

# 盆地深层流体-岩石作用与油气形成研究前沿

李忠

中国科学院 地质与地球物理研究所, 北京 100029; 中国科学院大学, 北京 100049

**摘要:** 流体-岩石作用贯穿深层成烃、成储与成藏过程, 是一个兼具前沿性和实用性的研究领域。在对含油气盆地流体-岩石作用研究的基础上, 本文指出深层裂隙体系发育、流体化学亲和力的增大将显著抵消物性变差对流体活动性的不利影响, 因此深层流体活动规模和效应不可低估。综合分析提出: ①应加强深层烃水岩条件下残留烃(滞留烃)、固体沥青等生烃及其转化问题研究; ②关注深层构造应变/非均匀压缩与储集层构造-流体作用效应、深层溶蚀流体来源/相态与规模储集层改造机制; ③重视深层高温高压下储集层物性/润湿性、流体相态及活动性对油气运聚及效率的控制研究。

**关键词:** 盆地深层; 流体-岩石作用; 成烃; 成储; 成藏

中图分类号: P588.2 文章编号: 1007-2802(2016)05-0807-10 doi: 10.3969/j.issn.1007-2802.2016.05.001

## Research Frontiers of Fluid-Rock Interaction and Oil-Gas Formation in Deep-Buried Basins

LI Zhong

*Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;  
University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

**Abstract:** Fluid-rock interactions could occur through deep processes including hydrocarbon generation, reservoir formation and oil-gas accumulation. The research of such interaction is of both frontier and practical. Based on reviews of the published papers, the author indicates that the scale and role of deep fluid flow should not be underestimated because developed fracture systems and increasing fluid chemical affinity can significantly offset negative effect on fluid flow from decreasing permeability in deep-buried basins. It is presented that, according to the integrated review and analysis in the paper, the following research fields should be paid attention to in the future: (1) hydrocarbon generation and transformation of residual/retained hydrocarbon and solid bitumen in deep fluid-rock reaction systems; (2) structural-fluid interactions of reservoirs under deep strain/non-uniform compression, mechanism of reservoir modification related to source/phase states of deep-derived dissolving fluids; (3) oil-gas migration and accumulation efficiency controlled by reservoir physical properties/wettability and fluid phases and activities under high temperature and high pressure.

**Key words:** deep-buried basin; fluid-rock interaction; hydrocarbon generation; reservoir formation; hydrocarbon accumulation

流体-岩石作用贯穿盆地形成演化全过程, 包括表生过程、沉积-同沉积过程、成岩(狭义)过程以及成岩后改造过程(又称后生过程), 已被纳入盆地动力学研究范畴(National Research Council, 1997)。流体-岩石作用的结果, 总体而言无外乎2个方面, 即流体、岩石/岩矿的转变, 这种转变也带来了地质体组分分异-富集与成藏-成矿。近年来, 深层、深水、非常规已成为油气勘探的3大新领域, 由此带来的是含油气盆地勘探面临新一轮的理论和技

术挑战。在深层(含超深层)油气领域, 近年来世界范围内愈来愈多的发现展现出了很好的资源勘探潜力(Ehrenberg and Nadeau, 2005; Meyer *et al.*, 2005; McDonnell *et al.*, 2008; Mancini *et al.*, 2008; Ehrenberg *et al.*, 2009), 而中国的勘探成绩表现尤其不俗(马永生等, 2011; 孙龙德等, 2013; 赵文智等, 2014)。然而, 一方面勘探技术和勘探深度日新月异, 而另一方面则是深层油气形成分布认识的局限, 加剧了勘探风险, 即理论认识远滞后于勘探技

收稿日期: 2016-08-03 收到, 2016-09-02 改回

基金项目: 国家自然科学基金项目(41372120, 41172096); 国家科技重大专项(2011ZX05008-003)

作者简介: 李忠(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 沉积学与盆地动力学. E-mail: lizhong@mail.iggcas.ac.cn.

术,即深层油气形成分布的理论认识已经成为进一步扩展深层勘探的瓶颈。

有关深层油气藏形成和保存的温度和压力范围大多超出了常规认识,因此诸多石油地质理论面临极大挑战。在深层油气形成分布存在的诸多石油地质问题中,一个具有重要基础性和共性的科学问题,就是深层流体-岩石作用机制,其涉及深层成烃、成储、成藏与保存/改造等方面。“盆地深层流体-岩石作用与油气”目前无疑是一个兼具前沿性、学科交叉性和勘探实用性的研究领域,以此为主题的论文专辑出版显然具有学术探索和交流意义。为此,本文将就主题研究的前沿性、研究进展以及关键问题作一综述。

## 1 深层流体-岩石作用的温压与流体环境

### 1.1 深层温压环境

目前有关“深层”的概念基本是以深度标定的,是对勘探成本的表征,这对于勘探家来说无可非议。在中国中西部油气盆地中,深层一般对应深度为4500~6000 m,超深层大于6000 m;而在东部油

气盆地,深层对应深度则为3500~5000 m,超深层大于5000 m。

由于地质条件的差异,加之研究目标不一,因此不同盆地的深层概念很难统一,甚至千差万别,这一点国内学者已有诸多评述(妥进才,2002;马永生等,2011;孙龙德等,2013)。那么探索“深层”油气形成分布的学术意义何在呢?在从地表到深埋过程中环境条件始终在不断变化,沉积物(岩)及其共生的流体介质(无机-有机矿物-化学体系)为了适应这种环境变化而调整,这其中包含的物理-化学过程的总和可称之为“成岩作用”或“成岩-后生作用”,并造就了丰富多彩的无机矿物和岩石、有机集合体(地质聚合物)和有机岩(图1)。显然,温度、压力和流体相态/属性,即深层流体-岩石作用的环境条件,是探究“深层”科学含义必须澄清的问题。

参考油气勘探中常用的深度及相关盆地的大量温压背景资料,表明狭义的深层的地温多大于120℃、静岩压力大于90 MPa;狭义的超深层的地温一般大于180℃(可达300~400℃)、静岩压力大于120 MPa(可达280 MPa);地层流体压力虽然变化较大,但由于深层流体对静岩压力的(部分)承载

