面孔率平均值为3.5%,细—中晶白云岩的面孔率平均值为1.6%;泰来6井粉—细晶白云岩的面孔率平均值为4.3%,细—中晶白云岩的面孔率平均值为1.2%。这说明热液流体对该套储层的发育具有破坏性。

综上所述,深部热液流体活动对储层形成和发育的影响具有两面性,主要是溶蚀作用对储层的建设性和充填作用对储层的破坏性,但整体上以建设性为主。热液流体活动在储层内的多种建设性的改造作用,极大地改善了储集性能,有利于形成良好的油气储集空间。

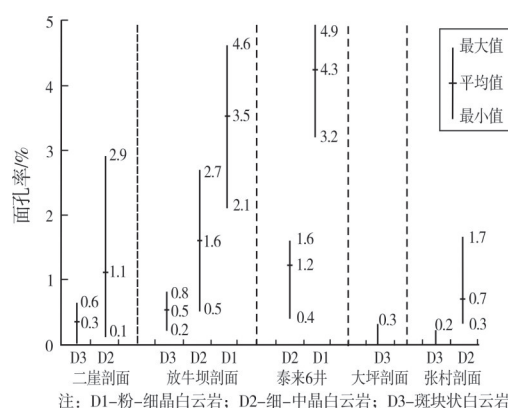


图11 四川盆地中西部茅口组不同类型白云岩面孔率统计(据文献[14])

Fig. 11 Porosity statistics of different types of dolomite of Maokou Formation in the central and western Sichuan Basin (cited from reference[14])

2.3 深部热液流体增强盖层封闭性

深部酸性热液流体在沿深大断裂向上运移的过程中,会溶蚀储层,并携带溶蚀物质在上覆盖层微裂缝中沉淀形成方解石、石英等矿物,使微裂缝得以愈合,从而提高了泥岩的封盖性能^[7]。同时深部热液流体也可以熔融地壳岩石形成致密的火山岩并作为局部盖层,使油气聚集成藏。火山岩的致密坚硬程度远超过泥岩盖层,能够封盖住向上运移的油气,形成油气聚集^[51]。

表1是对辽河拗陷大平房—驾掌寺地区古近系一新近系泥岩、未蚀变玄武岩、蚀变玄武岩盖层性能的分析结果。从表中可以看出,未蚀变玄武岩盖层的突破压力极大,远远超过泥岩盖层的突破压力,属于极好的盖层。而蚀变后,盖层质量明显下降,但和深度相近的泥岩相比较,仍具有较好的封盖能力,这充分说明了该区火山岩的存在对油气起着良好的封盖作用^[56]。

表1 辽河拗陷大平房—驾掌寺地区古近系一新近系盖层参数(据文献[56])

Table 1 Parameters of Paleogene-Neogene caprock in the Dapingfang-Jiazhangsi area of Liaohe Depression (cited from reference [56])

井号	深度/m	岩性	突破压力/MPa	中值半径/nm	封盖高度/m	遮盖系数/%
荣80	1 412.26	未蚀变玄武岩	>250	<0.30	>5 000	>99
荣80	1 417.70	蚀变玄武岩	0.21	26.54	20	41
大26	1 182.49	泥岩	0.18	41.65	18	35

2.4 深部热液流体促进油气运移

深部高温高压热液流体在运移过程中处于超临界状态,能够萃取周围地层中的分散有机质^[15],

并携带其沿深大断裂向上运移^[51]。同时,热液流体有较高的温度和压力并富含 CO_2 等组分,可以通过降低原油黏度和减小油水界面张力来减小油气运移的阻力。金之钧等^[2]研究认为,热液成因的

方解石脉中油气包裹体的存在,以及气相成分中有机的 CH_4 和 C_2H_6 与 CO_2 共存的特点(表2),表明

热液流体在自下而上活动过程中携带了一部分油气至浅部地层。

表2 塔里木盆地奥陶系方解石脉中流体包裹体气体组成(据文献[2])

Table 2 Gas composition of fluid inclusion in calcite vein of Ordovician in Tarim Basin (cited from reference[2])

