

异常压力环境下流体活动及其油气运移主通道分析

解习农¹, 刘晓峰¹, 赵士宝², 姜 涛¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 内蒙古第四地质矿产勘察开发院, 内蒙古集宁 012000

摘要: 沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用密切相关, 而异常压力环境下流体活动有其特殊性, 因而与之相关的油气运移和成藏也有其特殊性。对于异常压力体系(包括高压和低压)而言, 存在 2 类流体系统, 即半开放型和封闭型流体系统。前者由于封闭层的间歇开启导致流体幕式释放, 后者以封闭层内热对流作用为主。按照封闭层开启的成因机制可划分为 3 类, 即水力破裂或流体压裂型、断裂型、断—压双控型。封闭层的间歇开启构成异常压力环境下油气运移的主通道。这些流体活动和油气运移在海底以及盆地的浅层和深层显示不同地球物理特征, 如气苗、麻坑、气烟囱和流体底辟带等。同样, 还可以利用岩石中残留的一些标记或异常现象示踪盆地流体活动, 如流体包裹体、地层水化学、有机地球化学异常、成岩作用异常、流体场动态模拟等。这些特征和标志为流体和油气运移主通道的识别, 同时也为异常压力环境下油气勘探提供重要的依据。

关键词: 异常压力; 幕式流体活动; 热对流; 气烟囱; 油气运移。

中图分类号: P539.2; P618.13

文章编号: 1000—2383(2004)05—0589—07

收稿日期: 2004—05—12

Fluid Flow and Hydrocarbon Migration Pathways in Abnormally Pressured Environments

XIE Xi-nong¹, LIU Xiao-feng¹, ZHAO Shi-bao², JIANG Tao¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Fourth Institute of Geological and Mineral Exploration of Inner Mongolia, Jining 012000, China

Abstract: Hydrocarbon generation, migration and accumulation are closely related to activity of the basin fluid. Fluid flow in abnormally pressured environments shows different hydrodynamic processes as a result of associated distinct models of hydrocarbon accumulation. Two kinds of fluid flow systems have been classified in abnormally pressured environments including overpressure and underpressure, i. e. semi-opened and closed systems. In the former, opening of seal beds result in episodic fluid expulsion; but in the latter, thermal convection is dominant in anomalous pressured system. The opening mechanisms of seal beds can be grouped into three kinds of patterns, hydrofracturing, faulting and combination action of both faulting and pressuring. Opening of seal beds constitutes main pathways of hydrocarbon from abnormally pressured system. These fluids flowing from deep overpressured strata to seafloor have been identified using different geophysical data, which are imaged as gas blow-out, pockmark, chimney, fluid diapir, and so on. Some resided remarks or anomalous phenomena recorded in depositional rocks can be used to identify the active processes of fluid, such as fluid inclusions, geochemical features of formation water, anomaly in organic matters and diagenetic processes. At the same time, quantitative modeling can be used to present the dynamic processes of fluid flow. These results can constrain the realm of main migration pathways of fluid flow and hydrocarbon, and provide the useful information for hydrocarbon exploration in abnormally pressured environments.

Key words: abnormal pressure; episodic fluid flow; thermal convection; gas chimney; hydrocarbon migration.

基金项目: 教育部跨世纪人才基金项目; 教育部重点基金项目(No. 01038).

作者简介: 解习农(1963—), 男, 教授, 主要从事能源地质与盆地流体的教学和科研工作. E-mail: xnxie@cug.edu.cn

早在 20 世纪 50 年代初, Dickinson(1953) 就发现了墨西哥湾盆地异常压力现象, 但对该领域研究仅是近 10 年来随着含油气盆地异常压力的普遍发现, 才引起人们的广泛重视。众所周知, 地质历史时期沉积盆地的形成和演化经历了一个相当复杂的过程, 同样盆地内流体的运动也经历了一个复杂的过程 (Garven, 1995)。盆地内流体活动是控制盆地中物质演变和能量再分配的主导因素。沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体作用有着密切关系, 大型层控金属矿床形成过程中金属元素的活化、迁移和富集亦与盆地及深部的流体作用有关 (Parnell, 1994)。盆地流体的压力系统是盆地流体活动的核心问题。因而, 异常流体压力的形成机理及其流体活动规律成为人们十分关心的热点研究问题 (Bradley, 1975; Belitz and Bredehoeft, 1988; Hunt, 1990; Neuzil, 1995; Law *et al.*, 1998; Jiao and Zheng, 1998)。显然, 盆地流体研究, 特别是异常压力条件下流体活动研究不仅有利于重新认识各种地质作用过程, 而且对解决盆地内成藏、成矿规律等许多矿床勘探和开发问题有着重大的实际意义。

