

文章编号 :1000-0550(2001)02-0214-05

沉积盆地热流体活动及其成藏动力学意义^①

叶加仁 杨香华

(中国地质大学石油系 武汉 430074)

摘要 在分析、总结国内外一些含油气盆地的典型资料的基础上,论述了热流体活动的若干重要表现形式及主要研究方法,强调了热流体活动对有机质热演化和油气生成的强化作用。根据控制热流体活动的主要因素之一——流体活动通道,将沉积盆地内的热流体活动类型划分为岩性型、不整合型、断裂型和复合型四大类。最后,探讨了热流体活动对成藏动力学研究的重要意义,认为其可为有机质演化异常提供新的成因解释途径,扩大油气勘探领域;为油气运移的研究提供线索,优化勘探目标选择;为成岩—孔隙演化的动态研究提供依据,预测深部储层发育层段。

关键词 热流体 对流 成藏动力学 油气生成 油气运移

第一作者简介 叶加仁 男 1966 年出生 博士 副教授 石油地质

中图分类号 TE122.2+3 P618.130.1 **文献标识码** A

作为沉积盆地成藏动力学重要组成部分的热流体活动研究正成为地学领域新的研究热点,是地球科学中的前缘领域^[1],已引起广大石油地质学家的高度重视和注目。热流体的涵义非常广泛,且地壳中的热流体活动是广泛存在的,活动的时间漫长与空间巨大;越来越多的证据不断表明,地壳中的热流体活动在很大程度上影响和控制着地壳内部的构造作用、变质作用、岩浆作用、成岩作用和成矿作用,因此,人们有理由相信,流体地质科学的出现很可能触发一场新的地学革命^[2],热流体活动的研究对油气地质勘探与开发意义重大,正如 Anderson 所指出的那样,沉积盆地实际上是一个巨大的低温热化学反应器,活动于其中的热流体必然对沉积盆地内发生的表层沉积作用、压实、热传递及油气生成、运移、聚集、保存与破坏等产生重要的影响作用^[3],美国国家自然科学基金会和多家石油公司投入巨资在墨西哥湾盆地建立了一个大型实验场,以研究、追踪活动热流体的运动规律和油气运移,并已经获得部分成果^[4]。尽管如此,目前对诸如热流体的定义、热流体活动的主要特征、热流体活动的类型、热效应及其研究方法等缺乏统一、足够的认识,本文试图根据世界和我国若干个盆地的典型资料来阐述发生于沉积盆地范围内的热流体活动的基本特点及其表现形式,进而探讨其对成藏动力学研究的意义。

1 热流体活动的表现形式

在实际研究中,人们认识热流体活动通常是从热异常开始的^[5-6],进而根据研究区的各种测试资料,如

钻杆中途测试(DST)、重复地层测试(RFT)、镜质体反射率(R_o)、流体包裹体、粘土矿物、钻井地温测试及各种有机地球化学分析化验资料等来确定热流体活动的存在、强弱、流动机制及其影响范围等。图 1 为综合渤海湾盆地歧口凹陷若干口井的实测地温(DST)剖面,图 2 为美国内华达 Grant Canyon 和 Bacon Flat 油田的温度—深度剖面^[7],图 1 和图 2 与典型的对流温度剖面(图 1 左下角剖面)非常相似,结合世界及国内其它一些盆地的资料,可知热流体活动的主要表现形