井号	深度/m	层位	气体组成/%					
			H_2O	N_2	Ar	CO_2	CH_4	C_2H_6
T737	5 806.35	O_{2y}	92.29	0.35	0.06	4.71	1.62	0.76
T740	6 162.64	O_{2y}	80.12	0.90	0.15	8.89	8.33	1.61
TZ12	5 216.51	O_1	81.83	2.62	0.81	6.59	5.99	2.15
中3	3 837.87	O_{1y}	96.73	0.27	0.04	2.70	0.18	0.08
中16	4 755.65	O_1	77.04	0.92	0.27	20.15	1.46	0.16

注: O_{2y} —一间房组; O_{1y} —鹰山组。

3 热液流体活动研究展望

综上所述,沉积盆地深层、超深层高温高压热液流体活动可改变地层的岩石结构和矿物组成,并可引起地层中的诸多地球化学元素含量以及地层温度和压力的异常,同时对油气的生成、运移以及储层、盖层的形成和发育产生重要影响。近些年来,随着勘探目标不断向深层、超深层的拓展,逐渐发现热液流体活动对深层油气藏的形成也可产生重要影响^[11,14]。这些异常和影响被记录下来作为识别热液流体活动的标志和方法。而在实际研究当中,以上热液流体的识别方法往往具有多解性,同时又涉及到储层地质学、石油地质学、构造地质学、地球化学、测井地质学、地球物理学等多种学科,这给该方面的研究提出了较大的挑战。因此,认为未来热液流体活动研究需要注意以下2个方面:

(1)注重多方法和多学科的综合应用。鉴于热液流体活动的复杂性、识别方法的多解性和相关研究涉及的多学科性,应综合应用岩心、露头、测井、地震、分析测试等多种资料,在多学科交叉研究的基础上应用多种方法进行综合识别,这样才能得到更为准确的结果和认识,从而为油气勘探提供指导。

(2)注重新技术的引入和应用。随着人工智能和大数据技术的快速发展,不断发展起来的油气勘探技术包括三维地震数据物理解释、断层与裂缝智能识别、激光扫描裂隙表面形态和人工神经网络数据处理等技术在热液流体研究中大有可为,可将这

些技术与不同的热液流体活动参数相结合,进行综合的识别与研究。

4 结 论

(1)在沉积盆地热液流体活动过程中,热液流体与其接触的岩石发生了复杂的流体-岩石反应,可引起地层的岩石结构和矿物组成发生明显变化,以及地球化学元素含量、地层温度和地层压力出现明显异常。据此建立的对热液流体活动进行识别的方法较多,可将其归纳为3类:岩石矿物学特征组合法、温感参数异常法、地球化学元素含量异常法。

(2)热液流体活动对油气成藏的影响主要为:深部热液流体通过提供烃源岩成熟演化所需要的热能、外源氢和催化剂等方式为烃类物质的形成创造了良好的条件;热液流体对油气储层的影响既有建设性又有破坏性,但以热液溶蚀的建设性为主;深部热液流体可以增强盖层封闭性;热液流体活动可促进烃源岩生烃、形成烃源岩内外浓度差,生烃增压可促进油气的初次运移,热液流体的溶蚀作用可改善储层物性,促进油气的二次运移。总的来看,热液流体活动对于油气成藏的各个阶段,都具有非常积极的影响。

(3)鉴于热液流体活动的复杂性、识别方法的多解性和相关研究涉及的多学科性等特点,未来应综合应用岩心、测井、地震、分析测试等多种资料,在多学科交叉研究的基础上,应用多种已有方法和开发的新技术进行综合识别和研究,以获得更为准确的结果和认识,从而为油气勘探提供指导。