迄今为止, 世界上已发现的约 30% 的油气田与异常压力体系密切相关, 如墨西哥湾盆地、北海盆地、阿尔伯达盆地。有关异常压力体系也有大量的实例报道和专著论述 (Fertl *et al.*, 1994; Ortoleva, 1994; Hunt, 1996; Surdam, 1997; Law *et al.*, 1998)。目前, 在我国南海北部大陆边缘盆地 (莺歌海盆地、琼东南盆地)、渤海湾盆地、四川盆地等含油气盆地均发现异常高地层压力, 并已取得了丰硕的成果 (龚再升等, 1997)。在松辽盆地部分地区发现异常低压现象 (He *et al.*, 2000; Xie *et al.*, 2003)。然而, 有关异常压力环境下流体活动的规律仍很不清楚。本文通过对异常压力环境下盆地流体活动规律的系统总结, 并结合异常高压和异常低压盆地的典型分析, 阐述异常压力环境下油气输导主通道的形成条件及其主要识别标志, 为油气勘探提出地质依据。

1 异常压力环境中流体幕式突破机理

对于异常压力体系 (包括高压和低压) 而言, 通常包括 2 类流体系统, 即半开放型和封闭型流体系统。半开放型流体系统以异常压力体系内流体间歇性释放为特征, 超压流体囊幕式释放模型是近年来盆地流体研究的重大突破 (Anderson, 1993)。在有些

盆地形成了超压 (增压过程) — 释放 (泄压过程) 这样多次循环反复的多次增压过程和幕式流体释放过程。

一般而言, 盆地流体总是从高势区向低势区流动。传统的石油地质理论认为, 油气运移总是从盆地中央或深部烃源岩呈放射状向盆地边缘或高部位运移。准确地说烃类运移总是从高势区向低势区, 并沿着毛细管阻力最小的位置进行运移。Hindle(1997) 认为封闭层底面形态控制油气侧向运移的主通道, 不同的封闭层形态具有不同的油气运移模型, 比如背斜型对分散运移的油气具有聚敛作用, 而向斜型则有发散作用。因而, 在某些有利的输导网络中油气逐渐聚拢而沿着主要通道运移。所以, 在常压背景条件下形成 (构造) 脊控、断控、扇控等形式的主要油气输导通道。而在异常压力环境中, 浮力作用只限于相互连通的体系内部, 在封闭层没有开启的情况下, 异常压力体系内除热对流型流体活动外, 很少有流体的侧向运移。因此, 封闭层的开启构成异常压力环境下油气运移的主通道, 只有封闭层破裂才导致体系内流体排出。比如, 底辟带顶部封闭层破裂开启导致大量超压流体排出, 并在浅部形成油气藏, 墨西哥湾盆地与盐底辟相关的油气田和莺歌海盆地与泥一流体底辟相关的气田都属于这种情形。

封闭层的开启和封闭是异常压力体系内流体释放的关键因素。按照封闭层开启的成因机制可划分为 3 类, 即水力破裂或流体压裂型、断裂型、断—压双控型。

水力破裂或流体压裂型: 水力破裂 (hydrofracturing) 是由于孔隙空间中流体压力增大而导致低渗岩石的破裂, 这种破裂面通常形成于异常高的流体压力背景 (Xie *et al.*, 1998)。由于封闭层内流体压力增大, 当大于封闭层的抗张强度时导致封闭层破裂。当封闭层破裂后, 超压体系内流体排出, 同时超压体系内流体压力降低, 随后导致破裂面的再封闭, 如此反复, 形成封闭层的多次开启和超压流体的多次幕式突破 (Xie *et al.*, 1999a)。

断裂型: 是指由于盆地构造应力场的改变, 导致盆地内形成新的断裂或先存的具有封闭能力的断裂再活动而导致断裂开启。这些断裂连通异常压力带与正常压力带, 使得其中流体发生从高压到低压单向强迫性流动。

断—压双控型: 是指由于以上 2 种因素联合作用导致封闭层内的流体释放 (郝芳等, 2004)。比如莺歌海盆地中央泥一流体底辟带从超压带到常压带的

主要流体通道就是南北向伸展性断裂,断裂的开启受控于超压体系内超压强度及区域性构造应力的双重因素.

