

文章编号: 1000-0550(2009)05-0863-09

沉积盆地流体活动及其成岩响应¹

解习农¹ 成建梅² 孟元林³

(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)生物地质与环境地质教育部重点实验室 武汉 430074 3. 大庆石油学院 黑龙江省大庆 163318)

摘要 盆地流体活动通过改变成岩场的温压和孔隙水介质条件,进而影响到盆地内成岩作用序列、水-岩相互作用以及储层孔隙变化。对于碎屑岩而言,流体活动仅能导致母岩中少部分矿物的溶蚀以及孔隙内溶解与沉淀作用发生,富含二氧化碳和有机酸的流体活动为次生孔隙发育提供条件,超压环境下流体幕式释放既可导致超压体内次生孔隙的发育,又可以导致热流体活动影响区域内浅部储层的成岩异常;对于碳酸盐岩而言,由于碳酸盐岩具有很强的溶解性,盆地流体活动导致碳酸盐岩储层组构及空间发生巨大的变化,其中天水的下渗以及与深部热液或热流体沿断裂或裂缝释放均可导致碳酸盐岩成分、组构、储集空间发生根本性变化,故与盆地流体活动密切相关的风化壳型岩溶储层和构造热液白云岩储层构成碳酸盐岩中最为重要的储层类型。然而,盆地流体活动及其成岩响应研究仍存在许多亟待解决的难点问题,急待深入的研究探索。

关键词 盆地流体 成岩作用 水-岩相互作用 异常流体压力

第一作者简介 解习农 男 1963年出生 教授 博士生导师 盆地动力学 E-mail: xxnie@cug.edu.cn

中图分类号 P512.2 P588.2 文献标识码 A

盆地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之一。沉积盆地的油气生成、运移和成藏过程与盆地流体活动有着密切关系,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^[1]。20世纪90年代以来,由于地质流体研究取得了一系列突破性进展,使人们从根本上改变了以往的传统看法,由此盆地流体研究及其对成藏成矿规律的控制受到人们广泛的重视^[2-4]。沉积盆地成岩作用旨在对地下相对高温高压条件下沉积岩石物理特性变化和水-岩相互作用的研究,早期研究偏重于静态成岩作用研究,而近年来随着盆地流体研究的深入,人们开始注意到盆地流体活动对成岩作用的影响,尤其是异常压力环境下流体活动规律及其相应的成岩响应成为人们十分关心和研究的热点问题^[5-11]。尽管人们在异常压力体系中成岩作用及其对储层物性影响等方面取得了一些成果,但有关异常压力环境下流体活动规律、成岩作用及其对储层孔隙变化影响仍存在许多亟待解决的问题。本文旨在通过盆地流体及其成岩响应方面研究现状的总结,引起国内同行的重视,以期深化盆地流体动力学理论和认识,推动我国盆地流体研究。

1 盆地流体流动驱动因素及基本特征

1.1 盆地流体流动样式及其驱动机制

一般而言,沉积盆地中最常见两种流体流动样式,即压力流和热对流。压力流是由于孔隙流体间压力差而导致流体从高压区向低压区的流动。最重要的驱动力包括:沉积压实、浮力、地形重力、构造应力和地震泵析。压实驱动、地形驱动和构造应力驱动是沉积盆地内的主要流体流动驱动机制。热对流则是由于流体间温度差存在而导致流体循环流动,由于热对流受岩性影响非常大,往往容易形成局部流体系统,这种热对流活动不仅可以导致成熟异常和物质的迁移,而且对岩石的成岩作用也可以产生重要的影响^[12]。

沉积盆地中最常见的流体循环样式有压实和超压驱动型、重力和地形驱动型、构造应力和地震泵析驱动型以及热驱动型等流体循环样式。大量研究成果表明,在不同类型盆地,甚至同一盆地不同演化阶段具有不同的流体循环样式或流体流动方向,如构造应力驱动最常见于前陆盆地,超压体系驱动最常见于裂谷等快速深沉降盆地^[13],同一盆地不同演化阶段

¹ 国家自然科学基金项目(批准号:40872076 40772154)和教育部分新世纪优秀人才支持计划项目(批准号:NCET-06-0659)、湖北省自然科学基金重点项目(编号:2008CDA095)的成果。

收稿日期:2009-09-03

也可以具有不同的盆地流体循环样式和流动方向,如 A Berta 盆地不同历史时期可具有完全相反的流体流动方向^[14]。此外,盆地流体循环样式并不一定是单一的样式,可能是一个复合的流体系统,包括多个互相关联而又各具特色的流体循环系统。它受盆地地球动力学背景、盆地构造、沉积充填、热史及水文体制等因素的控制。

1.2 异常压力环境下盆地流体活动特点

异常压力体系中流体活动机制取决于异常压力体系的保持和破坏。异常压力体系的保持是一个动态演化过程,也就是异常压力体系的增压和泻压的动态平衡过程;而后者则涉及盖层和封堵条件,盖层的破坏和封堵能力的改变必定会导致封存压力箱内异常压力变化。异常压力体系的保存和破坏受控于系统的封闭性和开启性。异常压力环境下盆地流体活动具有如下特点: ①异常压力体系的形成意味着系统具有一定的封闭性,限定了盆地流体活动,特别是体系内与体系外流体的交换; ②异常压力环境下盆地流体活动通常随着封闭层多次开启和封闭具有幕式活动的特点^[15, 16],比如幕式构造活动导致断裂多次幕式开启和封闭,流体异常超压导致封闭层幕式流体压裂^[17]; ③异常压力体系的保持和破坏随盆地发生、发展而发生变化,比如松辽盆地东南隆起带中生代裂陷盆地在白垩纪之前形成超压体系,而白垩纪之后由于盆地抬升剥蚀形成低压体系,相应地中、新生代形成了 2 种不同流动方向且方向相反的流体流动样式^[18]。

2 碎屑岩沉积区流体活动对成岩作用影响

孔隙流体对砂岩储层成岩作用和成岩演化的影响主要涉及砂岩成岩过程中的地球化学变化,如成岩矿物变化与水岩反应关系;成岩反应中储层渗透率和孔隙度变化;烃类充注对成岩作用的影响等。