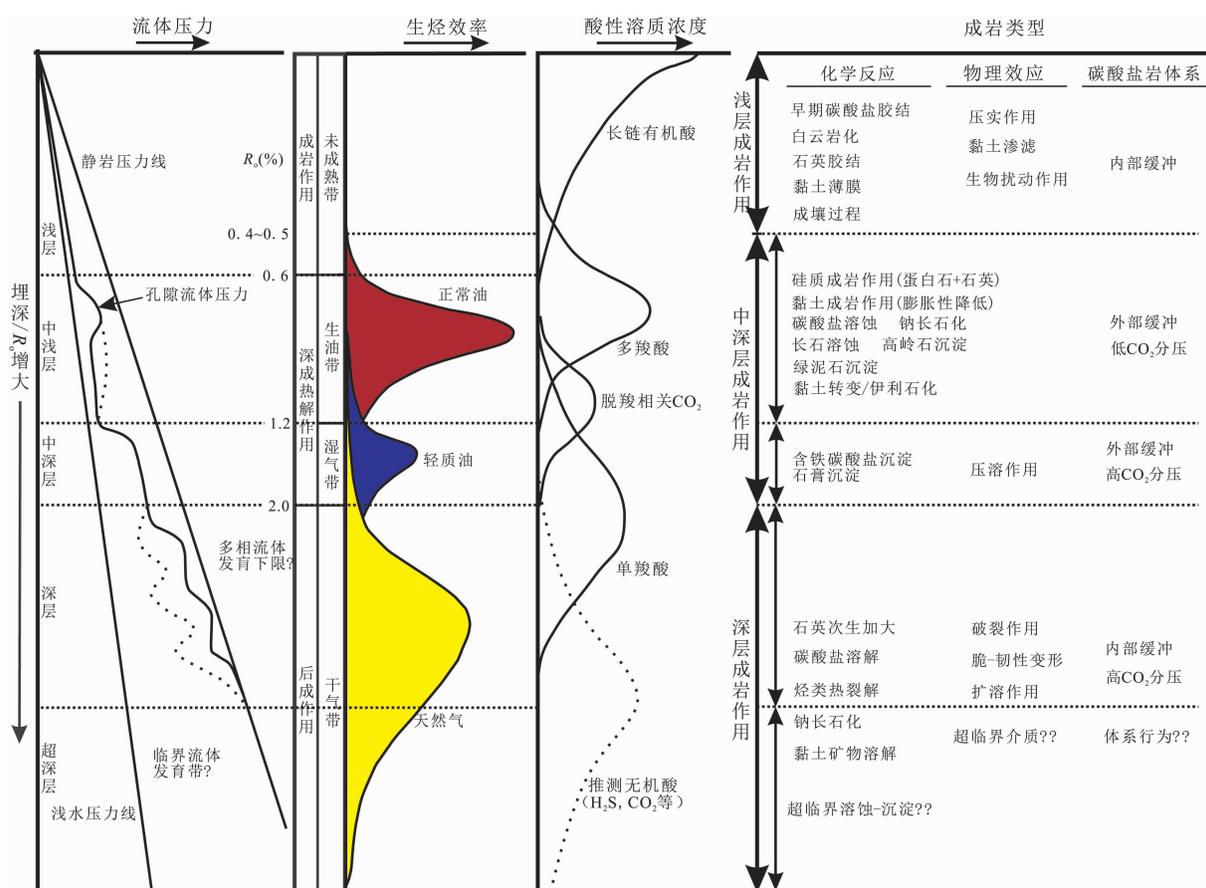


图1 盆地流体-岩石作用深埋演化阶段

Fig.1 Evolutional stages of fluid-rock interaction in deep-buried basins

因而可达 50~100 MPa 甚至更高。从地质条件特别是对比岩浆-变质作用条件分析,盆地深层“高温-高压”条件并不值得惊奇,但对于大多在表生条件下建立起来的沉积岩石学而言,上述温压条件下的流体属性与流体-岩石作用机制确实知之甚少。

显然,深层油气的资源潜力决定了深层的勘探意义(以下若无特别标示,深层是指广义的,即包括狭义的“深层”和“超深层”),但上述深层的深度含义却并无严格的科学意义。此外,对于盆地深层温压场目前多以静态的、定性的推理分析为主,缺乏有效的分析载体,致使古地温、古压力分析仍存在很大不确定性。

1.2 深层流体来源与活动因素

流体不仅是流体-岩石作用的参与组分,还是流体-岩石作用中物质、能量的输运载体(李忠等, 2006; 李忠和刘嘉庆, 2009),因此它是流体-岩石作用系统的活跃控制因素(图 2)。

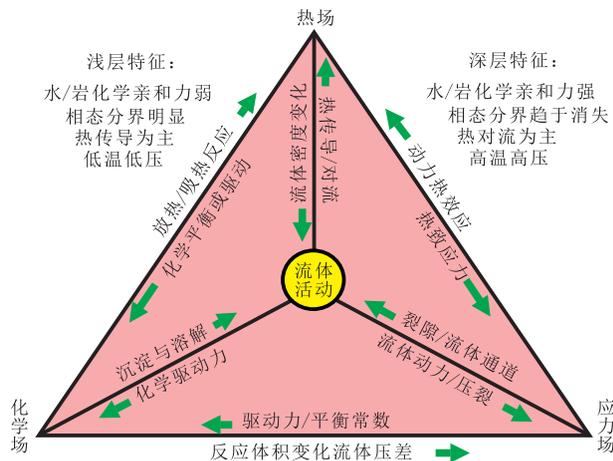


图 2 盆地流体活动与成岩作用场  
Fig.2 Relationship between basin fluid activities and diagenetic fields

根据以往大量的研究资料,可将深层流体主要来源归结为如下 3 类:

(1) 大气水或沉积水: 进一步可分为 3 种亚类。其一, 沉积水经深埋蒸发作用而成, 一般产出于构造比较稳定的、封闭较好的克拉通盆地深层; 其二, 大气水深循环产物, 在紧邻造山带的构造盆地深部较发育, 包括深循环到结晶基底再进入盆地内部; 其三, 压实水, 即由于深埋压实而排出的自由水及部分束缚水, 或由于穿层断裂输导自目的层之下的盆地深层水(又称盆地热流体); 这类流体的典型特征就是其大气水示踪属性。

(2) 结晶水或化学转化流体: 包括在深埋温压

条件下矿物转变而排出的结构水, 无机/有机物转化而形成的流体, 如深层黏土矿物转化排出水, 深层地质聚合物转化形成的含烃流体、有机酸等, 热硫酸盐还原反应(TSR)、原油裂解等形成的相关流体或气体; 这类流体的典型特征就是其无机-有机组分的复杂性。

(3) 岩浆或变质流体: 源于岩浆或变质作用过程, 如在基底或盆地内发生的岩浆分异、气化作用、接触变质作用等都会形成影响盆地深层的流体产物, 也有直接通过深大断裂而来的地幔流体。

流体来源受控于盆地充填物(流体-化学体系)及其演变的构造背景, 而流体活动除受物性和温压等物理条件制约外, 还与流体的相态、化学亲和力与介质的润湿性(亲水性/亲油性)密切关联。在深层流体中, 结晶水或化学转化流体、岩浆或变质流体组分明显增加; 而深层裂隙体系发育、流体(含超临界流体)化学亲和力的增大(Максимов *et al.*, 1984; Balitsky *et al.*, 2011)无疑将抵消或部分抵消物性变差对流体活动性的不利影响。因此, 深层流体活动不可忽视, 以往根据浅层现象对深层的简单推演可能大大低估了深层流体活动的规模和效应。这也隐含了从流体属性、活动方式等参量定义浅层、深层、超深层的界限无疑是具有科学含义的(图 1、图 3)。

显然, 盆地地质流体研究是一项重要的基础课题, 本次主题约稿收录了 2 篇相关论文, 一篇结合实例综述了盆地深部流体的主要来源及判识标志, 另一篇从地层水演变角度分析了其对深层碳酸盐岩改造的效应, 期望达到抛砖引玉的效果。