参考文献

- [1] LIU Yan, JIN Siding, CAO Qian, et al. Tertiary hydrothermal activity and its effect on reservoir properties in the Xihu Depression, East China Sea[J]. *Petroleum science*, 2019, 16(1): 14–31.
- [2] 金之钧, 朱东亚, 孟庆强, 等. 塔里木盆地热液流体活动及其对油气运移的影响[J]. *岩石学报*, 2013, 29(3): 1048–1058.
- JIN Zhijun, ZHU Dongya, MENG Qingqiang, et al. Hydrothermal activities and influences on migration of oil and gas in Tarim Basin[J]. *Acta petrologica sinica*, 2013, 29(3): 1048–1058.
- [3] 陈代钊. 构造-热液白云岩化作用与白云岩储层[J]. *石油与天然气地质*, 2008, 29(5): 614–622.
- CHEN Daizhao. Structure-controlled hydrothermal dolomitization and hydrothermal dolomite reservoirs[J]. *Oil & gas geology*, 2008, 29(5): 614–622.
- [4] 王清斌, 刘立, 牛成民, 等. 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*, 2019, 44(8): 2751–2760.
- WANG Qingbin, LIU Li, NIU Chengmin, et al. 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*, 2019, 44(8): 2751–2760.
- [5] 金之钧, 朱东亚, 胡文瑄, 等. 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*, 2006, 80(2): 245–253.
- JIN Zhijun, ZHU Dongya, HU Wenxuan, et al. Geological and geochemical signatures of hydrothermal activity and their influence on carbonate reservoir beds in the Tarim Basin[J]. *Acta geologica sinica*, 2006, 80(2): 245–253.
- [6] 周吉羚, 李国蓉, 李辉, 等. 塔河油田南部奥陶系热液作用分析[J]. *东北石油大学学报*, 2015, 39(5): 41–51, 79.
- ZHOU Jiling, LI Guorong, LI Hui, et al. Analysis of the Ordovician hydrothermal effect in south of Tahe Oilfield[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2015, 39(5): 41–51, 79.
- [7] 刘全有, 朱东亚, 孟庆强, 等. 深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. *中国科学: 地球科学*, 2019, 49(3): 499–520.
- LIU Quanyou, ZHU Dongya, MENG Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. *Scientia sinica: terrae*, 2019, 49(3): 499–520.
- [8] HE Cong, JI Liming, WU Yuandong, et al. Characteristics of hydrothermal sedimentation process in the Yanchang Formation, south Ordos Basin, China: evidence from element geochemistry[J]. *Sedimentary geology*, 2016, 345: 33–41.
- [9] 侯中帅, 陈世悦, 刘惠民, 等. 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*, 2019, 48(5): 1090–1101.
- HOU Zhongshuai, CHEN Shiyue, LIU Huimin, et al. Hydrothermal fluid activity and its hydrocarbon geological significance in Dongying Depression[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(5): 1090–1101.
- [10] LIMA B E M, TEDESCHI L R, PESTILHO A L S, et al. Deep-burial hydrothermal alteration of the Pre-Salt carbonate reservoirs from northern Campos Basin, offshore Brazil: evidence from petrography, fluid inclusions, Sr, C and O isotopes[J]. *Marine and petroleum geology*, 2020, 113: 1–25.
- [11] 侯中帅, 周立宏, 金凤鸣, 等. 歧口凹陷热液流体活动及其对储集层的改造[J]. *地球科学*, 2021, 46(1): 200–214.
- HOU Zhongshuai, ZHOU Lihong, JIN Fengming, et al. Hydrothermal fluid activity and its reformation on reservoirs in Qikou Depression[J]. *Earth science*, 2021, 46(1): 200–214.
- [12] 张黎, 张新涛, 刘艺萌, 等. 渤海海域深部热流体存在的证据及其对油气成藏意义: 以秦皇岛 29-2/E 油气田为例[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(5): 633–644.
- ZHANG Li, ZHANG Xintao, LIU Yimeng, et al. Evidence of deep fluid and its influence on gas reservoiring in Bohai Sea: case study of QHD29-2/E Oilfield[J]. *Natural gas geoscience*, 2021, 32(5): 633–644.
- [13] 李红, 王良军, 柳益群, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液活动特征[J]. *古地理学报*, 2021, 23(1): 153–174.
- LI Hong, WANG Liangjun, LIU Yiqun, et al. Hydrothermal activities in the Middle Permian Maokou Formation in eastern Sichuan Basin[J]. *Journal of palaeogeography*, 2021, 23(1): 153–174.
- [14] 黎霆, 诸丹诚, 杨明磊, 等. 热液活动对四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩的影响[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 639–651.
- LI Ting, ZHU Dancheng, YANG Minglei, et al. Influence of hydrothermal activity on the Maokou Formation dolostone in the central and western Sichuan Basin[J]. *Oil & gas geology*, 2021, 42(3): 639–651.
- [15] 高波, 陶明信, 王万春. 深部热流体对油气成藏的影响[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2001, 20(1): 30–34.
- GAO Bo, TAO Mingxin, WANG Wanchun. Influences of deeply sourced thermal fluid on the formation of hydrocarbon reservoirs[J]. *Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry*, 2001, 20(1): 30–34.
- [16] 金小燕, 杜晓峰, 王清斌, 等. 渤海海域火山热流体及其对碳酸盐岩优质储层的控制作用[J]. *石油实验地质*, 2018, 40(6): 800–807.
- JIN Xiaoyan, DU Xiaofeng, WANG Qingbin, et al. Volcanic hydrothermal fluid activity and its influence on carbonate reservoirs in Bohai Sea area[J]. *Petroleum geology & experiment*, 2018, 40(6): 800–807.
- [17] 方维萱, 贾润幸, 郭玉乾, 等. 塔西地区富烃类还原性盆地流体与砂砾岩型铜铅锌-铀矿床成矿机制[J]. *地球科学与环境学报*, 2016, 38(6): 727–752.
- FANG Weixuan, JIA Runxing, GUO Yuqian, et al. Hydrocarbon-rich basin fluid with reductibility and metallogenic mechanism for glutenite-type Cu-Pb-Zn-U deposits in the western of Tarim Basin[J]. *Journal of earth sciences and environment*, 2016, 38(6): 727–752.
- [18] 张月霞, 胡文瑄, 姚素平, 等. 苏北盆地黄桥地区富 CO₂ 流体对二叠系龙潭组砂岩储层的改造与意义[J]. *地质通报*, 2018, 37(10): 1944–1955.
- ZHANG Yuexia, HU Wenxuan, YAO Suping, et al. The interaction of CO₂-rich fluid with sandstone and its significance