2.1 盆地流体流动对成岩作用影响

碎屑岩成岩作用主要包括压实作用、自生矿物的形成作用、重结晶作用、胶结作用和溶解作用等,其中压实作用是随着上覆沉积物重量的增加而使岩石颗粒重新排列使得孔隙变小的机械作用的结果,即物理成岩作用;而化学成岩作用包括自生矿物的形成、重结晶、胶结和溶解等成岩反应在内的成岩作用,在成岩过程中,随着埋深的增加,成岩作用一方面使沉积盆地中原始的沉积物脱水压实;另一方面,在不断增

加的温度压力条件下,发生水岩反应强烈地改造原始沉积物的矿物组成,同时也改变了地层流体的化学性质。实际上成岩过程中的水-岩相互作用是地下一定温压条件下孔隙水的化学组分与储层矿物间的一种化学平衡作用,而盆地流体活动则通过改变孔隙水介质而影响其成岩反应。在成岩过程中,矿物相的转化经常发生,如碎屑长石可以被钠长石、方解石或其它的矿物相交代;风化作用过程中所形成的粘土矿物及残余的层状硅酸盐在成岩作用过程中会转变为自生富伊利石的伊/蒙混层和绿泥石。成岩作用强度受埋藏深度、古地温场、埋藏时间三个因素的控制,它直接决定了水岩反应的强度,从而导致在不同成岩阶段成岩矿物组合的巨大差异。同时,沉积盆地成岩过程的流体活动也影响到体系内砂岩孔隙的特性,流动引起的化学成岩作用会导致新生矿物沉淀和次生孔隙形成,如楼章华等指出不同孔隙水成因的局部水动力单元是决定松辽盆地扶扬油层砂岩成岩相类型的重要因素之一,而且各种成岩相特征、自生矿物组合、孔隙成因与孔隙组合都有明显的差别^[19]。因此,反过来利用成岩矿物的变化可以较好地指示盆地内流体活动特征。

2.2 异常压力环境下流体流动对成岩作用的影响

在异常压力环境下,环境的封闭性使得异常压力体系内构成一个与常压环境不同的流体体系,而且一旦异常压力体系的封闭层破裂,超压体系内流体突破必定导致异常压力体系内外物理和化学条件的变化,同时也打破原有水-岩相互作用的化学反应平衡,进而溶解或沉淀新的成岩矿物。

超压对成岩作用的影响大体上可以分为两类,一是通过减轻有效压力来抑制或阻止机械压实对骨架砂体孔隙的破坏,具体表现为减缓物理成岩作用并保存大量的原生孔隙;二是通过改变胶结、溶蚀和自生矿物沉淀等化学成岩作用的温压反应条件来影响成岩反应。地层中的水-岩-烃相互作用是一个复杂的物理化学反应过程,其中的各种成岩矿物、沉积有机质及地层水等既是反应物也是生成物,在特定的温压环境下,这些物质在地质流体溶液中得到溶解和沉淀(重结晶)的动态平衡。但是在地质历史时期,地层中的温度和压力随埋深不断变化,甚至整个系统也不是全封闭的,在抬升剥蚀或有断层作为输导通道的情况下,将会有地表流体或深部流体进入系统,因此,地层中的水-岩-烃相互作用过程研究是一个复杂的系统问题。

异常压力环境下成岩场特征是当今盆地流体研

究中的薄弱环节。成岩场是成岩系统所赖以存在环境的物理化学参量和空间展布, 成岩场及其时空演化制约着成岩作用的属性和强度^[20]。运用成岩场的观点来研究储层特征, 更能从整体和演化的角度剖析控制储层性能变化的主导因素及时空结构, 并更有效地对储层质量进行预测。不同盆地成岩场决定了盆地内成岩作用序列、水—岩相互作用以及储层孔隙变化^[21~25]。岩石学和同位素分析方法被广泛应用于成岩作用研究, 通过多期成岩产物判断流体活动期次^[26], 同时各种水—岩相互作用和成岩反应对孔隙空间具有明显的影响^[27~31]。不同压力环境, 尤其是异常高压环境下成岩场具有其独特性, 正是由于不同压力环境的成岩作用差异使得储层孔隙变化与常压环境具有很大的差异。

3 碳酸盐岩沉积区流体活动对成岩作用影响

碳酸盐岩是一种溶解性很强的可溶性岩石, 自其沉积作用结束就开始沉积成岩、溶蚀破坏、溶蚀充填、溶蚀改造等漫长的多期溶解与沉淀成岩作用。影响碳酸盐岩的主要成岩作用是泥晶化作用、溶解作用、胶结作用、压实和压溶作用、重结晶作用、白云化作用和交代作用。其成岩作用的程度主要是由溶解和沉淀的碳酸盐矿物的热动力学稳定性和成岩流体的饱和状态以及可提供的反应表面空间所决定^[32]。相比碎屑岩而言, 碳酸盐岩成岩作用更为复杂多样, 盆地流体活动对碳酸盐岩改造更为突出。与碎屑岩不同的是碳酸盐沉积物的成岩作用在接近地表或近地表情况下就可以开始。按照成岩环境可以划分为大气淡水渗流、大气淡水潜流、海水潜流(包括浅海和深海海底)以及埋藏环境。由于不同成岩环境中特殊的水化学条件形成程度不等的胶结作用、溶蚀作用以及不同水—岩相互作用样式。在地质历史时期, 碳酸盐岩可以受到中深成岩和表生成岩的多次影响和改造。

大部分碳酸盐岩储集孔隙都是由近地表溶解、早期和晚期白云化以及埋藏裂缝等各种成岩作用所形成^[32]。其中, 与盆地流体活动密切相关的风化壳型岩溶储层和构造热液白云岩储层构成碳酸盐岩中最重要的储层类型。前者与天水的下渗有关, 后者与深部热液或热流体活动有关。