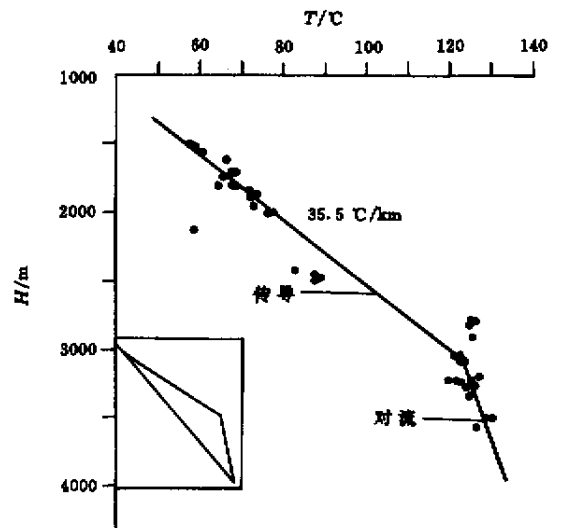


图 1 歧口凹陷温度—深度关系图

Fig. 1 Temperature vs. depth in the Qikou depression

^① “高等学校骨干教师资助计划(GG-170-10491-1460)和国家‘九五’重点科技攻关项目(99-110-04-01-04)资助

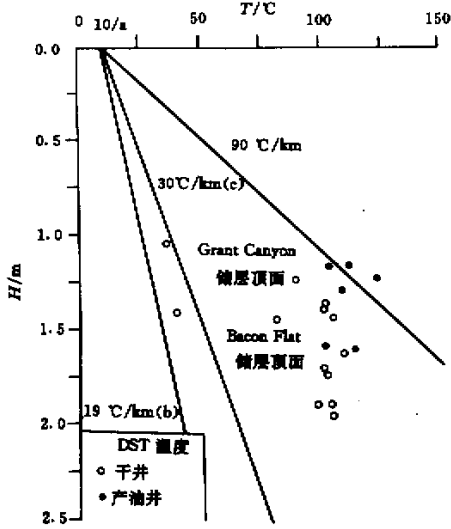


图2 Grant Canyon and Bacon Flat

油田温度—深度剖面(据 Hulen 等, 1994, 有删减)

(a) 地表平均温度 (b) 油田平均地温梯度 (c) 全球正常地温梯度。

Fig.2 Temperature vs. depth Section in the Grant

Canyon and Bacon Flat Oilfield (Modified from Hulen *et al.*, 1994)

式为：

(1) 单井温度—深度剖面可明显地分为三段：上段和下段为正常地温梯度(盆地背景地温梯度)，热传导起主导作用；中段为高地温低地温梯度甚至为负地温梯度段，其梯度明显低于正常地温梯度，系在热传导背景下叠加了热对流的影响所致。

(2) 单井镜质体反射率(R_o)剖面(半对数坐标)和热解峰温(T_{max})剖面不是传统观念下的直线段，而是呈扭曲的“Z”型，由二条或三条直线段组成，且中部的 R_o 和 T_{max} 梯度异常低或出现倒置(中部 R_o 值低于上部)现象^[8]，使镜质体反射率和热解峰温资料的规律性变得更为复杂。

(3) 与上述中段处相对应的单井孔隙流体压力常常表现为异常高压，而上部和下部多为正常压力或压力系数较小。

(4) 其它有机地球化学分析指标(如有机碳、氯仿沥青‘A’和可溶有机质含量等)在中段处也常常发生突变^[9]，热流体活动强化了有机质的演化程度和油气生成作用。

(5) 与单井剖面相对应，在温度和压力二维剖面上，沿热流体活动的范围通常表现为高的均一地层温度和异常高的流体压力层段；反过来据此可大致确定热流体活动的影响范围。

此外，流体包裹体测温资料也可作为判断热流体活动存在的有力佐证及划分热流体活动期次的重要依据。如根据歧口凹陷 QK18-1-1 井的流体包裹体测温

资料可知，该井的流体包裹体均一温度总体上可划分为三个温度段(1)98℃~116.3℃：主要来自于沙二段的包裹体测温，其比现今地温低(未经压力校正)，并比上覆地层内的包裹体温度低，较低均一温度的包裹体为早期胶结物捕获的产物，代表当时成岩胶结的温度，经压力校正后，其接近于现今地层温度。由盆地埋藏史研究可知，沙二段地层的现今埋深是历史上最大的，其温度也应是最高，以上事实说明当时的古地温梯度远远高于现今的地温梯度(2)131℃~159℃：主要来自东二段、东一段和馆陶组下部的包裹体测温，比现今地温梯度稍高，其除受当时较高的古地温梯度控制外，还叠加有下部来源的热流体的影响。沙三段为歧口凹陷主要生烃岩系，上部地层内的有机包裹体是下部油源上侵的结果(3)170℃~210℃：主要测自馆陶组和明化镇组的流体包裹体中，其均一温度大大高于现今地层温度，在显微镜下观察发现，该类包裹体主要赋存于裂缝中的石英或方解石细脉内，其显然不能代表成岩温度，应为深部流体上侵的产物，或可能与渤海湾盆地的晚期岩浆侵入事件有关，据此可确定该凹陷至少存在二期热流体事件；同时，粘土矿物纵向演化也明显地受热流体垂向活动的控制，浅部粘土矿物受热流体活动后其热演化程度比未受热流体影响的粘土矿物明显要高；另外，稳定碳、氧同位素的组成与分布特征也印证了上述结论，并可用于判断热流体的来源及活动路径。