- for sandstone reservoirs of Permian Longtan Formation in Huangqiao area, Subei Basin[J]. Geological bulletin of China, 2018, 37(10): 1944–1955.
- [19] 宁超众, 李勇, 邓晓娟, 等. 哈拉哈塘地区热液岩溶形成演化与油气分布[J]. 新疆石油地质, 2021, 42(4): 399–409.
- NING Chaozhong, LI Yong, DENG Xiaojuan, et al. Formation and evolution of hydrothermal karst and hydrocarbon distribution in Halahatang area [J]. Xinjiang petroleum geology, 2021, 42(4): 399–409.
- [20] 袁静, 周涛, 乔俊, 等. 深层砂砾岩中的深部热流体作用及其地质意义: 以渤海湾盆地东营凹陷民丰—盐家地区古近系沙河街组四段为例[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(4): 929–942.
- YUAN Jing, ZHOU Tao, QIAO Jun, et al. Deep hydrothermalism of deep coarse-grained siliciclastic rocks and its geological significance: a case study of the 4th member of the Paleogene Shahejie Formation in Minfeng–Yanjia area, Dongying Sag, Bohai Bay Basin [J]. Oil & gas geology, 2022, 43(4): 929–942.
- [21] 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 塔里木盆地热液特点及其对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 天然气工业, 2016, 36(3): 14–21.
- LIU Wei, HUANG Qingyu, WANG Kun, et al. Characteristics of hydrothermal activity in the Tarim Basin and its reworking effect on carbonate reservoirs[J]. Natural gas industry, 2016, 36(3): 14–21.
- [22] 李继岩, 王永诗, 刘传虎, 等. 热液流体活动及其对碳酸盐岩储集层改造定量评价: 以渤海湾盆地东营凹陷西部下古生界为例[J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 359–366.
- LI Jiyan, WANG Yongshi, LIU Chuanhu, et al. Hydrothermal fluid activity and the quantitative evaluation of its impact on carbonate reservoirs: a case study of the Lower Paleozoic in the west of Dongying Sag, Bohai Bay Basin, East China[J]. Petroleum exploration and development, 2016, 43(3): 359–366.
- [23] ZHU Dongya, LIU Quanyou, JIN Zhijun, et al. Effects of deep fluids on hydrocarbon generation and accumulation in Chinese petroliferous basins [J]. Acta geologica sinica(English edition), 2017, 91(1): 301–319.
- [24] 李辉. 塔河油田南部奥陶系热液地质作用及其储集意义[D]. 成都: 成都理工大学, 2015.
- LI Hui. A research of the Ordovician hydrothermal geological processes and its reservoir significance in south of Tahe Oilfield[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2015.
- [25] THOMAS J, PANDIAN M S, THOMAS T, et al. Hydrothermal activity in the basement granite associated with the unconformity-related uranium deposit in Chitral area, Cuddapah Basin, India [J]. Journal of earth system science, 2021, 130(2): 1–22.
- [26] 郭颖, 杨波, 韩自军, 等. 深层碎屑岩自生矿物成因机理及其对储层物性的影响: 以渤海湾盆地南断阶带侏罗系为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 973–990.
- GUO Ying, YANG Bo, HAN Zijun, et al. Genesis mechanism of authigenic minerals in deep clastic rocks and its influence on reservoir physical property: an example from the Jurassic in Qinan fault step belt, Bohai Sea, China[J]. Journal of Jilin University (earth science edition), 2021, 51(4): 973–990.