3.1 与风化壳(不整合)相关的流体活动对成岩作用的影响

碳酸盐岩沉积之后, 由于海平面的升降以及构造

活动等因素导致碳酸盐岩直接出露地表或出露到大气水能改造的范围内, 这样受大气水中溶解 CO_2 形成的碳酸溶解而形成形态、组构各异的碳酸盐岩。通常情况下, 暴露不整合之下碳酸盐岩可划分为三个带, 由上而下依次为: 垂直渗流带、水平潜流带和深部缓流带^[33]。(1)垂直渗流带常位于不整合面与最高潜水面之间, 常常沿各种裂缝(如风化缝和构造缝)形成一些以垂直方向为主的溶孔、溶缝、侵蚀沟和孤立的落水洞等;(2)水平潜流带位于枯水期的最低潜水面之下, 距侵蚀面一般 30~200 m, 厚度与补给区高程有关, 以发育大量的溶洞和溶孔为主, 在潜水面附近;(3)深部缓流带位于水平潜流带下, 最大底界深度是岩溶作用的下限, 一般可达不整合面下 300 m 左右。该带仅见一些小型溶孔和零星溶缝, 胶结作用较明显。

碳酸盐岩岩溶储层的发育及空间展布特征受着多种因素的制约, 不同因素对岩溶储层形成和发育的影响不同。影响碳酸盐岩岩溶发育的因素有很多, 如古气候、海平面的升降以及构造活动等^[34]。其中, 构造不整合面决定古地下水流平衡面、地下水的深度及活动范围, 其中水动力场对碳酸盐岩岩溶发育起到了极其重要的作用, 尤其是风化壳岩溶。研究表明, 不整合面对岩溶发育的控制主要体现在两个方面, 一是古构造所形成的不整合面形态; 二是古构造形成不整合面的强度^[33]。

3.2 断裂带流体活动对成岩作用的影响

断裂带流体活动十分发育, 一方面断裂带可能有多种流体来源, 除了大气降水之外, 岩石成岩、变质及剪切加热造成的矿物脱水也可能是浅层活动断裂带流体的一个来源, 深源岩浆排出的流体或幔源流体也是断裂带流体可能的来源, 另一方面深大断层经常是流体运移的通道和储集场所。深大断裂带是地壳流体释放的主要部位之一, 特别是在构造活动强烈期及地震活动时期。因此, 与碎屑岩相比, 断裂带附近碳酸盐岩受流体活动及其影响更为明显, 其突出进展体现在构造热液白云岩化(structurally controlled hydrothermal dolomitization, 简称为 HTD)。它是指来自于深部富镁热液(特别是卤水)沿活动断裂快速流入浅层导致浅部碳酸盐岩交代形成白云岩过程^[35]。所谓热液是指高于围岩至少 5℃ 以上的深部流体^[36]。这种热液流体活动受拉张、张扭或走滑断裂作用控制, 通常在拉张断裂的上盘、拉张断裂与走滑断裂的交汇部位以及走滑—拉分断裂膨大弯曲带构成热液矿化

和白云石化的有利部位。自这一概念提出以来受到石油地质学家的广泛关注^[35, 37, 38]。热液白云岩储层构成北美地区最为重要的油气储层。

此外,伴随岩浆—火山作用的热液活动同样对碳酸盐岩产生明显的影响。深部流体除对碳酸盐岩产生显著的溶蚀作用外,还能在一些溶蚀孔隙或裂缝中沉淀出不同类型的矿物或矿物组合^[39, 40],使已有的孔隙空间被部分地充填或完全地充填。在塔里木盆地地下古生界碳酸盐岩溶蚀裂隙中常见的充填矿物组合有萤石—石英组合、闪锌矿—绿泥石—方解石组合、重晶石—石英—菱铁矿—黄铁矿组合等^[41]。对碳酸盐岩储层改造起到建设性作用的主要是溶蚀作用和交代作用^[42]。正是由于与火成岩相关的热液流体活动对灰岩和白云岩的溶蚀作用和交代作用,从而构成了塔里木盆地继风化壳岩溶之后的另一类重要碳酸盐岩储层^[41]。

4 盆地流体活动对储层物性的影响

4.1 盆地流体活动对储层改造

盆地流体活动通过改变成岩场的温压和孔隙水介质条件,进而影响到盆地内成岩作用序列、水—岩相互作用以及储层孔隙变化^[21~25]。多期流体活动通过各种水—岩相互作用和成岩反应对孔隙空间产生明显的影响,其中,沉积有机质热成熟作用产生的二氧化碳和有机酸等成岩溶剂参与的化学反映对孔隙体积改变具有较大的影响^[43],有机酸和二氧化碳的分布与次生孔隙发育紧密相关,有些学者由此建立的成岩反应途径已用于预测砂岩成岩作用和有利孔隙

度带的分布^[44]。

盆地流体活动对储层的改造表现为 2 个方面,不利的一面是流体的充注导致物性条件变差,比如地形差异驱动的地下水流动使砂岩的成岩作用强化,胶结作用增强^[45~49],从而使得储层孔隙度和渗透率明显降低。有利的一面是流体活动导致储层次生孔隙发育。热流体对储层物性改造与流体的化学成分有关^[50],在渤海湾盆地东营凹陷平方王油气田,高温热流体的上涌不仅改变了原来的热传导温度场,导致在深部发生的一些有机/无机相互作用在浅部出现,而且随着热流体的上涌,使一些高温无机物质,尤其是无机 CO₂ 流体进入浅部砂岩层,使沙四段上部的礁灰岩和部分碳酸盐胶结物溶解,导致次生溶孔十分发育,孔隙度可高达 35%~42%。渤海湾盆地文安斜坡的研究进一步表明^[51],热流体活动对成岩环境和储层物性的改造还决定于热流体的温度(图 1)。在 2 730~3 400 m 深度范围内,由于热流体的活动,加速了有机质的热演化,有机质热降解的同时,产生大量有机酸和 CO₂,形成有机酸性热流体,溶蚀储层中的铝硅酸盐和碳酸盐矿物,形成次生孔隙, R_o% 和储层孔隙度同时出现正异常。而在 4 550~4 960 m 深度范围内, R_o% 高达 4.5%,如此高的有机质成熟度是岩浆热接触变质作用所致。由于过高的有机质成熟度和地温使干酪根降解生成的有机酸裂解为 CO₂,储层没有受到严重的溶蚀,所以 R_o% 的高值段所对应的储层并没有出现异常高孔隙度,储层异常高孔隙段出现在有机质成熟度和温度相对较低的热接触变质带上方地层中。