2 油气运移主通道的地球物理特征

尽管油气运移主通道的识别难度非常大,但我们仍可以利用多种地球物理方法显示较晚期的这些流体活动和油气运移. 它们在海底以及盆地的浅层和深层显示不同地球物理特征,如气苗、麻坑、气烟囱和流体底辟带等. 这些地球物理特征为油气运移主通道的判识提供十分重要的依据.

2.1 海底麻坑和塌陷柱

Parnell(2002)和 Hovland *et al.* (2002)发现在现今大陆架海底见到大量从深部超压流体渗漏到海底后遗留下的麻坑. 这些麻坑是流体喷溢造成的,即流体喷溢后的塌陷. 根据莺歌海盆地海底侧向声纳扫描资料和电火花浅层剖面记录资料,在海底不仅存在着大量的麻坑,而且存在目前仍在冒气的气苗(张启明等,1996). 此外,在有些地震剖面上还可见塌陷柱(图 1).

2.2 气烟囱和流体底辟带

地震剖面上所揭示的气烟囱是流体垂向活动的直接证据. 此外,在许多高分辨地震剖面 and 道积分剖面上常常可以识别出流体底辟带的核部密集的近于垂直的断裂,当这些裂隙带中充注了流体特别是天然气时,在地震剖面上造成反射模糊带,甚至空白区,其原因是气层低速异常和反射屏蔽的影响,使反

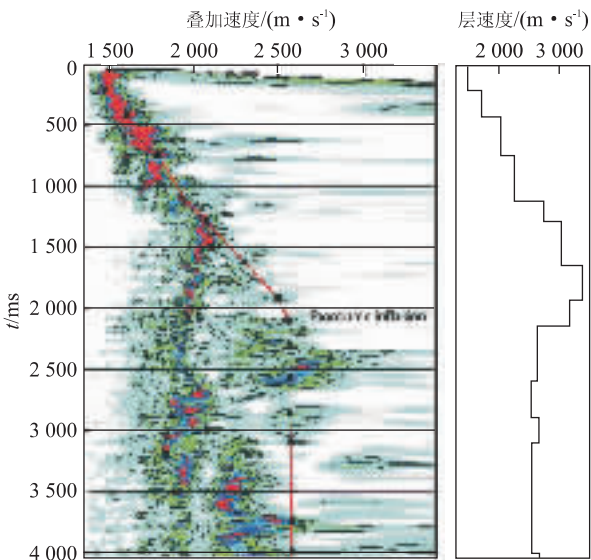


图 2 莺歌海盆地异常超压带内速度异常

Fig. 2 Anomalous velocity in overpressured zone of Yinggehai basin

射波信噪比大幅度降低. 近年来,近海海域多波勘探技术的使用,在常规二维叠偏剖面或高分辨率剖面中的反射模糊区,在 S 波剖面上就显示了良好的连续性(Xie *et al.* , 2003). 在快速深沉降盆地,由于沉积物孔隙中流体得不到有效排出,逐渐形成超压体,并形成超压流体囊. 由于超压体系中充注了大量未排出的流体或者天然气时,超压体系以低速异常为特征,从而在地震剖面上造成反射模糊带、甚至空白区. 在叠加速度谱上显示为明显的低速(图 2). 在莺歌海盆地中央发育多个近南北向延伸的泥一流体底辟体,在底辟体的核部形成密集的近于垂直的断裂,这些断裂系统构成了该区流体和油气运移的主通道.

3 油气运移主通道的示踪分析

流体是地质作用过程中最活跃的因素,尽管人们很难真实地再现盆地流体活动和油气运移的全过程,但由于盆地流体的流动导致温度场、压力场和成岩场的变化,可能会使得盆地内岩石及其所含有机物发生相应的水—岩相互作用和成岩变质作用. 反过来,我们可以利用岩石中残留的一些标记示踪盆地流体活动. 其中,流体包裹体和地层水化学异常是盆地流体活动最直接的证据,此外,还可以根据有机地球化学异常和成岩作用异常来判断.