- [27] 金小燕, 刘晓健, 郝铁伟, 等. CF油田火山热液流体活动及其对碳酸盐岩储层的改造作用[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(1): 42–50.
- JIN Xiaoyan, LIU Xiaojian, HAO Yiwei, et al. Reformation of the volcanic hydrothermal fluid activities to the carbonate reservoir in CF Oilfield [J]. Petroleum geology & oilfield development in Daqing, 2019, 38(1): 42–50.
- [28] 胡文瑄. 盆地深部流体主要来源及判别标志研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 817–826.
- HU Wenxuan. Origin and indicators of deep-seated fluids in sedimentary basins [J]. Bulletin of mineralogy, petrology and geochemistry, 2016, 35(5): 817–826.
- [29] DMITRIYEVSKIY A N, 谭和平, 卢共平. 越南南部大陆架基岩中油气储集层的热液成因[J]. 国外油气勘探, 1995, 7(6): 672–675.
- DMITRIYEVSKIY A N, TAN Heping, LU Gongping. Hydrothermal origin of oil and gas reservoirs in the bedrock of the continental shelf in southern Vietnam [J]. Oil & gas prospecting abroad, 1995, 7(6): 672–675.
- [30] 曹江骏, 罗静兰, 范彩伟, 等. 深部热流体活动对储层成岩作用及孔隙演化的影响: 以莺歌海盆地 LDX 区中新统黄流组为例[J]. 地学前缘, 2022, 29(4): 412–429.
- CAO Jiangjun, LUO Jinglan, FAN Caiwei, et al. Deep thermal fluid activity and its influence on the diagenesis and pore evolution of reservoirs: a case study from the Miocene Huangliu Formation reservoir in the LDX area, Yinggehai Basin, northern South China Sea [J]. Earth science frontiers, 2022, 29(4): 412–429.
- [31] 黄可可, 黄思静, 佟宏鹏, 等. 长石溶解过程的热力学计算及其在碎屑岩储层研究中的意义[J]. 地质通报, 2009, 28(4): 474–482.
- HUANG Keke, HUANG Sijing, TONG Hongpeng, et al. Thermodynamic calculation of feldspar dissolution and the significance on research of clastic reservoir [J]. Geological bulletin of China, 2009, 28(4): 474–482.
- [32] 孟凡晋, 肖丽华, 谢玉洪, 等. 莺歌海盆地黏土矿物异常转化及其地质意义[J]. 沉积学报, 2012, 30(3): 469–476.
- MENG Fanjin, XIAO Lihua, XIE Yuhong, et al. Abnormal transformation of the clay minerals in Yinggehai Basin and its significances [J]. Acta sedimentologica sinica, 2012, 30(3): 469–476.
- [33] SHU Yong, SANG Shuxun, LIN Yuxiang, et al. The influence of magmatic–hydrothermal activities on porosity and permeability of sandstone reservoirs in the Linxing area, Ordos Basin, Northern China [J]. Journal of Asian earth sciences, 2021, 213: 1–16.
- [34] 于志超. 歧口凹陷古近纪热流体活动及其对碎屑岩储层的影响[D]. 长春: 吉林大学, 2010: 69–70.
- YU Zhichao. The Paleogene thermal fluid activities and their impact on clastic reservoir in Qikou Sag [D]. Changchun: Jilin University, 2010: 69–70.
- [35] 孟元林, 魏巍, 王维安, 等. 超压背景下黏土矿物转化的优化模型[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊1): 145–153.
- MENG Yuanlin, WEI Wei, WANG Weian, et al. An optimiza-