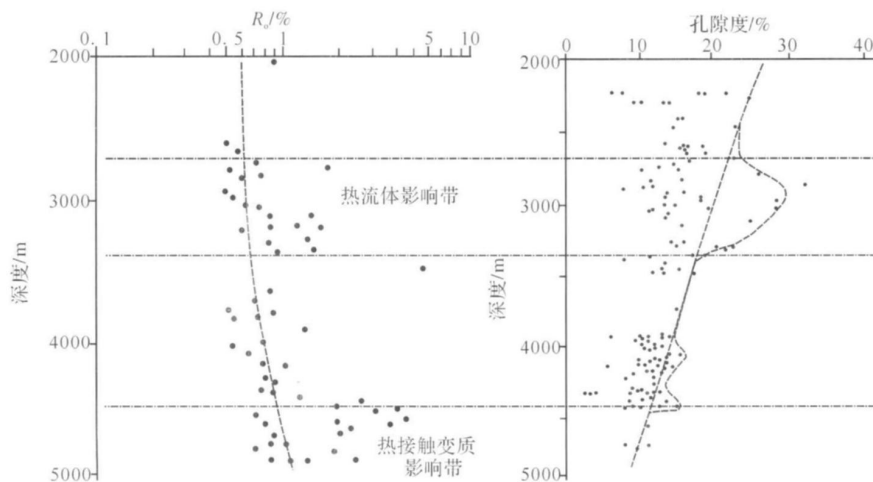


图 1 渤海湾盆地文安斜坡石炭—二叠系有机质热演化异常与储层异常高孔隙发育带对比图

Fig. 1 Relationship between the abnormally high maturity of organic matter and abnormally high porosity of reservoir yielded by hot fluid in Carboniferous-Pennsylvanian strata of the Wen'an slope, the Bohaiwan Basin

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^[52, 53]。对于异常压力体系(包括高压和低压)而言, 通常包括两类流体系统, 即半开放型流体系统和封闭型流体系统。半开放型流体系统中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^[54]。国内外许多学者描述了在砂岩深埋期间次生孔隙形成时产生的岩石学特征, 并由此推测出引起矿物溶解的原因^[55, 56]。由于在深埋藏期间大量的溶解物质要从砂岩中排出非常困难, 所以一些学者认为大量的次生孔隙形成于浅埋藏期间, 也就是由于大气水的淡化作用并且在开放系统中将溶解物质带走。异常压力体系的形成无疑阻碍了流体流动, 也不利于溶解物质的迁移。所以有些学者认为在深埋藏砂岩中尽管某些矿物的溶解产生次生孔隙, 但往往由自生矿物沉淀充填来保持平衡, 这一过程仅仅是孔隙的再分配。而超压流体囊幕式释放理论显然提出了一种新的溶解搬运模型, 也为深埋藏的超压体系内砂岩储层次生孔隙形成提供一个新模型。Wilkinson等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孔隙中被带走并形成次生孔隙^[57]。对于封闭型流体系统而言, 由于封闭层的存在阻止了地层内上升流和下降流形成的流体流动, 这时流体运动的主要形式为热循环对流。20世纪80年代初Wood等计算了热对流在倾斜多孔层中的流速^[58], Bjørlykke等利用计算机对热对流发生的条件进行了模拟, 并指出了易于发生热对流的地质背景^[59]。试验表明, 如果发生瑞利对流, 将对成岩产生积极、快速的影响。热对流一直被认为是穿过地下岩层溶质运移的机理之一^[60]。纪友亮等通过东濮凹陷实例分析证实由于热循环对流导致成岩圈闭的形成^[61]。刘立等也强调热对流对成岩作用和油气运移的影响^[62]。Sharp等利用盐度资料和数字模拟证实墨西哥湾盆地异常高压带内热对流存在^[63]。这些研究成果表明热对流对储层非均质性和水-岩相互作用具有明显的影响。

4.2 深层碎屑岩储层次生孔隙发育的主要控制因素

对于碎屑岩储层而言, 其储层物性随埋深的增大孔隙度和渗透率明显减小, 但越来越多的勘探证实深埋藏(> 3 500 m)的砂岩储层在一些特定情况下可以保持异常高的孔隙度和渗透率。最为常见的 4 种成

因机制^[64]: ① 早期烃类的充注^[65]; ② 颗粒包层(或颗粒包膜)和颗粒环边的存在^[66]; ③ 异常高压的存在^[67]; ④ 次生孔隙的发育^[57]。这些成因机制大多与盆地流体活动相关, 烃类早期充注有效地减缓或阻止孔隙内自生胶结物的生成, 比如早期油气充注以及高含油饱和度对石英等胶结物有明显的抑制作用^[68]。异常高压形成、次生孔隙发育均与盆地流体活动密切相关。

近十多年来, 我国石油公司和国家科技部专门立项开展了我国东部盆地深层次生孔隙发育带的成因和分布分析。研究表明, 我国大多数盆地深层主要发育酸性流体溶蚀形成的次生孔隙^[69], 仅在南襄盆地泌阳凹陷等少数盆地发育有碱性流体溶蚀形成的次生孔隙^[70]。影响深层碎屑岩储层次生孔隙形成的地质因素有很多, 常见的有烃源岩的生烃潜力、泥岩的产酸能力、加热速率、沉积速率、超压、粘土矿物脱水、烃类热演化、硫酸盐还原、储层岩性和沉积相等^[71~78]。但从溶解反应的化学机理上讲, 溶解作用取决于溶剂(酸性流体)、溶质(铝硅酸盐矿物和碳酸盐矿物)以及被溶解的物质能否及时排出。由于深层碎屑岩储层中长石颗粒和碳酸盐胶结物的含量均较高, 所以影响次生孔隙形成的主要因素归纳起来有两个: (1) 溶蚀储层的酸性流体, (2) 溶解物质能否被排出储层, 并使溶蚀作用继续进行。