2 深层流体-岩石作用研究前沿

流体成因和活动方式是深层流体-岩石作用研究的首要基础前沿问题。除流体多成因问题外, 盆地自浅层到深层的流体活动方式和驱动机制也存在明显差异。目前多数研究认识到, 大多数浅层流体活动以大气水循环、局域循环为特征, 重力、差异压实是主要驱动机制(Galloway, 1984; Bjørlykke, 1988; 李忠, 1998); 而深层主要以区域性垂向、幕式活动为特征, 热盐对流驱动、构造应变诱发驱动可能成为主要机制(Максимов *et al.*, 1984; Gonçalves *et al.*, 2004; 李忠等, 2006; Andreychouk *et al.*, 2009)。但另有研究提出(庞雄奇等, 2014), 从浅层到深层存在自由、局限和束缚等 3 种流体动力场, 分别对应浮力、毛细管力与气热膨胀力、分子扩散力等驱动机制。然而, 由于目前的认识大多还

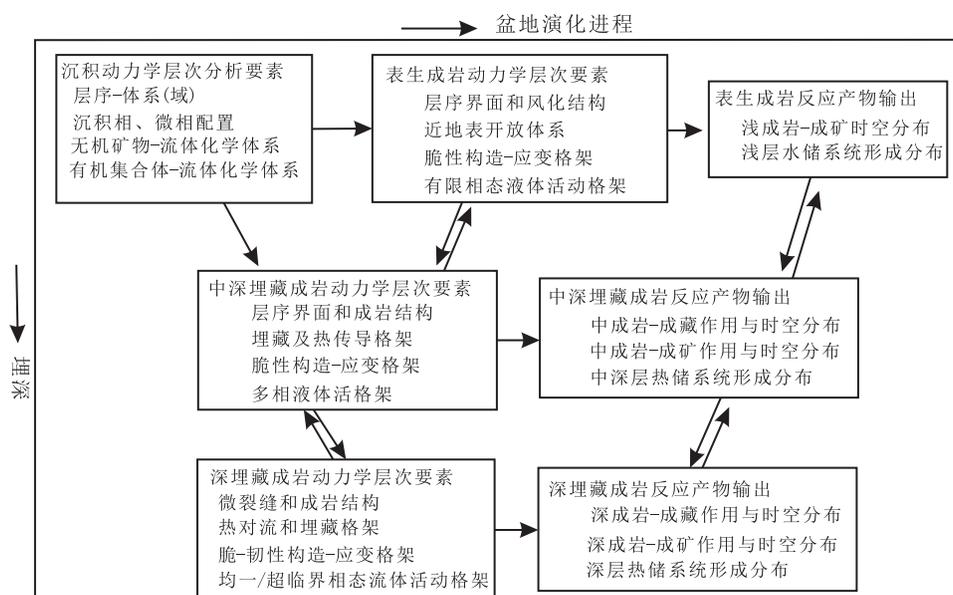


图3 盆地深埋演化中流体-岩石反应及其产物

Fig.3 Fluid-rock interactions and their products during deep-burial evolution in sedimentary basins

是基于浅层迹象的推理或理想实验,而对深层流体的实际观测还很少或几乎没有,与认识客观规律的目标尚有很长的路要走。

认识无机-有机岩矿的稳定系列是深层流体-岩石作用研究的又一基础前沿问题。在已有的学科体系中,成因矿物学、结晶岩石学、有机岩石学、有机地球化学已经为此奠定了重要基础,特别是在黏土矿物、地质聚合物(干酪根)演变等方面。然而,由于如下因素的存在不得不重新审视或重建深层无机-有机岩矿演变系列。其一,以往盆地深层温压条件下的无机岩矿系列(如长石、沸石、碳酸盐等)的稳定性的实验考虑因素相对单一,难于反映盆地深层的演变细节,甚至缺乏必要的热力学和物理化学数据基础;其二,由于岩石(含有机岩)非均质性的影响,已有的单组分或简单水-岩体系的研究认识很难应用于深层实际地质问题,特别是在微观和宏观尺度之间缺乏明确、定量的科学认识基础;其三,已有勘探成果和观测事实表明,深层沉积岩物性及其中油气形成演化已经突破了常规认识(Jarvie *et al.*, 2007; 赵文智等, 2011; Bernard *et al.*, 2012; 李剑等, 2015; 彭平安, 2016),因此有关深层无机-有机岩矿稳定系列与流体相态条件等的知识面临严峻挑战。

深层温压条件、流体属性和岩-矿稳定组合的变更(图3),使得研究人员不得不重新审视深层流体-岩石作用机制及其与浅层的关系。浅层规律性能否推演至深层?量变还是质变?其油气地质意义

及其特征何在?这是一个长期而基础的研究目标。考察目前的学科背景和发展态势,笔者认为,含油气盆地深层流体-岩石作用研究至少应包括如下研究领域:①盆地深层流体成因与活动演变机制;②盆地深层流体-岩石演变的原位过程及重建;③盆地深层流体-岩石作用实验和数值模拟;④盆地深层流体-岩石作用与油气晚期/多期生成;⑤盆地深层流体-岩石作用与油气储集层后期改造及保存;⑥盆地深层流体-岩石作用与油气成藏及有效性。

### 3 深层流体-岩石作用与成烃

孔隙流体/水和矿物对生烃作用具有广泛的影响,也一直是含油气盆地成烃过程研究的热点之一。以往研究主要基于生烃模拟实验,并聚焦如下3方面:①有机集合体与水在不同封闭体系、不同温度下的反应机理;②无机矿物(特别是黏土矿物)在不同条件下对干酪根演变和生烃的制约作用;③深层热液条件下的烃类演变过程。目前研究认为(Helgeson *et al.*, 1993; Seewald, 1994; Lewan, 1997; 秦建中等, 2002),有机质和烃类组分演变与水/流体的介入密切相关,一方面孔隙水易于在增温过程中增压而抑制生烃;另一方面水能够溶入烃源岩已生成的沥青质中,促进加氢反应的进行。此外,多数研究表明黏土矿物能够促进生烃反应(Brooks, 1948; Dembicki, 1992);深层热液条件往往也能提高生烃效率(Simoneit, 1990; Horita and Berndt, 1999),但情况复杂。

近年来,中国学者在相关领域也开展卓有成效的工作。通过生烃模拟实验研究认为,有机质在生烃演化过程中与水相互作用,对干酪根的影响表现为活化部分无效碳,对已降解的产物表现为进一步加氢,导致总生烃潜力增加(王永诗等,2013);干酪根热模拟实验在不同含水量和不同矿物介质条件下,甾、藿烷(烯)的热演化特征具有明显差异(潘长春等,2006)。而针对不同系统的进一步模拟研究提出(孙丽娜等,2015),封闭体系下,水对生烃演化有一定的促进作用,并且气态烃产率与加水量呈正相关关系,而液态烃产率在加水量相当于岩样的20%~50%时最大;相对而言,半开放体系下,高压水蒸汽介质更有利于气态烃的生成,而高温高压条件下的临界态水则更有利于液态烃的生成和保存。另有研究认为(郑伦举等,2015),地层孔隙热解实验有利于液态油的生成,不利于液态油向气态烃的转化,并极大地提高了干酪根的生油气潜力,显示了高压液态水、流体压力和孔隙空间等地质因素对烃源岩中有机质热成熟生烃反应具有重要影响。