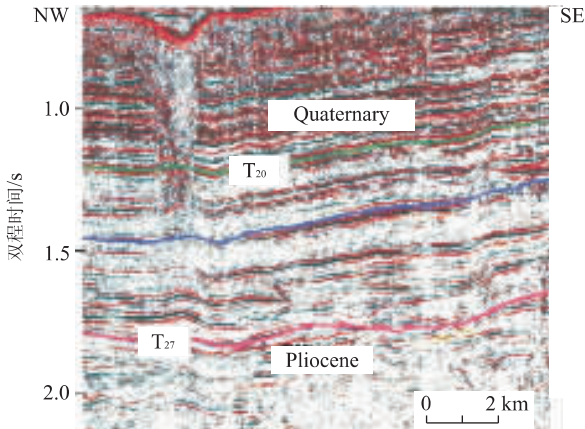


图 1 莺歌海盆地异常超压带顶部的麻坑

Fig. 1 Pockmarks above an overpressured zone of Yinggehai basin

3.1 流体包裹体示踪

沉积盆地自生矿物中的流体包裹体是矿物结晶过程中因晶体生长机制、生长速度或某些组分浓度发生变化或多相界面相互作用等因素的影响捕获于晶体缺陷中的成岩成矿流体,因此,流体包裹体代表成岩流体的原始样品(施继锡,1987),是热流体活动的直接证据;一方面可通过包裹体成分的变化再现成岩流体的物质构成,另一方面流体包裹体均一化温度及其多期次可反映热流体活动期次和温度范围。

3.2 地层水化学示踪

地层水化学同样也是记录盆地流体活动较为有效和直接的证据,一方面通过地层水化学成分的变化查明沉积物原始沉积水以及后期流体活动或水—岩相互作用的改造程度;另一方面可根据地层水同位素直接判断流体的成因及流体可能的运移路径。

地层水化学特性可以用于推断不同流体混合程度和水—岩相互作用过程(Land, 1995; Davisson and Criss, 1996). Varsanyi and Kovacs(1997)通过匈牙利 Pannonian 盆地南部地层水研究,表明从补给区到排泄区地下水中离子浓度发生规律性变化,即沿流线钠离子增多,而钙和镁离子减少。图 3 说明不同盆地不同地层压力系统中地层水矿化度的变化情况,其中图 3a 为松辽盆地十屋断陷地层水矿化度变化情况,其原生沉积水为淡水,在较为封闭的异常低压带为高矿化度水,而常压带则为低矿化度水。图 3b 为莺歌海盆地地层水矿化度变化情况,其原生沉

积水为海水。在异常超压段由于粘土矿物脱水导致地层水矿化度明显降低,在没有热流体活动地区,地层水矿化度接近于海水,而在有热流体活动的常压段和压力过渡段地层水矿化度变化较大,介于超压段低矿化度的地层水和海水之间底辟区由于超压流体囊幕式突破,使得来自于超压段的低矿化度的地层水与来自于正常压力段接近于海水的的海水混合,所以,不同矿化度代表不同来源流体的比例不同。

地层水化学特征是流体在输导体系中运移时与岩石颗粒相互作用的结果,因此其成分变化也可以用来识别重要的水—岩反应。Davisson and Criss (1996)根据 800 多个不同盆地的样品分析,提出一种有效反映水—岩相互作用的关系式,即计算 Ca 相对海水富集和 Na 相对海水亏损的方法。其计算公式是:

$$Ca_{excess} = [Ca_{means} - (Ca/Cl)_{sw} \times Cl_{means}] \times 2/40.08,$$
$$Na_{deficit} = [(Na/Cl)_{sw} \times Cl_{means} - Na_{means}]/22.99.$$