研究表明, 泥岩的产酸能力主要取决于泥岩的厚度、有机质丰度、类型和成熟度, 前三者决定有机质的产酸潜力, 后者决定有机酸的生成时间。一般情况下, $R_o = 0.35\%$ 时, 有机质开始脱羧, 形成有机酸和 CO_2 , 随埋深和地温的增加, 有机酸的生成量逐渐增大, 但到深层, 当有机质成熟度太高时, 泥岩中的有机质脱羧结束, 有机酸的生成也就停止。于是, 人们通过系统测定泥岩中总剩余有机酸的含量(或有机 CO_2), 确定深层次生孔隙发育带的深度下限^[71, 79]。由于超压可以抑制有机质的热演化, 所以在超压发育区, 有机酸的生成和次生孔隙发育带的发育可以延长到更深的层段^[80](图 2 图 3)。渤海湾盆地歧口凹陷的歧南 2 井和港深 48 井分别位于南大港断裂带的两侧, 二者的地层相近, 但由于沉积速率的差异, 压力状态不同, 压力系数分别为 1.0 和 1.2~1.6。由于超压抑制了有机酸的生成, 歧南 2 井和港深 48 井泥岩剩余总有机酸含量的高峰分别为 3 243 m 和 3 843 m, 二者相差 600 m; 相应地主要次生孔隙发育带的深度也出现了下移, 歧南 2 井和港深 48 井最主要的两

个次生孔隙发育带的深度分别为 3 110 m 和 3 690 m, 二者相差 580 m,

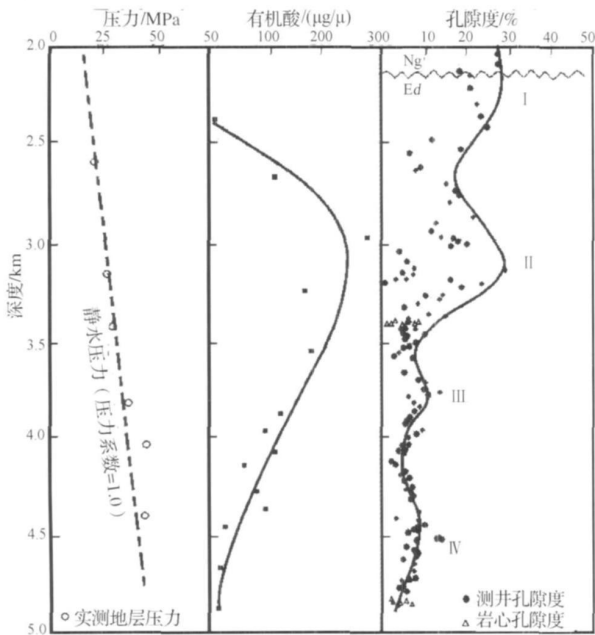


图 2 歧口凹陷歧南 2 井有机酸和孔隙度剖面图

Fig. 2 Comparison of organic acid and porosity in the well No. 2 of the Qikou Depression

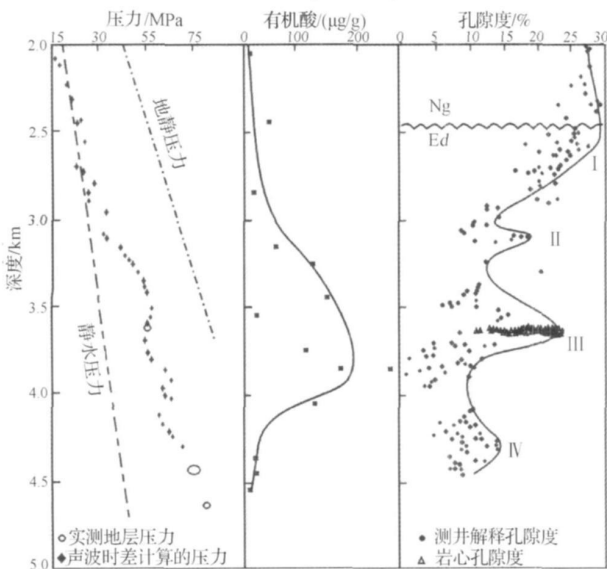


图 3 歧口凹陷港深 48 井有机酸和孔隙度剖面图

Fig. 3 Comparison of organic acid and porosity in the well No. 48 of the Qikou Depression

泥岩生成的有机酸进入储层之后, 溶蚀其中的铝硅酸盐矿物和碳酸盐矿物, 形成次生孔隙, 同时产生高岭石等自生矿物, 如果这些自生矿物不能及时排出, 就会堵塞孔隙, 使溶蚀作用不能继续进行。原始物性好的储层, 其渗透能力强, 有机酸的运移和溶解

物质的排出就相对容易, 次生孔隙就发育较好。也就是说, 原生孔隙发育的储层, 次生孔隙也发育。在渤海湾盆地辽河拗陷的统计表明^[72], 在扇三角洲-湖泊沉积体系中, 次生孔隙带主要形成于河口坝、辫状分流河道砂体中, 而且这些砂体有着共同的岩石学特征-均为结构成熟度和成分成熟度较高的砂岩, 矿物成份中长石含量平均 > 30%, 几乎全部为长石砂岩, 而且以细砂岩为主, 次为中砂岩。碎屑颗粒分选良好, 分选系数的平均值 < 1.76。造成这种现象的主要原因是: (1) 长石砂岩的长石含量高, 为次生孔隙的形成奠定了物质基础, (2) 细砂岩的粒度细, 每单位体积内颗粒之间的接触点要比粗砂岩多, 给予接触点上的压力比粗砂小, 颗粒不易发生转动和移动, 抗压能力强^[81], (3) 分选好的砂岩原始物性好^[82], 有利于有机酸的运移和溶解物质排出。

5 存在问题及研究展望

盆地流体活动通过岩石温压条件、孔隙水介质条件的改变而打破原有水-岩相互作用的平衡及其相应的成岩环境, 进而对成岩作用产生明显影响。盆地流体, 特别是异常压力环境下盆地流体活动是当前国内外研究的前沿课题, 已经取得了丰富的研究成果, 但不同压力环境下流体活动规律及其成岩效应的研究仍十分薄弱, 还存在很多科学难题等待解决, 这也是盆地流体活动及其成岩响应研究今后可能的发展方向。