需要指出的是，由于各盆地具体地质条件的差异，热流体活动的表现形式和强度可能有所不同。在实际工作中，可分析研究区的各项测试化验资料并结合动态数值模拟技术而综合确定热流体活动的影响范围及其演化历史，为油气勘探和开发服务。

2 热流体活动类型

总结世界和国内的典型资料，根据控制热流体活动的主要因素之一——流体活动通道，本文将沉积盆地内的热流体活动类型初步归纳、划分为岩性型、不整合型、断裂型和复合型四大类，以供商榷与讨论。

(1) 岩性型：热流体活动范围主要受岩性控制，砂岩含量高的层段热流体活动强烈，如发生于歧口凹陷的热流体活动，其主要活动于沙二段内，沙二段的砂岩含量明显比上覆沙一段和下伏沙三段的砂岩含量高，由于砂岩的孔隙连通性与渗透性好，热流体主要迁移在受二段泥岩含量较高的地层(沙一段和沙三段)所夹持的含砂量较高的沙二段范围内，岩性分界面也是各项衡量热流体活动指标的突变面(图3)。非常有意义的是，具该类热流体活动的砂岩层段(储层段)尽管

其泥质含量较低,但据地震资料计算得出其仍具异常高的流体压力,这在油气藏的开发过程中应引起高度重视。

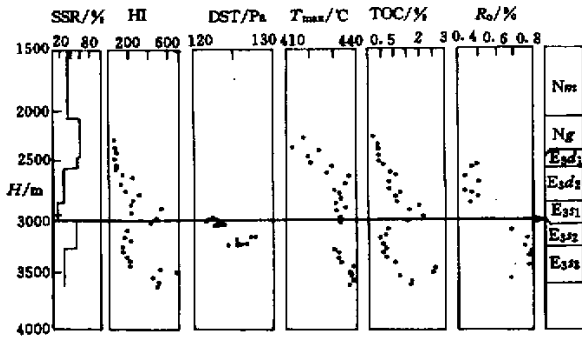


图3 歧口凹陷 QK18-1-1 井热流体活动指标综合剖面图

(SSR:含砂率;HI:氢指数;DST:试油压力;

T_{max} :最大热解峰温;TOC:有机碳; R_o :镜质体反射率)

Fig.3 Synthetica Section of thermal fluid

flow indicators in Well Qk18-1-1, Qikou depression

(2) 不整合型:热流体主要沿不整合面活动,如莺歌海—琼东南盆地内的热流体活动^[10],温度较高的流体沿不整合面运移使不整合面附近的地温明显增高,有机质热演化异常最明显,引起有机质演化程度发生倒置,为强烈对流带,而不整合面之上和之下的一定深度范围内为对流影响带,有机质演化程度有一定程度的增强。热流体沿不整合面的大规模长距离快速运移为油气聚集创造了有利的条件,莺—琼盆地 YA13-1 气田的烃类运聚就与热流体活动密切相关,热流体活动为气田的形成提供了源源不断的油气来源。

(3) 断裂型:断裂为热流体活动的主要通道。众所周知,断裂是油气运移的主要通道之一,而油气运移是地壳热流体活动的一种重要形式,不言而喻,沿断裂运移也是热流体活动的重要类型之一,垂向上的流体运移主要依靠断层作为输导通道。Hooper 认为通常流体沿断裂运移是个周期流动过程^[11],与断裂活动期次与性质密切相关,且流动速度较快,释放出的流体赋存于断裂上部的储层之中。根据凹陷埋藏史分析结果,歧口凹陷沉积盖层经历了早期(下第三系沉积期)缓慢浅埋和晚期(上第三系沉积期)快速深埋二大阶段,特别是在明化镇组沉积期地层沉积速率可达 400 m/Ma 以上,这为深部异常高压的积累创造了良好的条件。由于该区断裂活动频繁且强烈,断裂对压力的释放起着重要的输导作用,现今深部异常高压横向连续性差,多呈孤立“山包”状,异常高压的释放成为深部热流体活动的主要动力来源。盆地古地压场的“正演”恢复表明,深部异常高压历经多期幕式释放过程。同时,有证