深层温压提高对生烃和油气转化影响显著而复杂。前已述及,实验和实例研究表明有机质深埋成熟演变中存在高压迟滞效应,但也有实验研究指出(陶伟等,2008),压力能提高蒙脱石、伊利石、高岭石和硫酸锰与干酪根分别混合的热解产烃效率,压力的增加没有抑制黏土矿物的催化活性,相反能改变黏土矿物的晶层结构,提高催化活性。

此外,地幔流体上升运移过程中萃取和富集有机质,对干酪根生烃有显著的加氢作用(Gold, 1993; Sugisaki and Mimura, 1994; Potter and Konnerup-Madsen, 2003)。金之钧等(2002)的研究也有类似认识,并指出深部流体对烃类生成的制约表现在加氢反应、热效应、催化作用等3个方面。

显然,深层流体介入、深层温压提高对有机质演变和生烃的影响是不可忽视的,但由于体系组分和边界条件的复杂性,其机制和效应也是复杂的(Curtis, 2002; Zhang *et al.*, 2012)。而以往相关研究认识明显主要基于静态水岩体系的实验模拟和相对理想的实验条件,活动流体参与的实验以及地质反演实例的分析较弱,因此不可避免地带来了一系列问题和矛盾认识。考察深层流体-岩石作用与晚期多次/接替成烃的研究趋势,笔者认为应进一步加强动态烃水岩体系实验与地质实例研究的有机结合,聚焦残留烃(滞留烃)演变机制、固体沥青转化、多次生烃与效率等问题。

## 4 深层流体-岩石作用与成储

深层-超深层沉积岩经历了多期次的构造沉降、抬升以及强烈的构造演变,至少近期或最近的构造演化阶段处于深层高温压环境,因而对成储-成藏产生重大影响。盆地埋藏-热演化、构造变形和应变、流体(循环)活动和演变是盆地动力环境及演变机制科学问题的主要内涵。地球深部构造引起的热体制是导致显著成储-成藏效应的主要热源,而构造演变和热传导介质性质变化会造成热体制的空间差异性和地史多变性,而其与储集层演化的关系目前认识尚很粗略。另一方面,流体作用贯穿于成储-成藏全过程,盆地深层演化时期长,不同尺度的活动样式复杂(Shanley and Cluff, 2015),而笔者对深部流体相态、属性与作用类型知之甚少,极大制约了对深层规模高效储集层改造机制与形成分布的认识。

### 4.1 深层构造应变与储集层构造-流体作用效应

储集层在各种地质应力作用下压实(或垮塌)、变形,而其中抗压实和破裂则是深层储集层孔隙形成的重要机制,也是油气地质关注的储集层应变机制及效应的内涵。储集层应力-应变是盆地沉积-热-构造-流体动力综合作用的效果,而不只是简单的上覆岩石的机械压实(寿建峰等,2006, 2007)。目前对相关岩石储集物性(孔渗性)的构造地质基础研究已取得进展(Gibson, 1998; Antonellini *et al.*, 1999; Heynekamp *et al.*, 1999; Taylor and Pollard, 2000; Lothe *et al.*, 2002; Sample *et al.*, 2006; Gale *et al.*, 2014; Jamison, 2016);但将构造应变与流体-岩石作用及油气储集层有效性结合的研究则尚属起步阶段(Fossen and Bale, 2007; 李忠等, 2009; Laubach *et al.*, 2010; Vandeginste *et al.*, 2012),还处于构造样式和孔-缝成岩表征阶段,构造-流体活动匹配和量化较差,如针对不同古热史及热作用方式引起的应力-应变机制及效应、叠加构造与不同性质流体介入后的应变效应等认识储集层孔隙或孔隙变化规律的关键问题,目前研究的系统性、动态演变和深度仍然有限。

另一方面,近十年来由构造-热流体作用形成的深层白云岩(化)储集层在国内外被大量报道。这是因为热流体的大规模运移及由此引起的一系列地质作用都与断裂作用有关,并且对一些特殊的构造背景有一定的偏好,这些有利的构造背景包括伸展断层(上盘)、张扭断层、断层交汇处(Davies and

Smith, 2006)。由于断层拆离造成的地层下沉作用,在岩层顶部往往会出现线状凹陷(sag)。而岩层内部由于破裂以及随后可能因热卤水流体充注引起的水力压裂,形成碳酸盐岩层内丰富的裂缝和角砾,并发生灰质的溶蚀作用和广泛的白云岩化作用,引起白云岩孔隙度的增加,成为潜在的优质储集层。值得指出,流体地球化学研究为探讨碳酸盐岩成岩作用和规模储集层形成,提供了定量、可靠的证据(Bachu, 1997; Gregg and Shelton, 1989; Kendrick *et al.*, 2002; Worden *et al.*, 1996)。

应该指出,深层温压体制并非均一,其中水平分应力与垂直分应力的比值一般介于0.2~0.9,构成稳定的台盆区相对低,这也是盆地深层大规模流体活动可能存在的重要驱动机制之一。在非均匀压缩即构造应变体制状态下,岩石物性的压实效应明显低于均匀压缩状态,因此以往对盆地深层沉积岩物性的趋势估计可能过分悲观了。而由于不同岩石物理性质(如泊松比)的差别,压实效应的非均质性将更加显著,这或许是碳酸盐岩孔渗物性较砂岩分异大的原因之一。但目前相关精细实验和实例分析还比较缺乏。为此,本次主题约稿收录了2篇相关论文,主要以塔中及邻区奥陶系深层碳酸盐岩储集层为例,探索了构造应变及其相关流体-岩石作用与储集层形成分布的关系,提出了新的观点和进一步研究的线索。

#### 4.2 深层溶蚀流体来源与规模储集层改造机制

以往研究表明,当沉积物的埋深超过3000 m时,多数原生孔隙(洞)将消失殆尽(Scholle and Halley, 1985; Moore, 2001; Loucks, 2007)。因此,深层储集层的形成分布,总体而言无非是原生保存、次生改造2个方面。在原生保存方面,储集层超压被认为是孔隙得以保存的最主要的因素(Feazel and Schatzinger, 1983; Maliva and Dickson, 1992),而烃类对储集层孔隙的早期侵位可阻止化学压实作用的进行,也有利于孔隙的保存(Heasley *et al.*, 2000)。除此以外,低地温和快速埋藏(Siever, 1979, 1983; 李忠等, 2009)、早期颗粒黏土膜发育(Ajdukiewicz and Larese, 2012)等也被认为是深层储集层发育的重要“保存”机制。相比之下,对深层储集层流体溶蚀等次生改造机制及其效应的争议较大。

深埋背景下,次生孔隙的发育与石油形成、运移过程中产生的CO<sub>2</sub>和有机酸(Surdam *et al.*, 1989, 1993),以及原油裂解、运移过程(因热化学硫