(1) 异常压力环境中流体活动的成岩响应。国内外许多学者在砂岩深埋期间次生孔隙形成时产生的水-岩反应存在许多争议。已有成果表明超压流体囊幕式释放可以导致浅部储层的成岩异常, 比如莺歌海盆地中央底辟带浅层伊蒙转换异常就与热流体幕式突破有关^[83]。异常压力环境下流体活动对成岩作用的影响仍不十分清楚。如何寻找有效的方法判断古流体活动成为盆地流体动力学研究的关键, 而岩石的成岩作用记录则可能提供了许多相关信息。

(2) 异常压力环境下流体活动对储层物性影响。储层物性影响因素较多, 而盆地流体活动随盆地形成演化而发生变化, 因此, 必须从动态和演化角度来探索成岩作用及其储层物性的变化, 需要运用成岩场的观点来研究储层特征, 这样才能从整体和演化的角度剖析控制储层性能变化的主导因素及时空结构。特别是从盆地流体和压力系统演化的角度, 探讨盆地内成岩作用序列、水-岩相互作用以及储层孔隙变化,

从而更合理和准确地预测储层孔隙变化。

(3) 碳酸盐岩沉积区多幕流体活动及其成岩响应。我国海相地层分布十分广泛, 与世界主要海相碳酸盐岩含油气盆地不同是我国海相碳酸盐岩形成于多个原型盆地叠置的叠合盆地, 且大多经历了多幕构造改造。尽管我国学者在盆地构造演化及风化壳构成研究方面取得了大量成果, 但与这些构造幕相关的流体活动及其对碳酸盐岩储层改造研究还很薄弱, 因此, 加强碳酸盐岩沉积区流体活动及其成岩响应研究尤为重要。

参考文献 (References)

- Pamell J. Geofluids: origin, migration and evolution of fluids in sedimentary basins. Geological Society [M]. London: Special Publication, 1994: 78]
- 卢焕章. 成矿流体 [M]. 北京: 科学技术出版社, 1997: 1-120
- 金之钧, 张刘平, 杨雷, 等. 塔里木盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2002, 27(6): 659-665
- Hao Fang, Zou Huayao, Gong Zaisheng, *et al.* Petroleum migration and accumulation in the Bozhong sub-basin, Bohai Bay basin, China: Significance of preferential petroleum migration pathways (PPMP) for the formation of large oilfields in lacustrine fault basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 2007, 24(1): 1-13
- Hunt JM. Generation and migration of petroleum from abnormally pressured fluid compartments [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74, 1-12
- Neuzil C.E. Abnormal pressures as hydrodynamic phenomena [J]. American Journal of Science, 1995, 295, 742-786
- 焦大庆. 含油气盆地流体演化研究 [M]. 北京: 石油工业出版社, 1998: 1-178
- 康永尚, 张一伟. 油气成藏流体动力学 [M]. 北京: 地质出版社, 1999
- 马启富, 陈思忠, 张启明. 超压盆地与油气分布 [M]. 北京: 地质出版社, 2000
- Xie Xinong, Jiao Jiu Jimmy, Li Sitian, *et al.* Salinity variation of formation water and diagenesis reaction in abnormally pressured environments [J]. Science in China D Series, 2003, 46(3): 437-454
- Flemings P B, Lipka J A. Pressure prediction in the Bullwinkle Basin through petrophysics and flow modeling (Green Canyon 65, Gulf of Mexico) [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 1311-1322
- Wood D C, Hewett T A. Forced fluid and diagenesis in porous reservoirs: controls on spatial distribution roles of organic matter in sediment diagenesis [J]. SEPM, 1984: 73-83
- Garven G. Continental scale groundwater flow and geologic process [J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 1995, 23: 89-117
- Corbett T F, Bethke C M. Disequilibrium fluid pressures and groundwater flow in the Western Canada sedimentary basin [J]. Journal of Geophysical Research, 1992, 97, 7203-7217
- Roberts S J, Nunn J A. Episodic fluid expulsion from geopressed sediments [J]. Marine and Petroleum Geology, 1995, 12(2): 195-204
- Screaton E J, Saffer D M. Fluid expulsion and overpressure development during initial subduction at the Costa Rica convergent margin [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(3-4): 361-374
- Xie Xinong, Li Sitian, Dong Weiliang, *et al.* Overpressure development and hydrofracture in the Yinggehai Basin, South China Sea [J]. Journal of Petroleum Geology, 1999, 22(4): 437-454
- Xie Xinong, Jiao Jiu Jimmy, Tang Zhonghua, *et al.* Evolution of abnormally low pressure and its implications for the hydrocarbon system in the Southeast Uplift zone of Songliao Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2003, 87(1): 99-119
- 楼章华, 姚炎明, 金爱民, 等. 松辽盆地地下流体地球化学特征研究 [J]. 矿物学报, 2002, 22(4): 343-349
- 孙永传, 李忠, 李惠生, 等. 中国东部含油气断陷盆地的成岩作用 [M]. 北京: 科学出版社, 1996: 1-112
- 蔡春芳, 梅博文, 马亭. 塔里木盆地流体-岩石相互作用研究 [M]. 北京: 地质出版社, 1997
- 寿建峰, 朱国华. 砂岩储层孔隙保存的定量预测研究 [J]. 地质科学, 1998, 33(2): 244-250
- 曾溅辉, 王捷. 油气运移机理及物理模拟 [M]. 石油工业出版社, 2002
- Nygaard R, Gutierrez M, Gautam R, *et al.* Compaction behavior of argillaceous sediments as function of diagenesis [J]. Marine and Petroleum Geology, 2004, 21(3): 349-362
- 孟元林, 牛嘉玉, 肖丽华, 等. 歧北凹陷沙二段超压背景下的成岩场分析与储层孔隙度预测 [J]. 沉积学报, 2005, 23(3): 389-396
- Bjørlykke K, Gran K. Salinity variations in North Sea formation waters: implications for large-scale fluid movements [J]. Marine and Petroleum Geology, 1994, 11(1): 5-9
- 朱国华, 章卫平. 煤系地层砂岩成岩作用和孔隙演化研究——以长广地区龙潭组为例 [J]. 石油勘探与开发, 1993, 20(1): 39-47
- 黄思静, 杨俊杰, 张文正, 等. 不同温度条件下乙酸对长石溶蚀过程的实验研究 [J]. 沉积学报, 1995, 1: 7-17
- 朱抱荃, 程中第, 应凤祥. 地层干酪根有机酸与储层次生孔隙的关系 [J]. 石油实验地质, 1996, 18(2): 206-215
- 顾家裕. 塔里木盆地储层特征与高孔隙度、高渗透率储层成因 [J]. 科学通报, 2002, 47(增刊): 9-15
- Scotchman I C, Carr A D, Austin T R, *et al.* Pore fluid evolution in the Kimmeridge clay formation of the UK outer moray firth: Implications for sandstone diagenesis [J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(3): 247-273
- Figel E. Microfacies of Carbonate Rocks [M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2004
- 陈新军, 蔡希源, 纪友亮, 等. 塔中奥陶系大型不整合面与风化壳岩溶发育 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2007, 35(8): 1122-1127
- 顾家裕. 塔里木盆地轮南地区下奥陶统碳酸盐岩岩溶储层特征