其中 Ca_{means} 、 Na_{means} 是溶液中钙、钠的毫克当量浓度, $(Ca/Cl)_{sw}$ 、 $(Na/Cl)_{sw}$ 是海水中相应离子的毫克当量浓度比。图 4 中的小插图反映了不同的水—岩反应类型及其离子浓度的变化趋势,依此可以判断地层水中出现的水—岩反应类型。该图实测数据来自于松辽盆地十屋断陷和莺歌海盆地,不难看出十屋断陷异常低压段钠亏损 ($Na_{deficit}$) 与钙盈余 (Ca_{excess}) 之间的关系,该关系指示了该异常低压段水—岩相互作用为 $1Ca^{2+}$ 与 $2Na^{+}$ 离子的交换反应,

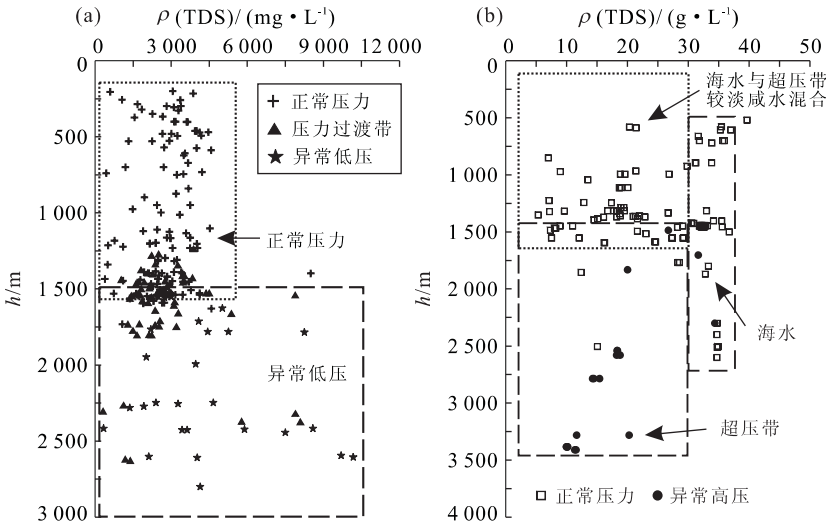


图 3 松辽盆地十屋断陷(a)和莺歌海盆地底辟区(b)地层水矿化度随深度变化

Fig. 3 Salinity of groundwater vs. depth in the Shiwu depression of Songliao basin (a) and the diapir zones of Yinggehai basin (b)

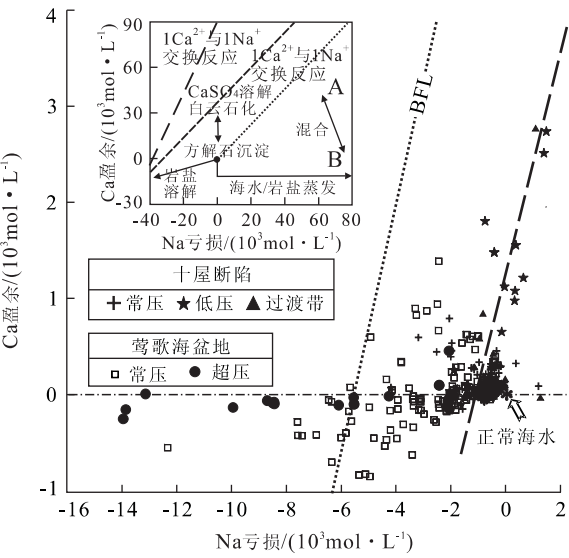


图 4 莺歌海盆地和松辽盆地十屋断陷地层水中 Na 亏损与 Ca 盈余之间关系,左上插图说明不同离子浓度变化与水—岩反应类型关系 (Davisson and Criss, 1996)

Fig. 4 Excess-deficit relations of formation water in the Yinggehai basin and the Shiwu depression of Songliao basin. Inset figure shows the relationship between fluid composition and modes of different water-rock interactions

即以斜长石的钠长石化作用为主的水—岩反应。

3.3 有机地球化学异常示踪

有机地球化学方法示踪流体活动包括 2 类,一类是利用岩石中所含有机组分的变化判断烃类流体的运移路径;另一类是利用岩石中有机质的成岩变质作用来判断。比如镜质体反射率 R_o 和有机质热解参数的异常变化。镜质体反射率 R_o 是指示有机质成熟度的有效指标。当较高温的热流体流入较低温的地层中,必定会导致地层中有机质成熟度的升高。显然在热流体活动影响的地区,镜质体反射率的变化斜率显示明显的异常,且常常具有明显不同的变化斜率。