酸盐还原作用)产生的CO<sub>2</sub>+H<sub>2</sub>S(Sassen and Moore, 1988; Machel *et al.*, 1995),对碳酸盐以及硅酸盐矿物产生的溶解而形成次生孔隙,溶解产生的CaCO<sub>3</sub>将在其他地方形成新的胶结物(Sassen and Moore, 1988; Heydari, 1997; Moore, 2001)。但对上述机制的效应一些学者持有明显不同的看法(如Bjørlykke, 1984; Lundegard *et al.*, 1984; Loucks, 2007),其最主要的论据就是对深层充足的有机酸、大规模流体活动和搬运效应的质疑。此外,深层碱性溶蚀机制也在部分研究中被提及,但其规模效应仍然存在巨大质疑。

尽管有争议,但近年来有关深层储集层建设性流体改造的机制不断被提出。除上述构造控制的碳酸盐岩热流体作用模式外(Davies and Smith, 2006),高温高压条件下CO<sub>2</sub>以及超临界流体溶解度的显著增大也早已经得到实验模拟证实(Максимов等, 1984, Alexandro *et al.*, 2011; Miller *et al.*, 2014),但缺乏盆地地质实例观测和解析;深层烃类-矿物反应产有机酸(Seewald, 2001)、热化学硫酸盐还原作用产H<sub>2</sub>S溶蚀(Zhang *et al.*, 2008; 张水昌等, 2011; Cai *et al.*, 2015)成为热点,但其规模效应还难于获得质量平衡计算方面的支持。目前的主要问题是,一方面对不同流体-岩石作用的实验边界条件约束较弱,另一方面就是储集层流体-岩石作用机制及效应缺乏空间尺度的系统分析,导致对储集层流体-岩石作用控制机制及效应的认识出现片面化甚至是误区;而对于盆地深部,不仅系统的流体-岩石作用实例解析很少,更重要的是缺乏基础的模拟深部条件的实验研究。为此,本次主题约稿收录了2篇相关论文,一篇涉及深层条件下碳酸盐岩溶蚀实验模拟,另一篇则评述了热化学硫酸盐还原作用的最新研究,提出了值得关注的深层研究进展与问题。

## 5 深层流体-岩石作用与成藏

成藏动力学的核心大致包括3个方面内容:①含烃流体的来源与演变(烃源灶变动);②含烃多相流体的运移机制和动力学;③烃类分异、聚集和保存的机制和动力学。上述过程中,多相流体-岩石相互作用贯穿始终,在深层-超深层埋藏中岩石组构变动尤其显著,因此成烃-成储-成藏是一个不可分割的流体演变系统过程。

随着埋藏深度的增加,较高的温压条件下所发生的水-岩相互作用以及有机-无机相互作用明显增强(Surdam *et al.*, 1989; Seewald, 2001; 蔡进功等,

2012)。深部高温压环境、深部(热)流体活动、外源氢的加入和过渡金属元素催化作用等都将极大地影响和改变烃类生成的机理和过程,深层残留烃(滞留烃)成烃效率问题已经得到重视。而无论对碎屑岩系还是碳酸盐岩系,深层储集层总体呈现向低孔低渗演化的特征(Ehrenberg and Nadeau, 2005);与此同时,在深层流体活动条件下,碎屑岩、碳酸盐岩表现出活跃的地球化学性质,并形成多种类型的储集和输导体系,非均质性趋于复杂多变抑或是幕式演变。深层复杂的输导体与多种烃源灶的复杂组合方式,加之深层高温压场条件下特殊的流体相态,从而形成特殊的或非常规的运聚成藏系统。

深层成藏过程中含烃流体或烃水岩体系的行为尤其值得重视。盆地深埋演化使得烃类由液态石油、凝析油、湿气向干气转化,伴随其分子结构由不稳定的高分子过渡为稳定小分子、长链-多链结构过渡为短链-单链,多种流体相态易于共存,但以凝析气和气相为主。高温高压模拟实验表明,深层条件下油气相态主要受有机质类型、流体组成、温度压力条件等因素制约,此外热化学还原反应、气洗作用等对烃类相态也有重要影响(Di Primio and Horsfield, 2006)。油、气在深层易于相互溶解而形成油气混相,水的参与使得烃类相态更加复杂,并可能存在液相和气相界面消失的临界状态(Barker, 1990; Meulbroek, 2002)。此外,深层烃类密度和黏度降低、油气水混溶、界面张力变小等物性变化,都将可能改变深层油气的运聚形式(庞雄奇等, 2012)。通过实例分析,罗晓容等(2016)指出碎屑岩储集层内部原始沉积结构的非均质性往往会造成后期成岩作用和油气充注过程的非均匀性,早期原油在储集层中的充注阻碍了成岩作用过程,并改造了岩石颗粒表面润湿性,往往是深层相对致密储集层条件下的油气聚集“甜点”所在。

总之,深层-超深层盆地动力环境使成烃-成储-成藏过程变得复杂,高温高压与封闭/半封闭体系下储集层物性、流体相态及活动性如何控制油气运聚方式、方向及效率仍知之甚少。为了有效认识深层沉积岩规模油气藏分布规律,必须优先重视深层-超深层条件下运聚机制的多尺度实验和实例分析,重视成储-成藏相互作用的匹配机制与输导-聚集效应等问题。本次主题约稿收录了一篇相关论文,评述了深层成藏动力学的相关研究进展与问题,其中涉及油气运聚的流体-岩石作用研究线索值得关注。

## 6 主要认识

近年来,深层油气勘探已经取得重要成果,但也面临巨大风险,这对石油天然气地质理论提出了诸多挑战。盆地深层流体-岩石作用涉及深层成烃、成储、成藏与保存/改造等方面,是油气盆地中一个兼具基础前沿性、学科交叉性和勘探实用性的研究领域。

流体是流体-岩石作用系统的活跃控制因素。在深层流体中,结晶水或化学转化流体、岩浆或变质流体组分明显增加;而深层裂隙体系发育、流体化学亲和力的增大将有效抵消物性变差对流体活动性的不利影响。因此,深层流体活动规模和效应不可低估。

孔隙流体/水和矿物对生烃作用具有广泛影响,但以往相关加氢反应、热效应、催化作用等研究认识主要基于理想条件下的实验模拟。在深层流体-岩石作用与成烃研究领域,应进一步加强深层烃水岩体系实验条件与地质实例的有机结合,聚焦残留烃(滞留烃)演变机制、固体沥青转化、多次生烃与效率等问题。

相关盆地深层规模储集层形成分布的研究核心问题主要包括:构造应变与储集层构造-流体作用效应、深层溶蚀流体来源与规模储集层改造机制。评估非均匀压缩、特征相态溶蚀流体以及原生保存机制等深层条件下的储集层演变,并推测深层规模储集层发育和勘探的广阔前景。但从预测角度,目前基于相关精细实验和严密实例分析的科学依据还比较缺乏。

流体作用贯穿于成烃-成储-成藏全过程,但深层高温高压与封闭/半封闭体系下储集层物性/润湿性、流体相态及活动性如何控制油气运聚方式、方向及效率,仍然知之甚少。深层条件下运聚机制的多尺度实验和成储-成藏相互作用的匹配机制研究值得进一步关注。