- 及形成模式 [J]. 古地学报, 1999, 1(1): 54
- 35 Davies G R, Smith L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview [J]. AAPG Bulletin, 90(11): 1641-1690
- 36 White D E. Thermal waters of volcanic origin [J]. Geological Society of America Bulletin, 1957, 68: 1637-1658
- 37 Radke B M, Mathis R L. On the formation and occurrence of saddle dolomite [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1980, 50(4): 1149-1168
- 38 Kretz R. Carouse model for the crystallization of saddle dolomite [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1992, 62(2): 190-195
- 39 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
- 40 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地深部流体对碳酸盐岩储层影响 [J]. 地质评论, 2008, 54(3): 348-354
- 41 金之钧, 胡文瑄, 张刘平, 等. 深部流体活动及油气成藏效应 [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 1-150
- 42 吕修祥, 解启来, 杨宁, 等. 塔里木盆地深部流体改造型碳酸盐岩油气聚集 [J]. 科学通报, 2007, 52(增刊 IV): 142-148
- 43 Surdan R C, Crossey L J, Lahann R. Mineral oxidants and porosity enhancement [J]. AAPG Bulletin, 1984, 68(4): 532-532
- 44 Surdan R C, Crossey L J, Hagen E S, et al. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. AAPG Bulletin, 1989, 73(1): 1-23
- 45 Hulen J B, Goff E, 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(5): 596-623
- 46 Wojcik K M, Goldstein R H, Walton A W. Regional and local controls of diagenesis driven by basin-wide flow system: Pennsylvanian sandstones and limestones, Cherokee Basin, southeastern Kansas [C] // Montañez I P, Gregg J M, Shelton K L, eds. Basin-Wide Diagenetic Patterns: Integrated Petrologic, Geochemical, and Hydrologic Considerations. SPEM Special Publication 57, 1997, 235-252
- 47 Fishman N S. Basin-wide fluid movement in a Cambrian paleo-aquifer: evidence from the Mt. Simon sandstone, Illinois and Indiana [C] // Montañez I P, Gregg J M, Shelton K L, eds. Basin-Wide Diagenetic Patterns: Integrated Petrologic, Geochemical, and Hydrologic Considerations [M]. SPEM Special Publication 57, 1997, 221-234
- 48 Giles M R. Diagenesis: A Quantitative Perspective—Implications for Basin Modelling and Rock Property Prediction [M]. Kluwer Academic Publishers, 1997: 511
- 49 de Ros L F. Heterogeneous generation and evolution of diagenetic quartzarenites in the Silurian-Devonian Fumas Formation of the Parana basin, southern Brazil [J]. Sedimentary Geology, 1998, 116: 99-128
- 50 曾澹辉. 东营凹陷热流体活动及其对水-岩相互作用的影响 [J]. 地球科学-中国地质大学学报, 2000, 25(2): 133-142
- 51 孟元林, 肖丽华, 殷秀兰, 等. 渤海湾盆地文安斜坡高温热流体活动与油气藏形成 [J]. 岩石学报, 2003, 19(2): 337-347
- 52 Gouze P, Coudrain-Ribstein A. Chemical reaction and porosity changes during sedimentary diagenesis [J]. Applied Geochemistry, 2002, 17: 39-47
- 53 Rossi C, Klinko, Arribas J, et al. Diagenesis: provenance and reservoir quality of Triassic Tagi sandstones from Ourhoud field, Berkine (Ghadames) Basin, Algeria [J]. Marine and Petroleum Geology, 2002, 19(2): 117-142
- 54 Dickinson W R. The dynamics of Sedimentary Basins [M]. USGS National Academy Press, 1997: 43
- 55 Giles M R, Indrelid S L, Beynon G V, et al. The origin of large-scale quartz cementation: evidence from large data sets and coupled heat-fluid mass transport modeling [C] // Worden R H, Mond S, eds. Quartz Cementation in Sandstones. Special Publication of International Association of Sedimentologists, 2000, 29: 21-38
- 56 Losh S W, Walter L, Meulbroek P, et al. Reservoir fluids and their migration into the South Eugene Island Block 330 reservoirs offshore Louisiana [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86(8): 1463-1488
- 57 Wilkinson M, Darby D, Haszeldine R S, et al. Secondary porosity generation during deep burial associated with overpressure leak-off: Fulmar Formation [J]. United Kingdom Central Government, 1997, 81(5): 803-813
- 58 Wood D C, Hewett T A. Forced fluid and diagenesis in porous reservoirs: controls on spatial distribution, roles of organic matter in sediment diagenesis [J]. SEPM, 1984: 73-83
- 59 Bjørlykke K, Mørch, Palm E. Modeling of thermal convection in sedimentary basins and its relevance to diagenetic reactions [J]. Marine and Petroleum Geology, 1988, 5(4): 338-351
- 60 Kupecz J A, Ghyas J, Bloch S. Reservoir Quality Prediction in Sandstones and Carbonates: An Overview [J]. AAPG Memoir, 1997, 69: 7-24
- 61 纪友亮, 赵澄林, 刘孟慧. 东濮凹陷地层流体的热循环对流与成岩圈闭的形成 [J]. 石油实验地质, 1995, 1: 8-16
- 62 刘立, 于均民, 孙晓明, 等. 热对流成岩作用的基本特征与研究意义 [J]. 地球科学进展, 2000, 5: 583-585
- 63 Sharp J M, Fenstermaker T R, Simmons C T, et al. Potential salinity-driven free convection in a shale-rich sedimentary basin: Example from the Gulf of Mexico basin in south Texas [J]. AAPG Bulletin, 2001, 85(12): 2089-2110
- 64 Bloch S, Lander R H, Bornell L. Anomalous high porosity and permeability in deeply buried sandstone reservoirs: Origin and predictability [J]. AAPG Bulletin, 2002, 86: 301-328
- 65 Nedkvåne T, Karlsen D A, Bjørlykke K, et al. Relationship between reservoir diagenetic evolution and petroleum emplacement in the ULA field, North Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 1993, 10(3): 255-270
- 66 Ehrenberg S N. Preservation of anomalously high porosity in deeply buried sandstones by grain coating chlorite: Examples from the Norwegian continental shelf [J]. AAPG Bulletin, 1993, 77: 1260-1286
- 67 Osborne M J, Swarbrick R E. Diagenesis in North Sea HHT clastic reservoirs: Consequences for porosity and overpressure prediction [J]. Marine and Petroleum Geology, 1999, 16: 337-353
- 68 蔡春芳, 顾家裕, 蔡洪美. 塔中地区志留系烃类侵位对成岩作用的影响 [J]. 沉积学报, 2001, 19(1): 60-65
- 69 谯汉生, 赵澄林, 田克勤, 等. 中国东部深层石油地质 [M]. 北