据表明,热流体的释放、上涌,对浅部次级“无根”断层的发育与展布有一定的控制作用。明化镇组粉砂质泥岩中发育的裂缝被包裹了沥青的石英细脉所充填,细脉中的包裹体均一温度高达 130 °C,表明它们是来自深部烃类热流体活动的产物,且流体沿断层突然释放,并没有被明显冷却。

(4) 复合型:热流体活动通常不是受单一因素所控制,而是受岩性、不整合和断裂等多种组合因素综合影响,据此复合型又可划分出岩性—不整合复合型、岩性—断裂复合型、不整合—断裂复合型和岩性—不整合—断裂复合型等亚类。大部分盆地或凹陷的热流体活动可能多属复合型,岩性界面和不整合面是热流体活动的主要横向通道,而断裂则是热流体活动的主要垂向通道,岩性界面、不整合和断裂在空间上的复合构成了热流体活动的复合通道。

3 成藏动力学意义

热流体作为油气运移的载体,在油气运聚过程中起着十分关键的作用^[12]。热流体活动的发现与确定,可较好地阐明以往传统地质认识所不能解释的一些石油地质现象,拓宽研究思路与油气勘探开发领域,对成藏动力学研究具有重要的理论意义和极大的实际应用价值。

3.1 为有机质演化异常提供新的成因解释途径,扩大油气勘探领域

众所周知,作为评价烃源岩重要指标之一的成熟度是有机质在时、温要素作用下的综合效应,其中温度对有机质的演化起主导作用。热流体活动对有机质演化具有明显的强化作用,使有机质成熟度指标呈复杂变化,如镜质体反射率剖面不是传统观念下的直线段,而是由二段或三段斜率不同的直线段组成,为此,必须对反射率资料进行校正,以提高成熟度资料的利用价值。以往人们认为歧口地区的镜质体反射率异常仅是由有机质富氢所致,但单纯用氢指数资料校正反射率值其效果并不理想。实质上,该区的镜质体反射率受母质氢指数、热流体活动和异常高压等多种复杂因素综合影响,高氢指数和异常高压对有机质的成熟起抑制作用,热流体活动则强化有机质的成熟作用,三者在不同井区、不同深度影响力不一,主、次不同,从而导致现今实测镜质体反射率呈复杂的异常变化。因此,应从动态角度多因素地去综合认识、校正镜质体反射率资料。

热流体活动对有机质演化的强化作用导致生烃门限深度减小,使在传导背景下不可能成熟的源岩进入生烃门限,从而扩大了有效烃源岩的层位和体积,拓宽了油气勘探领域。如在歧口凹陷自其边缘至中心,从

QK18-5-1、QK18-1-1 到 QK17-1-1 井,由于热流体活动强度的不断加大,导致生烃门限深度依次减小。在莺—琼盆地,由于热流体的活动, YA21-1-2 井的生烃门限深度为 2 700 m,而在邻近地温梯度相近、无对流影响的地区,有机质的生烃门限深度一般为 3 000 ~ 3 100 m,深 300 m 以上^[10]。

3.2 为油气运移的研究提供线索,优化勘探目标选择

沉积盆地中的油气运移是地壳热流体活动的重要组成部分,通过油气运移的研究可以为深部热流体的研究提供思路、方法和证据,并为整个地壳流体的研究提供一个窗口和借鉴^[2]。同时,热流体活动也会对油气生成和运移产生影响和作用。如前所述,热流体活动强化了油气的生成作用,同时热流体活动强烈的地区和时期常常也是油气运移活跃的地区和时期。热流体活动在歧口凹陷的发现证实了该区油气运移过程的存在,热流体活动的通道同时也是油气运移的重要通道,揭示了岩性界面和断裂活动对油气运移与聚集的重要作用。因此,热流体活动形式和强度等的研究可为油气运移路径、模式和烃类聚集部位的研究提供重要线索,从而为勘探目标的优化选择、提高钻探成功率、加快油气勘探进程等奠定坚实的基础。