综上,含油气盆地深层流体-岩石作用研究任重道远,相关深入研究将有助于推进新一代石油天然气地质学和动力学的建立。

**致谢:**“盆地深层流体-岩石作用与油气”主题专栏的出版,凝聚了诸多作者、审稿人和编辑部的心血,欧阳自远院士、王成善院士、刘莉副主编对选题给予支持,博士生倪玲梅帮助校对文献及清绘部分图件,在此一并表示诚挚谢意!

## 参考文献 (References):

- Ajdkiewicz J M, Larese R E. 2012. How clay grain coats inhibit quartz cement and preserve porosity in deeply buried sandstones: Observations and experiments. *AAPG Bulletin*, 96(11): 2091-2119
- Alexandrov E N, Kuznetsov N M, Brusova G P, Shlyakhtin A V, Petrov A L, Lidzhi Gorgaev V Yu. 2011. Supercritical fluid state of hydrocarbon-water fluids in a porous medium and optimization of fluid release from pores. *Russian Journal of Physical Chemistry B*, 5(8): 1240-1244
- Andreychouk V, Dublyansky Y, Ezhov Y, Lysenin G. 2009. Karst in the Earth's Crust: Its distribution and principal types. Poland: University of Silesia-Ukrainian Institute of Speleology and Karstology, 1-72
- Antonellini M, Aydin A, Orr L. 1999. Outcrop-aided characterization of a faulted hydrocarbon reservoir: Arroyo Grande oil field, California, USA. In: Haneberg W C, Mozley P S, Moore C J, Goodwin L B, eds. *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*. Washington, DC: American Geophysical Union, 113: 7-26
- Bachu S. 1997. Flow of formation waters, aquifer characteristics, and their relation to hydrocarbon accumulations, Northern Alberta Basin. *AAPG Bulletin*, 81(5): 712-733
- Barker C. 1990. Calculated volume and pressure changes during the cracking of oil to gas in reservoirs. *AAPG Bulletin*, 74(8): 1254-1261
- Bernard S, Horsfield B, Schulz H M, Wirth R, Schreiber A, Sherwood N. 2012. Geochemical evolution of organic-rich shales with increasing maturity: A STXM and TEM study of the Posidonia Shale (Lower Toarcian, northern Germany). *Marine and Petroleum Geology*, 31(1): 70-89
- Balitsky V S, Pironon J, Penteley S V, Novikova M A, Balishaya L V. 2011. Phase states of water-hydrocarbon fluid systems at elevated and high temperatures and pressures: Evidence from experimental data. *Doklady Earth Sciences*, 437(1): 383-386
- Bjørlykke K, Mo A, Palm E. 1988. Modelling of thermal convection in sedimentary basins and its relevance to diagenetic reactions. *Marine and Petroleum Geology*, 5(4): 338-351
- Bjørlykke K. 1984. Formation of secondary porosity: How important is it? Part 2. Aspects of Porosity Modification. In: McDonald D A, Surdam R C (eds). *Clastic Diagenesis*. Tulsa, Okla.: AAPG, 59: 277-286
- Brooks B T. 1948. Active-surface catalysts in formation of petroleum. *AAPG Bulletin*, 32(12): 2269-2286
- Cai C F, Hu G Y, Li H X, Jiang L, He W X, Zhang B S, Jia L Q, Wang T K. 2015. Origins and fates of H<sub>2</sub>S in the Cambrian and Ordovician in Tazhong area: Evidence from sulfur isotopes, fluid inclusions and production data. *Marine and Petroleum Geology*, 67: 408-418
- Curtis J B. 2002. Fractured shale-gas systems. *AAPG Bulletin*, 86(11): 1921-1938
- Davies G R, Smith L B Jr. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview. *AAPG Bulletin*, 90(11): 1641-1690
- Dembicki H Jr. 1992. The effects of the mineral matrix on the determination of kinetic parameters using modified Rock Eval pyrolysis. *Organic Geochemistry*, 18(4): 531-539
- Di Primio R, Horsfield B. 2006. From petroleum-type organofacies to hydrocarbon phase prediction. *AAPG Bulletin*, 90(7): 1031-1058
- Ehrenberg S N, Nadeau P H, Steen O. 2009. Petroleum reservoir porosity versus depth: Influence of geological age. *AAPG Bulletin*, 93(10): 1281-1296
- Ehrenberg S N, Nadeau P H. 2005. Sandstone vs. carbonate petroleum reservoirs: A global perspective on porosity-depth and porosity-permeability relationships. *AAPG Bulletin*, 89(4): 435-445
- Feazel C T, Schatzinger R A. 1983. Prevention of carbonate cementation in petroleum reservoirs. *AAPG Bulletin*, 67(3): 459
- Fossen H, Bale A. 2007. Deformation bands and their influence on fluid flow. *AAPG Bulletin*, 91(12): 1685-1700
- Gale J F W, Laubach S E, Olson J E, Eichhubl P, Fall A. 2014. Natural fractures in shale: A review and new observations. *AAPG Bulletin*, 98(11): 2165-2216
- Galloway W E. 1984. Hydrogeologic regimes of sandstone diagenesis. In: McDonald D A, Surdam R C (eds). *Clastic Diagenesis*. Tulsa, Okla.: AAPG, 3-13
- Gibson R G. 1998. Physical character and fluid-flow properties of sandstone-derived fault zones. *The Geological Society*, 127(1): 83-97
- Gold T. 1993. The origin of methane in the Earth. In: Howell D G, ed. *The Future of Energy Gases*. Washington: United States Government Printing Office, 57-80
- Gonçalvès J, Violette S, Guillocheau F, Robin C, Pagel M, Bruel D, de Marsily G, Ledoux E. 2004. Contribution of a three-dimensional regional scale basin model to the study of the past fluid flow evolution and the present hydrology of the Paris basin, France. *Basin Research*, 16(4): 569-586
- Gregg J M, Shelton K L. 1989. Minor and trace-element distributions in the Bonnetterre Dolomite (Cambrian), southeast Missouri: Evidence for possible multiple-basin fluid sources and pathways during lead-zinc mineralization. *GSA Bulletin*, 101(2): 221-230
- Hesley E C, Worden R H, Hendry J P. 2000. Cement distribution in a carbonate reservoir: Recognition of a palaeo oil-water contact and its relationship to reservoir quality in the Humbly Grove field, onshore, UK. *Marine and Petroleum Geology*, 17(5): 639-654
- Helgeson H C, Knox A M, Owens C E, Shock E L. 1993. Petroleum, oil field waters, and authigenic mineral assemblages: Are they in metastable equilibrium in hydrocarbon reservoirs. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 57(14): 3295-3339
- Heydari E. 1997. Hydrotectonic models of burial diagenesis in platform carbonates based on formation water geochemistry in North American sedimentary basins. In: Montanez I P, Gregg J M, Shelton K L, eds. *Basin-Wide Diagenetic Patterns: Integrated Petrologic, Geochemical and Hydrologic Considerations*. Tulsa: SEPM Special Publication, 57: 53-79
- Heynekamp M R, Goodwin L B, Mozley P S, Haneberg W C. 1999. Controls on fault-zone architecture in poorly lithified sediments, Rio Grande Rift, New Mexico: Implications for fault-zone permeability and fluid flow. In: Haneberg W C, Mozley P S, Moore J C, Goodwin L B, eds. *Faults and Subsurface Fluid Flow in the Shallow Crust*. Washington, DC: American Geophysical Union, 113: 27-49
- Horita J, Berndt M E. 1999. Abiogenic methane formation and isotopic