- tion model of clay mineral transformation under overpressure setting[J]. *Journal of Jilin University (earth science edition)*, 2012, 42(S1): 145–153.
- [36] 解习农, 李思田, 董伟良, 等. 热流体活动示踪标志及其地质意义: 以莺歌海盆地为例[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 1999, 24(2): 183–188.
- XIE Xinong, LI Sitian, DONG Weiliang, et al. Trace marker of hot fluid flow and their geological implications: a case study of Yinggehai Basin[J]. *Earth science(Journal of China University of Geosciences)*, 1999, 24(2): 183–188.
- [37] 于志超, 刘立, 孙晓明, 等. 歧口凹陷古近纪热流体活动的证据及其对储层物性的影响[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2012, 42(增刊3): 1–13.
- YU Zhichao, LIU Li, SUN Xiaoming, et al. Evidence of Paleogene thermal fluid activities and their impact on porosity permeability of reservoir in Qikou Sag[J]. *Journal of Jilin University (earth science edition)*, 2012, 42(S3): 1–13.
- [38] ZHANG Hao, CHEN Gang, ZHU Yushuang, et al. Discovery of rare hydrothermal alterations of Oligocene dolomite reservoirs in the Yingxi area, Qaidam, West China[J]. *Carbonates and evaporites*, 2018, 33(3): 447–463.
- [39] 袁剑英, 黄成刚, 曹正林, 等. 威化湖盆白云岩碳氧同位素特征及古环境意义: 以柴西地区始新统下干柴沟组为例[J]. *地球化学*, 2015, 44(3): 254–266.
- YUAN Jianying, HUANG Chenggang, CAO Zhenglin, et al. Carbon and oxygen isotopic composition of saline lacustrine dolomite and its palaeoenvironmental significance: a case study of Lower Eocene Ganchaigou Formation in western Qaidam Basin[J]. *Geochimica*, 2015, 44(3): 254–266.
- [40] 张春宇, 管树巍, 吴林, 等. 塔西北地区下寒武统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义: 以舒探1井为例[J]. *地质科技通报*, 2021, 40(5): 99–111.
- ZHANG Chunyu, GUAN Shuwei, WU Lin, et al. Geochemical characteristics and its paleo-environmental significance of the Lower Cambrian carbonate in the northwestern Tarim Basin: a case study of Well Shutan-1[J]. *Bulletin of geological science and technology*, 2021, 40(5): 99–111.
- [41] SHU Xiaochao, LIU Yan. Fluid inclusion constraints on the hydrothermal evolution of the Dalucao carbonatite-related REE deposit, Sichuan Province, China[J]. *Ore geology reviews*, 2019, 107: 41–57.
- [42] 刘子豪, 朱东亚, 吴胜和, 等. 中国南方地区奥陶系热液-岩溶改造型白云岩储层发育机理: 以黔中地区下奥陶统为例[J]. *海相油气地质*, 2017, 22(2): 51–58.
- LIU Zihao, ZHU Dongya, WU Shenghe, et al. Developmental mechanism of Ordovician dolostone reservoir altered by hydrothermal karstification in southern China: an example from Qianzhong Uplift, Guizhou Province[J]. *Marine origin petroleum geology*, 2017, 22(2): 51–58.
- [43] 张涛, 林娟华, 韩月卿, 等. 四川盆地东部中二叠统茅口组热液白云岩发育模式及对储层的改造[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(1): 132–143, 200.
- ZHANG Tao, LIN Juanhua, HAN Yueqing, et al. Pattern of hydrothermal dolomitization in the Middle Permian Maokou Formation, eastern Sichuan Basin, and its alteration on reservoirs herein[J]. *Oil & gas geology*, 2020, 41(1): 132–143, 200.
- [44] 黄思静, 兰叶芳, 黄可可, 等. 四川盆地西部中二叠统栖霞组晶洞充填物特征与热液活动记录[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 687–698.
- HUANG Sijing, LAN Yefang, HUANG Keke, et al. Vug fillings and records of hydrothermal activity in the Middle Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin[J]. *Acta petrologica sinica*, 2014, 30(3): 687–698.
- [45] 龙华山, 向才富, 牛嘉玉, 等. 歧口凹陷滨海断裂带热流体活动及其对油气成藏的影响[J]. *石油学报*, 2014, 35(4): 673–684.
- LONG Huashan, XIANG Caifu, NIU Jiayu, et al. Hydrothermal fluid flow and its influence on the hydrocarbon migration and accumulation along Binhai fault in Qikou Sag, Bohai Bay Basin[J]. *Acta petrolei sinica*, 2014, 35(4): 673–684.
- [46] 杨宗玉, 罗平, 刘波, 等. 早寒武世早期热液沉积特征: 以塔里木盆地西北缘玉尔吐斯组底部硅质岩系为例[J]. *地球科学*, 2019, 44(11): 3845–3870.
- YANG Zongyu, LUO Ping, LIU Bo, et al. Depositional characteristics of early Cambrian hydrothermal fluid: a case study of siliceous rocks from Yurtus Formation in Aksu area of Tarim Basin, northwest China[J]. *Earth science*, 2019, 44(11): 3845–3870.
- [47] YOU J, LIU Y, ZHOU D, et al. Activity of hydrothermal fluid at the bottom of a lake and its influence on the development of high-quality source rocks: Triassic Yanchang Formation, southern Ordos Basin, China[J]. *Australian journal of earth sciences*, 2020, 67(1): 115–128.
- [48] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(6): 810–818.
- HU Wenxuan, CHEN Qi, WANG Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs[J]. *Oil & gas geology*, 2010, 31(6): 810–818.
- [49] 蒋裕强, 谷一凡, 刘均, 等. 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*, 2018, 36(1): 1–11.
- JIANG Yuqiang, GU Yifan, LIU Jun, et al. The evidence of hydrothermal activity and its significance of Permian-Triassic strata, eastern Longgang area, northeastern Sichuan Basin[J]. *Acta sedimentologica sinica*, 2018, 36(1): 1–11.
- [50] 王文之, 肖文瑶, 和源, 等. 四川盆地震旦系陡山沱组烃源岩地球化学特征与有机质富集机制[J]. *高校地质学报*, 2019, 25(6): 860–870.
- WANG Wenzhi, XIAO Wenyao, HE Yuan, et al. Geochemical characteristics of the Sinian Doushantuo Formation source rocks of the Sichuan Basin: implications for the organic matter accumulation[J]. *Geological journal of China universities*, 2019, 25(6): 860–870.
- [51] 刘国勇, 张刘平, 金之钧. 深部流体活动对油气运移影响初探[J]. *石油实验地质*, 2005, 27(3): 269–275.
- LIU Guoyong, ZHANG Liuping, JIN Zhiyun. Primary study on the effects of deep-sourced fluid's movement on hydrocarbon migration[J]. *Petroleum geology & experiment*, 2005, 27(3):