3.3 为成岩—孔隙演化的动态研究提供依据,预测深部储层发育层段

热流体活动对沉积盆地的储层成岩—孔隙演化具重要的影响作用,反过来利用有关成岩现象可识别热流体活动的范围和形式。成岩条件分析表明,热流体的纵向和横向运移使成岩现象的空间分布复杂化,导致同一深度段可能发育多阶段的成岩产物。在温度、压力高且相对均一的储层展布带内,由于热流体的侵入,抑制了压实作用、石英压溶作用和胶结物沉淀作用的进行,储层孔隙受到改造,有利于孔隙的保存和深部储层的发育。断层特别是延伸至浅部的“通天”断层一方面作为深部烃类热流体的主要垂向运移通道,另一方面又为大气水的下渗创造了有利条件,两种性质不

同的流体沿断面相向运移,必然发生混合,由于流体温压条件和化学性质的突然改变,导致沉淀作用的大规模发生。这类胶结物一般分布于断裂两侧,形成侧向封堵的成岩圈闭,易于捕获油气。另外,流体通道上的粘土矿物的演化程度具明显增高的特征。

总之,沉积盆地中的活动热流体具复杂多样的表现形式,岩性界面、不整合面和断层是热流体活动的主要通道,热流体活动的动态、综合研究对丰富与发展成藏动力学具有重要意义。

参 考 文 献

- 1 李思田. 沉积盆地的动力学分析—盆地研究领域的主要趋向[J]. 地学前缘, 1995, 2(3~4): 1~8
- 2 李明诚. 地壳中的热流体活动与油气运移[J]. 地学前缘, 1995, 2(3~4): 155~162
- 3 Anderson R N, Sedimentary basin as thermo-chemical reactors[R]. 1990 and 1991 Report of Lamont-Doherty Geologic Observatory. 1992. 68~76
- 4 Anderson R N, He Wei, Hobart M A, *et al.*, Active fluid flow in the Eugene island area, offshore Louisiana[J]. Geophysics, 1991, 10(4): 6
- 5 李雨梁, 张泉兴, 张启明. 崖 13-1 气田的热异常[J]. 中国海上油气(地质), 1992, 6(1): 1~10
- 6 孙永传, 陈红汉, 李蕙生等. 莺—琼盆地 YA13-1 气田热流体活动与有机/无机成岩响应[J]. 地球科学, 1995, 20(3): 276~282
- 7 Hulen J B, Goff F, Ross J R, *et al.*, Geology and geothermal origin of Grant Canyon and Bacon Flat oil fields, Railroad Valley, Nevada[J]. AAPG Bulletin, 1994, 78(4): 596~623
- 8 Law B E, Nuccio V F, Barthe C E, Kinky vitrinite reflectance well profiles: evidence of paleopore pressure in low-permeability, gas-bearing sequences in Rocky mountain foreland basins[J]. AAPG Bulletin, 1989, 73: 999~1 010
- 9 Hao Fang, Sun Yongchuan, Li Sitian, *et al.*, Overpressure retardation of organic-matter maturation and petroleum generation: a case study from the Yinggehai and Qiongdongnan Basins, South China sea[J]. AAPG Bulletin, 1995, 79(4): 551~562
- 10 郝芳, 孙永传, 李思田等. 活动热流体对有机质热演化和油气生成作用的强化[J]. 地球科学, 1996, 21(1): 68~72
- 11 Hooper E C D, Fluid migration along growth faults in compacting sediments[J]. Journal of Petroleum Geology, 1991, 14(2): 181~196
- 12 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, 1999, 24(2): 183~188

Thermal Fluid Flow in Sedimentary Basins and Its Significance to Pool-forming Dynamics

YE Jia-ren YANG Xiang-hua

(Department of Petroleum Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074)

Abstract

Based on the analysis and some typical data of petroleum basins in China and world, it discusses some important expression forms and major research methods of thermal fluid flow, and emphasized its enhancement to organic-matter maturation and hydrocarbon generation in this paper. According to the major controlling factor, passage of fluid migration, to thermal fluid flow, it divides thermal fluid flow into four types: (1) lithologic-type, (2) conformity-type, (3) fault-type and (4) compound-type. Finally, it also discusses the significance of thermal fluid flow to pool-forming dynamics: (1) provides a new explanation way to abnormal vitrinite reflectance, which can enlarge the fields of hydrocarbon exploration and development; (2) provides some important evidences to research of hydrocarbon migration, which support to choose exploration targets; and (3) provides means to study diagnosis and porosity evolution of reservoir rocks, which can be used to predict the development units of deep reservoirs.

Key words thermal fluid convection pool-forming dynamics hydrocarbon generation hydrocarbon migration