有机质热解参数也能较好地反映热流体活动。 T_{max} 值是反映有机质热成熟度的重要指标,它对应于干酪根裂解生成最高烃类时岩石热解的温度。 S_1 是在干酪根裂解之前留于岩石中的自由烃含量总和。如果岩石曾遭遇过异常热流体活动,必定导致部分有机质热解生烃,并滞留于孔隙空间,从而构成明显的异常。因此,可利用有机质的热指标参数进行热流体活动示踪分析(解习农等,1999b)。

3.4 成岩作用异常示踪

热流体活动不仅改变了孔隙流体的温度和压力,而且改变了孔隙流体的化学成分,进而影响到岩石的成岩作用。传统成岩作用理论强调埋藏压实作用和温度对成岩作用的控制。近年来许多学者证实热流体活动对成岩作用具有明显的影响(Kupecz *et al.*, 1997; Sharp *et al.*, 2001; Wilkinson *et al.*, 1997)。异常压力体系形成和演化既可通过物理作用影响到体系内砂岩孔隙的保存和破坏,又可通过流体流动引起的化学作用而导致新生矿物沉淀和次生孔隙形成(Gouze and Coudrain-Ribstein, 2002)。Wilkinson *et al.* (1997)通过北海盆地实例证实在超压流体释放带具有很高的孔隙度,这主要是由于长石的溶解产物从砂岩中被带走所形成的次生孔隙。因此,利用成岩矿物的变化可以较好地指示盆地内热流体活动特征。

新生成岩矿物和粘土矿物转换可示踪热流体活动。比如在中浅部的储层中由于天然溴水的渗入可导致长石的高岭石化。粘土矿物转换特别是伊蒙混层的构成和有序性是地史时期古温度的有效标志。蒙脱石向伊利石转换的程度取决于温度、 K^+ 浓度和时间。正常情况下,可根据 I/S 混层的 Reichenweite 有序度值变化情况判断地温梯度。在没有对流热作用地区蒙—伊转换是渐变的过程。而在有对流热作用的地区蒙—伊转换之间存在跃变(Xie *et al.*, 2001)。莺歌海盆地在没有异常热作用的地区蒙—伊转换是渐变的,而在有异常热作用的地区蒙—伊转换之间往往存在突变。底辟区与非底辟区差异很大,同样在底辟区不同底辟构造由于流体活动历史和超压强度不同也有明显差异。

4 油气运移路径及聚集的计算机模拟

Hindle(1997)认为油气运移路径受输导层顶面和封闭层底面的三维几何形态控制,如果盖层为向斜型,对油气运移具有发散作用,如果盖层为背斜或构造脊型,则对油气运移具有聚敛作用,进而形成油气运移的主通道。珠江口盆地沿构造脊长距离运移形成的珠海组油藏就是最好的例证(龚再升等, 2004)。但在异常压力环境下,特别是异常高压环境下,垂向断裂的开启使得超压流体向浅层正常压力带运移,进而导致在浅部储层中油气快速充注。Roberts and Nunn(1996)模拟了北海盆地垂向断裂开

启后不仅断裂带流速和流量发生几个数量级的变化,而且还导致浅部温度压力异常。莺歌海盆地流体模拟也证实垂向断裂的开启构成了超压体系内流体和油气向上运移的主通道,并导致 DF1-1、LD8-1 气田的天然气的快速充注(Hao *et al.*, 2000)。尽管在盆地流体和油气运移路径模拟中一些参数的选取具有诸多不确定性,但计算机模拟为定量描述或刻画在三维空间的油气运移路径提供了有效的工具,从而使我们获得对盆地流体活动和油气运移路径随时间变化的立体的、动态的概念和认识。

5 结语

传统的石油地质理论更多地强调了盆地流体和油气运移过程中流体势的作用,但愈来愈多的证据表明流体势只代表流体运移的可能指向,只有存在配套的流体输导网络和相应的流体运移的动力,才可能成为流体输导路径。尤其是在异常压力条件下,由于系统的封闭性,封闭层的开启才构成流体主要输导通道,也常常是油气运移的主通道。近年来许多地球物理证据和地质证据不断证实异常压力环境下油气运移主通道的存在,而且在这些主通道附近发现大量油气藏。因此,盆地流体特别是异常压力环境下流体活动研究对油气勘探具有重要的指导作用。