- 269–275.
- [52] 张旗, 金维浚, 王金荣, 等. 岩浆热场对油气成藏的影响[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1525–1541.
- ZHANG Qi, JIN Weijun, WANG Jinrong, et al. Relationship between magma–thermal field and hydrocarbon accumulation [J]. Progress in geophysics, 2016, 31(4): 1525–1541.
- [53] 郭占谦, 杨兴科. 中国含油气盆地的多种生烃机制[J]. 石油与天然气地质, 2000, 21(1): 50–52.
- GUO Zhanqian, YANG Xingke. Multi-mechanism of hydrocarbon generation of China's petroliferous basins [J]. Oil & gas geology, 2000, 21(1): 50–52.
- [54] LAI Jin, LIU Shichen, XIN Yi, et al. Geological–petrophysical insights in the deep Cambrian dolostone reservoirs in Tarim Basin, China [J]. AAPG bulletin, 2021, 105(11): 2263–2296.
- [55] 刘文栋, 钟大康, 尹宏, 等. 川西北栖霞组超深层白云岩储层特征及主控因素[J]. 中国矿业大学学报, 2021, 50(2): 342–362.
- LIU Wendong, ZHONG Dakang, YIN Hong, et al. Development characteristics and main controlling factors of ultra-deep dolomite reservoirs of the Qixia Formation in the north-western Sichuan Basin [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(2): 342–362.
- [56] 冷雪. 辽河油田大平房地区火山岩地质地球化学及其成藏控制作用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2006.
- LENG Xue. Study on volcanic rock geology–geochemistry and pool-forming control action in Dapingfang area of Liaohe Oil-field [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2006.