- fractionation under hydrothermal conditions. *Science*, 285 (5430): 1055-1057
- Jamison W R. 2016. Fracture system evolution within the Cardium sandstone, central Alberta Foothills folds. *AAPG Bulletin*, 100 (7): 1099-1134
- Jarvie D M, Hill R J, Ruble T E, Pollastro R M. 2007. Unconventional shale-gas systems: The Mississippian Barnett Shale of north-central Texas as one model for thermogenic shale-gas assessment. *AAPG Bulletin*, 91(4): 475-499
- Kendrick M A, Burgess R, Patrick R A D, Leach D. 2002. Hydrothermal Fluid Origins in Mississippi Valley-Type Ore Districts: Combined Noble Gas (He, Ar, Kr) and Halogen (Cl, Br, I) Analysis of Fluid Inclusions from the Illinois-Kentucky Fluorspar District, Viburnum Trend, and Tri-State Districts, Midcontinent United States. *Economic Geology*, 97(3): 453-469
- Laubach S E, Eichhubl P, Hilgers C, Lander R H. 2010. Structural diagenesis. *Journal of Structural Geology*, 32(12): 1866-1872
- Lewan M D. 1997. Experiments on the role of water in petroleum formation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 61(17): 3691-3723
- Lothe A, Gabrielsen R H, Hagen N B, Larsen B T. 2002. An experimental study of the texture of deformation bands: Effects on the porosity and permeability of sandstones. *Petroleum Geoscience*, 8(3): 195-207
- Loucks R G. 2007. A review of coalesced, collapsed-paleocave systems and associated suprastratal deformation. *Acta Carsologica/Karstoslovni Zbornik*, 36(1): 121-132
- Lundegard P D, Land L S, Galloway W E. 1984. Problem of secondary porosity: Frio Formation (Oligocene), Texas Gulf Coast. *Geology*, 12(7): 399-402
- Machel H G, Krouse H R, Sassen R. 1995. Products and distinguishing criteria of bacterial and thermochemical sulfate reduction. *Applied Geochemistry*, 10(4): 373-389
- Maliva R G, Dickson J A D. 1992. Microfacies and Diagenetic Controls of Porosity in Cretaceous/Tertiary Chalks, Eldfisk Field, Norwegian North Sea. *AAPG Bulletin*, 76(11): 1825-1838
- Максимов С П, Дикенштейн Г Х, Лоджевская М И. 1984. 深层油气藏的形成与分布. 胡征钦, 译. 北京: 石油工业出版社, 138-196
- Mancini E A, Li P, Goddard D A, Ramirez V, Talukdar S C. 2008. Mesozoic (Upper Jurassic-Lower Cretaceous) deep gas reservoir play, central and eastern Gulf coastal plain. *AAPG Bulletin*, 92(3): 283-308
- McDonnell A, Loucks R G, Galloway W E. 2008. Paleocene to Eocene deep-water slope canyons, western Gulf of Mexico: Further insights for the provenance of deep-water offshore Wilcox Group plays. *AAPG Bulletin*, 92(9): 1169-1189
- Meulbroek P. 2002. Equations of state in exploration. *Organic Geochemistry*, 33(6): 613-634
- Meyer D, Zarra L, Rains D, Meltz R, Hall T. 2005. Emergence of the Lower Tertiary Wilcox trend in the deepwater Gulf of Mexico. *World Oil*, : 72-77
- Miller Q R S, Kaszuba J P, Schaeff H T, Thompson C J, Qiu L, Bowden M E, Glezakou V A, McGrail B P. 2014. Experimental study of organic ligand transport in supercritical CO<sub>2</sub> fluids and impacts to silicate reactivity. *Energy Procedia*, 63: 3225-3233
- Moore C H. 2001. Carbonate reservoirs: Porosity, evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework, vol 55. New York: Elsevier, 1-460
- National Research Council. 1997. The Dynamics of sedimentary basins. Washington, DC: National Academy of Sciences, 1-43
- Potter J, Konnerup-Madsen J. 2003. A review of the occurrence and origin of abiogenic hydrocarbons in igneous rocks. *Geological Society, London, Special Publications*, 214(1): 151-173
- Sample J C, Woods S, Bender E, Loveall M. 2006. Relationship between deformation bands and petroleum migration in an exhumed reservoir rock, Los Angeles Basin, California, USA. *Geofluids*, 6(2): 105-112
- Sassen R, Moore C H. 1988. Framework of hydrocarbon generation and destruction in eastern Smackover trend. *AAPG Bulletin*, 72(6): 649-663
- Scholle P A, Halley R B. 1985. Burial diagenesis: Out of sight, out of mind! In: Schneiderman N, Harris M (eds). *Carbonate Cements*. Tulsa: SPEM Special Publication, 36: 309-334
- Seewald J S. 1994. Evidence for metastable equilibrium between hydrocarbons under hydrothermal conditions. *Nature*, 370 (6487): 285-287
- Seewald J S. 2001. Aqueous geochemistry of low molecular weight hydrocarbons at elevated temperatures and pressures: Constraints from mineral buffered laboratory experiments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65(10): 1641-1664
- Shanley K W, Cluff R M. 2015. The evolution of pore-scale fluid-saturation in low-permeability sandstone reservoirs. *AAPG Bulletin*, 99 (10): 1957-1990
- Siever R. 1979. Plate-Tectonic Controls on Diagenesis. *The Journal of Geology*, 87(2): 127-155
- Siever R. 1983. Burial history and diagenetic reaction kinetics. *AAPG Bulletin*, 67(4): 684-691
- Simoneit B R T. 1990. Petroleum generation, an easy and widespread process in hydrothermal systems: An overview. *Applied Geochemistry*, 5(1-2): 3-15
- Sugisaki R, Mimura K. 1994. Mantle hydrocarbons: Abiotic or biotic? *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 58(11): 2527-2542
- Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S, Heasler H P, Surdam R C, Hagen E S, Heasler H P. 1989. Organic-inorganic interactions and Sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73(1): 1-23
- Surdam R C, Jiao Z S, MacGowan D B. 1993. Redox reactions involving hydrocarbons and mineral oxidants: A mechanism for significant porosity enhancement in sandstones. *AAPG Bulletin*, 77 (9): 1509-1518.
- Taylor W L, Pollard D D. 2000. Estimation of in situ permeability of deformation bands in porous sandstone, Valley of Fire, Nevada. *Water Resources Research*, 36(9): 2595-2606
- Vandeginste V, Swennen R, Allaeyns M, Ellam R M, Osadetz K, Roure F. 2012. Challenges of structural diagenesis in foreland fold-and-thrust belts: A case study on paleofluid flow in the Canadian Rocky Mountains West of Calgary. *Marine and Petroleum Geology*, 35(1): 235-251
- Worden R H. 1996. Controls on halogen concentrations in sedimentary formation waters. *Mineralogical Magazine*, 60(399): 259-274.
- Zhang S C, Shuai Y H, Zhu G Y. 2008. TSR promotes the formation of