流体是地质作用过程中最活跃的因素,尽管人们很难真实地再现盆地流体活动的过程,但随着近十几年来科学技术发展和多学科的综合研究,特别是多种高精度地球物理方法应用,使得研究者能更为有效地识别盆地流体活动过程和油气输导主通道,因而极大提高了勘探的成功率,同时也更为有效地再现了盆地流体动力学过程。

References

- Anderson, R. N., 1993. Recovering dynamic gulf of Mexico reserves and the US energy future. *Oil Gas Journal*, 11: 85—91.
- Belitz, K., Bredehoeft, J. D., 1988. Hydrodynamics of Denver basin: Explanation of subnormal fluid pressure. *AAPG Bulletin*, 72: 1334—1359.
- Bradley, J. S., 1975. Abnormal formation pressure. *AAPG Bulletin*, 59: 957—973.
- Bredehoeft, J. D., Wesley, B., Fouch, T. D., 1994. Simulations of the origin of fluid pressure, fracture generation, and the movement of fluids in the Uinta basin, Utah. *AAPG Bulletin*, 78 (11): 1729—1747.
- Davissou, M. L., Criss, R. E., 1996. Na-Ca-Cl relations in basinal fluids. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60 (15): 2743—2752.
- Dickinson, G., 1953. Geological aspects of abnormal reservoir pressures in Gulf Coast Louisiana. *AAPG Bulletin*, 37: 410—432.
- Fertl, W. H., Chapman, R. E., Hotz, R. F., 1994. Studies in abnormal pressures. *Developments in Petroleum Science*, 38: 454.
- Garven, G., 1995. Continental-scale groundwater-flow and geological processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 89—117.
- Gong, Z. S., Li, S. T., Yang, J. M., et al., 2004. Dynamics of hydrocarbon accumulation in northern South China Sea basins. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Gong, Z. S., Li, S. T., Xie, T. J., 1997. Continental margin basin analysis and hydrocarbon accumulation of the northern South China Sea. Science Press, Beijing, 193—256 (in Chinese).
- Gouze, P., Coudrain-Ribstein, A., 2002. Chemical reaction and porosity changes during sedimentary diagenesis. *Applied Geochemistry*, 17: 39—47.
- Hao, F., Li, S. T., Gong, Z. S., et al., 2000. Thermal regime, interreservoir compositional heterogeneities, and reservoir-filling history of the Dongfang gas field, Yinggehai basin, South China Sea: Evidence for episodic fluid injections in overpressured basins? *AAPG Bulletin*, 84(5): 607—626.
- Hao, F., Cai, D. S., Zou, H. Y., et al., 2004. Overpressure-tectonic activity controlled fluid flow and rapid petroleum accumulation in bozhong depression, bohai bay basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 29(5): 518—524 (in Chinese with English abstract).
- He, S., Middleton, M., Tang, Z. H., 2000. Characteristics and origin of underpressure system in the Shiwu fault depression, south-east Songliao basin, China. *Basin Research*, 12: 147—158.
- Hindle, A. D., 1997. Petroleum migration pathways and charge concentration: A three-dimensional model. *AAPG Bulletin*, 81(9): 1451—1481.
- Hovland, M., Gardner, J. V., Judd, A. G., 2002. The significance of pockmarks to understanding fluid flow processes and geohazards. *Geofluids*, 2: 127—136.
- Hunt, J. M., 1990. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments. *AAPG*