编辑:张润合

Research progress on identification methods and geological significance for oil and gas of hydrothermal fluid activity

ZHANG Lanxin, ZHANG Fengqi, ZHAO Zhenyu, GAO Jianrong,
LI Chengshan, WANG Qingli, ZHU Zhifeng

Abstract: The identification of deep thermal fluid activity and its effect on hydrocarbon accumulation has become a hot topic in petroleum geology research. There are many methods to identify thermal fluid activity, and its influence on hydrocarbon accumulation is also more complex. In view of this, based on a large number of literature research, this paper summarizes the identification methods of hydrothermal fluid activity, and systematically combs the influence of hydrothermal activity on hydrocarbon accumulation. According to the summary and analysis, the main identification methods of hydrothermal fluid activities can be summarized into three types, namely, rock–mineral characteristics combination identification method, temperature sensitive parameter anomaly method and geochemical element content anomaly method. The current mainstream methods include rock–mineral characteristics combination identification method, fluid inclusion homogenization temperature identification method and vitrinite reflectance mutation method. In the specific implementation, a variety of methods should be selected as far as possible for comprehensive identification. The influence of hydrothermal fluid activity on hydrocarbon accumulation is reflected in four aspects: deep hydrothermal fluid creates good conditions for the formation of hydrocarbon substances by providing thermal energy, exogenous hydrogen and catalyst required for the maturation and evolution of source rocks; the influence of hydrothermal fluid on oil and gas reservoirs maybe constructive or destructive, but mainly of the constructiveness of hydrothermal dissolution; deep fluid can enhance the sealing ability of caprock; hydrothermal fluid promotes hydrocarbon generation of source rocks, forming hydrocarbon generation pressurization to promote the primary migration of oil and gas, the dissolution by thermal fluid changes the physical properties of reservoirs and can promote the secondary migration of oil and gas. This study summarizes the influence of hydrothermal fluid activity on hydrocarbon accumulation in detail, which can provide reference for the study of hydrocarbon accumulation conditions transformed by deep hydrothermal activity in sedimentary basins.

Key words: hydrothermal fluid; identification method; geochemistry; dissolution; hydrocarbon accumulation; research progress

ZHANG Lanxin, First author: Master degree candidate, major in oil and gas geology. Add: Xi'an Shiyou University, No.18 Dianzi Second Road, Xi'an, Shaanxi 710065, China

ZHANG Fengqi, Corresponding author: PhD, Professor, Master's supervisor, mainly engaged in research on the dynamics of oil and gas reservoir formation. Add: Xi'an Shiyou University, No.18 Dianzi Second Road, Xi'an, Shaanxi 710065, China