- oil-cracking gases: Evidence from simulation experiments. *Science in China (Series D)*, 51(3): 451-455
- Zhang T W, Amrani A, Ellis G S, Ma Q S, Tang Y C. 2008. Experimental investigation on thermochemical sulfate reduction by H<sub>2</sub>S initiation. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(14): 3518-3530
- Zhang T W, Ellis G S, Ruppel S C, Milliken K, Yang R S. 2012. Effect of organic-matter type and thermal maturity on methane adsorption in shale-gas systems. *Organic Geochemistry*, 47: 120-131
- 蔡进功, 卢龙飞, 包于进, 樊馥, 徐金鲤. 2012. 烃源岩中蒙皂石结合有机质后层间水的变化特征及其意义. *中国科学: 地球科学*, 42(4): 483-491
- 金之钧, 杨雷, 曾溅辉, 张刘平. 2002. 东营凹陷深部流体活动及其生烃效应初探. *石油勘探与开发*, 29(2): 42-44
- 李剑, 王义凤, 马卫, 王东良, 马成华, 李志生. 2015. 深层-超深层古老烃源岩滞留烃及其裂解气资源评价. *地质勘探*, 35(11): 9-15
- 李忠, 韩登林, 寿建峰. 2006. 沉积盆地成岩作用系统及其时空属性. *岩石学报*, 22(8): 2151-2164
- 李忠, 刘嘉庆. 2009. 沉积盆地成岩作用的动力机制与时空分布研究若干问题及趋向. *沉积学报*, 27(5): 837-848
- 李忠. 1998. 沉积盆地大尺度成岩作用研究. *地质前缘*, (3): 157-158
- 罗晓容, 张立宽, 雷裕红, 胡才志, 施辉, 曹斌风. 2016. 储集层结构非均质性及其在深层油气成藏中的意义. *中国石油勘探*, (1): 28-36
- 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 2011. 深层、超深层碳酸盐岩油气储集层形成机理研究综述. *地质前缘*, 18(4): 181-192
- 潘长春, 耿安松, 钟宁宁, 刘金钟. 2006. 矿物和水对干酪根热解生烃作用的影响——Ⅲ. 甾、藿烷(烯)的形成与热演化. *地质学报*, 80(3): 446-453
- 庞雄奇, 姜振学, 黄捍东, 陈冬霞, 姜福杰. 2014. 叠复连续油气藏成因机制、发育模式及分布预测. *石油学报*, 35(5): 795-828
- 彭平安. 2016. 盆地深层多套烃源层演化分析与模拟技术(2011ZX05008-002). 国家科技重大专项结题报告. (本文责任编辑: 刘莹)
- 秦建中, 刘井旺, 刘宝泉, 国建英, 金聚畅, 王东良, 郭树芝, 于国营. 2002. 加温时间、加水量对模拟实验油气产率及地化参数的影响. *石油实验地质*, 24(2): 152-157
- 寿建峰, 张惠良, 沈扬, 王鑫, 朱国华, 斯春松. 2006. 中国油气盆地砂岩储集层的成岩压实机制分析. *岩石学报*, 22(8): 2165-2170
- 寿建峰, 张惠良, 沈扬. 2007. 库车前陆地区吐格朗背斜下侏罗统砂岩成岩作用及孔隙发育的控制因素分析. *沉积学报*, 25(6): 869-875
- 孙丽娜, 张明峰, 吴陈君, 熊德明, 苏龙, 妥进才. 2015. 水对不同生烃模拟实验系统产物的影响. *天然气地球科学*, 26(3): 524-532
- 孙龙德, 邹才能, 朱如凯, 张云辉, 张水昌, 张宝民, 朱光有, 高志勇. 2013. 中国深层油气形成、分布与潜力分析. *石油勘探与开发*, 40(6): 641-649
- 陶伟, 邹艳荣, 刘金钟, 张馨, 张长春. 2008. 压力对黏土矿物催化生烃的影响. *天然气地球科学*, 19(4): 548-552
- 妥进才. 2002. 深层油气研究现状及进展. *地球科学进展*, 17(4): 565-571
- 王永诗, 张守春, 朱日房. 2013. 烃源岩生烃耗水机制与油气成藏. *石油勘探与开发*, 40(2): 242-249
- 张水昌, 朱光有, 何坤. 2011. 硫酸盐热化学还原作用对原油裂解成气和碳酸盐岩储集层改造的影响及作用机制. *岩石学报*, 27(3): 809-826
- 赵文智, 胡素云, 刘伟, 王铜山, 李永新. 2014. 再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景. *天然气工业*, 34(4): 1-9
- 赵文智, 王兆云, 王红军, 李永新, 胡国艺, 赵长毅. 2011. 再论有机质“接力成气”的内涵与意义. *石油勘探与开发*, 38(2): 129-135
- 郑伦举, 关德范, 郭小文, 马中良. 2015. 影响海相烃源岩热解生烃过程的地质条件. *地球科学-中国地质大学学报*, 40(5): 909-917

## ·亮点速读·

### 起源于陨石碰撞的冥古代碎屑锆石

发现于太古代沉积岩中的冥古代(>40亿年)碎屑锆石是了解地球最早期历史的直接样品。锆石的Ti温度计计算显示冥古代碎屑锆石的形成温度可达700℃,另外,锆石中的包裹体存在长英质的矿物。因此,学界多认为这些锆石结晶自地壳深熔而成的花岗质熔体。其他一些地球化学研究(如Li含量和同位素组成)也支持这个看法。由此可推断,地球最早期的板块构造型式与现今相似。但是,也有部

分学者认为低形成温度和长英质矿物包裹体并不一定严格对应于花岗质熔体,也可以是基性熔体。

由于地球早期的陨石碰撞事件可能是比较频繁的,因此近年来有学者通过研究加拿大Sudbury地区陨石碰撞成因的熔体层,对比熔体层的锆石与冥古代碎屑锆石,试图观察冥古代锆石是否可能是陨石碰撞成因的。但是,由于这些研究要么采样范围有限,要么使用的激光溶蚀法可能高估了锆

石的Ti含量,得到的信息不够明确。

爱尔兰的Gavin Kenny及其合作者对Sudbury地区陨石碰撞成因的、经历过分异的熔体层进行了系统采样,并使用离子探针技术对锆石进行分析。新的锆石Ti含量数据及其计算出的温度范围与冥古代碎屑锆石十分吻合。因此,他们指出,冥古代锆石的低Ti含量和温度并不一定对应板块边界的熔融事件,至少部分锆石可以形成于陨石碰撞引起的熔融。

[以上成果来源于: Kenny G G, Whitehouse M J, Kamber B S. 2016. Differentiated impact melt sheets may be a potential source of Hadean detrital zircon. *Geology*, doi: 10.1130/G37898.1]