- 京: 石油工业出版社, 2002 254-258
- 70 邱隆伟, 姜在兴, 操应长, 等. 泌阳凹陷碱性成岩环境成岩作用及其对储层的影响 [J]. 中国科学: D 辑, 2001, 31(9): 752-759
- 71 应凤祥, 罗平, 何东博, 等. 中国含油气盆地碎屑岩储集层成岩作用与成岩作用数值模拟 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2004
- 72 孟元林, 高建军, 刘德来, 等. 西部凹陷南段成岩相分析与优质储层预测 [J]. 沉积学报, 2006, 24(2): 185-192
- 73 孟元林, 李亚光, 牛嘉玉, 等. 渤海湾盆地北部深层储层孔隙度影响因素探讨 [J]. 中国海上油气, 2007, 19(3): 154-156
- 74 蒋凌志, 牛嘉玉, 张庆昌, 等. 渤海湾盆地深部有利储层发育的主控因素 [J]. 地质论评, 2009, 55(1): 73-78
- 75 Hower J. Shale Diagenesis [C] // Longstaffe F T, ed. Clays and Resource Geologist Short Course Handbook 7. Mineralogical Association of Canada, 1981: 60-77
- 76 Barth T, Bjorlykke K. Organic acids from rock maturation: generation potentials, transport mechanisms and relevance for mineral diagenesis [J]. Applied Geochemistry, 1993, 8: 325-337
- 77 Wilson M D, Stanton P T. Diagenetic mechanisms of porosity and permeability reduction and enhancement [C] // Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in elastic rocks. SEPM Short Course, 1994, 30: 59-118
- 78 Bloch S. Secondary porosity sandstones: significance, origin, relationship to subaerial unconformities, and effect on predrilling reservoir quality prediction [C] // Wilson M D, ed. Reservoir quality assessment and prediction in elastic rocks. SEPM Short Course, 1994, 30: 137-159
- 79 孟元林, 修洪文, 孟凡晋, 等. 用泥岩热解资料预测储层次生孔隙发育带 [J]. 天然气工业, 2008, 28(10): 41-43
- 80 孟元林, 李斌, 黄文彪, 等. 黄骅拗陷中区超压对有机酸生成和溶解作用的抑制 [J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(1): 40-43
- 81 郑浚茂, 庞明. 碎屑沉积岩的成岩作用研究 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989
- 82 Beard D C, Weyl P K. Influence of texture on porosity and permeability of unconsolidated sand [J]. AAPG Bulletin, 1973, 57: 249-369
- 83 Xie Xinong, Li Sitian, Dong Weiliang, et al. Evidence for hot fluid flow along faults near diapiric structure of the Yinggehai basin, South China Sea [J]. Marine and Petroleum Geology, 2001, 18(6): 715-728

Basin Fluid Flow and Associated Diagenetic Processes

XIE Xinong¹ CHENG Jianmei² MENG Yuanlin³

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

2. Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology of Ministry of Education, China University of Geosciences Wuhan, 430074;

3. Daqing College of Petroleum, Daqing Heilongjiang 163318)

Abstract Basin fluid flow will change a diagenetic condition including temperature, pressure and fluid geochemistry in a pore space of host rocks and result in the variation of sequential diagenetic processes, interaction of water and rock, and porosity of reservoir. Viewing in siliciclastic rocks, fluid flow only results in dissolution of minor mineral and modification of pore space due to mineral dissolution and precipitation. Fluid with plentiful of CO₂ and organic acid will provide an available condition for the development of secondary porosity. Fluid episodic expulsion in overpressured environment not only results in the formation of secondary porosity in the overpressured compartment, but also results in the occurrence of abnormally diagenesis due to perturbations in temperature in shallow reservoirs with a hydrostatic environment. Viewing in carbonate rocks, because of strong dissolution of carbonate rocks, basin fluid flow can result in an essential variation in fabric and pore space in carbonate reservoirs. Expulsion of meteoric, leakage and deep volcanic or hydrothermal fluids along faults or fractures will result in an essential variation in composition, texture, reservoir space in a vast realm in carbonate rocks. Hence, weathering karst typed and structurally controlled hydrothermal dolomitization typed reservoirs related closely to basin fluid movement are taken as main reservoir in carbonate rocks. However, basin fluid flow and associated diagenetic process has remained a matter of controversy, much more research are needed in the future.

Key words basin fluid, diagenetic process, interaction of water and rock, abnormally pressure