- Bulletin*, 74: 1—12.
- Hunt, J. M., 1996. Petroleum geology and geochemistry. Freeman and Company, San Francisco, 743.
- Jiao, J. J., Zheng, C., 1998. Abnormal fluid pressures caused by erosion and subsidence of sedimentary basins. *Journal of Hydrology*, 204: 124—137.
- Kupecz, J., Gluyas, J., Bloch, S., 1997. Reservoir quality prediction in sandstones and carbonates. *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 69: 1—307.
- Land, L. S., 1995. Na-Ca-Cl saline formation waters, Frio Formation (Oligocene), South Texas, USA; Products of diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(11): 2163—2174.
- Law, B. E., Ulmishek, G. F., Slavin, V. I., 1998. Abnormal pressures in hydrocarbon environments. *AAPG Memoir*, 70: 1—11.
- Neuzil, C. E., 1995. Abnormal pressures as hydrodynamic phenomena. *American Journal of Science*, 295: 742—786.
- Ortoleva, P. J., 1994. Basin compartments and seals. *AAPG Memoir*, 61: 477.
- Parnell, J., 1994. Geofluids: Origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins. Special Publication No. 78, Geological Society, London.
- Parnell, J., 2002. Fluid seeps at continental margins: Towards an integrated plumbing System. *Geofluids*, 2(2): 57—61.
- Roberts, S. J., Nunn, J. A., 1996. Expulsion of abnormally pressured fluids along faults. *Journal of Geophysical Research*, 101(B12): 28231—28252.
- Sharp, J. M., Fenstemaker, T. R., Simmons, C. T., et al., 2001. Potential salinity-driven free convection in a shale-rich sedimentary basin: Example from the Gulf of Mexico basin in south Texas. *AAPG Bulletin*, 85(12): 2089—2110.
- Shi, J. X., 1987. Organic inclusion and its relationship with hydrocarbon. *Science in China (Series B)*, (3): 318—325 (in Chinese).
- Surdam, R. C., 1997. Seals, traps, and the petroleum system. *AAPG Memoir*, 67: 317.
- Varsanyi, I., Kovacs, L. O., 1997. Chemical evolution of groundwater in the River Danube deposits in the southern part of the Pannonian basin (Hungary). *Applied Geochemistry*, 12: 625—636.
- Wilkinson, M., Darby, D., Haszeldine, R. S., et al., 1997. Secondary porosity generation during deep burial associated with overpressure leak-off: Fulmar Formation, United Kingdom Central Graben. *AAPG Bulletin*, 81(5): 803—813.
- Xie, X. N., Jiao, J. J., Tang, Z. H., et al., 2003. Evolution of abnormally low pressure and its implications for the hydrocarbon system in the southeast uplift zone of Songliao basin, China. *AAPG Bulletin*, 87(1): 99—119.
- Xie, X. N., Li, S. T., Dong, W. L., et al., 1999a. Overpressure development and hydrofracture in the Yinggehai basin, South China Sea. *Journal of Petroleum Geology*, 22(4): 437—454.
- Xie, X. N., Li, S. T., Dong, W. L., et al., 1999b. Trace marker of hot fluid flow and their geological implications—A case study of Yinggehai basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(2): 183—188 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. N., Li, S. T., Dong, W. L., et al., 2001. Evidence for hot fluid flow along faults near diapiric structure of the Yinggehai basin, South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 18(6): 715—728.
- Xie, X. N., Li, S. T., He, H., et al., 2003. Seismic evidence for fluid migration pathways from an overpressured systems in the South China Sea. *Geofluids*, 3(4): 245—253.
- Xie, X. N., Wang, C. Y., Li, S. T., 1998. Hydrofracturing and episodic compaction in low permeable muddy rocks of sedimentary basin. *Chinese Science Bulletin*, 43(8): 666—670.
- Zhang, Q. M., Liu, F. N., Yang, J. H., 1996. Overpressure system and hydrocarbon accumulation in the Yinggehai basin. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 10(2): 65—75 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 龚再生, 李思田, 杨甲明, 等, 2004. 南海北部大陆边缘盆地成藏动力学研究. 北京: 科学出版社.
- 龚再生, 李思田, 谢泰俊, 1997. 南海北部大陆边缘盆地分析与油气聚集. 北京: 科学出版社, 193—256.
- 郝芳, 蔡东升, 邹华耀, 等, 2004. 渤中坳陷超压—构造活动联控型流体流动与油气快速成藏. 地球科学——中国地质大学学报, 29(5): 518—524.
- 施继铎, 1987. 有机包裹体及其与油气的关系. 中国科学(B辑), (3): 318—325.
- 解习农, 李思田, 董伟良, 等, 1999b. 热流体示踪标志及其地质意义—以莺歌海盆地为例. 地球科学——中国地质大学学报, 24(2): 183—188.
- 张启明, 刘福宁, 杨计海, 1996. 莺歌海盆地超压体系与油气聚集. 中国海上油气, 10(2): 65—75.