

https://doi.org/10.3799/dqkx.2018.323



盆地多尺度构造驱动的流体-岩石作用及成储效应

李 忠^{1,2}, 罗 威¹, 曾冰艳¹, 刘嘉庆¹, 于靖波¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 以往的流体-岩石作用研究, 主要针对中小尺度的非构造应变机制, 制约了盆地中大尺度客观规律的认识. 从盆地形成演化动力学视角, 梳理了盆地尺度构造驱动的流体-岩石作用的概念模型或工作模式, 并结合典型实例, 解析和讨论了构造-流体-岩石作用的关键过程、控制要素以及成储效应. 对比研究表明, 构造驱动的碳酸盐岩和碎屑岩的流体-岩石作用, 无论类型、强度和分布均存在显著不同. 对于碳酸盐岩储层, 即便是弱应变阶段, 与微裂缝有关的扩溶及充填-胶结作用在构造圈闭范围内也具有普遍意义. 反观碎屑岩(砂岩), 弱应变阶段发育了特征的变形条带及其构造成岩演变序列; 而强应变将可能导致深层碎屑岩(微)裂缝及其相关构造-流体-岩石作用的发育, 并可能在相当程度上改善储集性. 研究表明, 流体介质压力环境的强烈更变、应力/应变改造岩矿稳定性、以及流体-岩矿反应界面和空间的快速/强烈更变, 是构造驱动流体-岩石作用研究的关键.

关键词: 构造应变; 流体-岩石作用; 碳酸盐岩储层; 碎屑岩储层; 盆地动力学; 石油地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2018)10-3498-13

收稿日期: 2018-05-11

Fluid-Rock Interactions and Reservoir Formation Driven by Multiscale Structural Deformation in Basin Evolution

Li Zhong^{1,2}, Luo Wei¹, Zeng Bingyan¹, Liu Jiaqing¹, Yu Jingbo¹

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: Fluid-rock interactions in sedimentary basins have been focused on the non-structural genetic mechanisms on medium and small scales in most papers published, which has constrained the understanding of the objective laws on basin-scale. The conceptual models or working modes of fluid-rock interactions driven by structural deformation (FRIDSD) in sedimentary basin evolution are presented in this paper. Combined with the typical cases on carbonate and clastic reservoirs studied, key processes, control factors and reservoir-forming effects of FRIDSD are analysed and discussed. It is indicated that there are significant differences of FRIDSD between carbonates and sandstones in the type, intensity and distribution, exist between carbonates and sandstones. For carbonate reservoirs, it cannot be neglected that, even in weak structural deformation, dissolution and filling-cementation of carbonates related to a lot of microcracks also develop over structural traps. On the other hand, for clastic (sandstone) reservoirs, diagnostic deformation bands and their related structural diagenesis, with few microcracks, develop in weak structural deformation. However, intensive structural deformation most probably makes more (micro-) cracks and promotes FRIDSD in sandstones, which may also improve the deep-buried reservoir property to a certain extent. It is pointed out that key problems of FRIDSD mainly include intensive change of fluid pressure, petrological-mineral stabilities modified by strain, intensive/rapid change of reactive surface and volume on fluid-rock interactions.

基金项目: 国家科技重大专项(No.2017ZX05008-003); 中国科学院 A 类战略性先导科技专项(No.XDADA14010201-02).

作者简介: 李忠(1964-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事沉积学与盆地动力学研究. ORCID: 0000-0002-8495-5896.

E-mail: lizhong@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 李忠, 罗威, 曾冰艳, 等, 2018. 盆地多尺度构造驱动的流体-岩石作用及成储效应. 地球科学, 43(10): 3498-3510.

Key words: structural deformation; fluid-rock interaction; carbonate reservoir; clastic reservoir; basin geodynamics; petroleum geology.

0 引言

1980 年代末期至 1990 年代初期,国际上掀起了地质流体、水-岩相互作用及其过程模拟的研究热潮,对含油气盆地流体的研究也蓬勃兴起(Bjørlykke *et al.*, 1988; Powley, 1990; Wolf and Chilingar, 1992, 1994).这一研究思路的核心旨在从更高的层次上认识成岩反应、物质输运及其驱动机理,由此成岩作用研究进入了过程研究和动力学研究的新阶段(李忠等, 2006a, 2006b).也正是从这一时期开始,学术界使用“流体-岩石作用”的频次逐渐增加,大有取代“成岩作用”之势(尽管二者含义不尽相同).

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、能量和动量的输运载体.因此,它是流体-岩石作用系统中最活跃的因素(李忠, 2016).尽管重力、压实、构造驱动很早就被认为是流体驱动的主要机制(Garven, 1995),但在相当长时间内与构造驱动相关的流体-岩石作用机理并未得到多数学者的关注,或者说研究难度极大.近十余年来,基础构造应变与岩石物理研究以及深层油气勘探带动的地质-地球化学及地球物理研究,使得学术界对构造驱动下的流体-岩石作用机理有了新的认识,但总体缺乏系统性,专属性问题也远未得到解决.我国多数沉积盆地经历过多次强烈构造应变,也是深层油气勘探投入较大的国家,自 2006 年以来在国家层面就持续实施了若干有关盆地深层的重点和专项计划,其中不乏涉及油气成储-成藏中的流体-岩石作用研究内容.本文基于国内外盆地流体-岩石作用的研究成果,试图梳理出盆地多尺度构造驱动的流体-岩石作用的概念模型/工作模式及其在深层的特征;并结合笔者的研究实践,讨论盆地深层构造-流体-岩石作用关键过程、控制要素以及成储效应.

1 流体-岩石作用:盆地动力学的视角

沉积盆地研究的思想虽然可以追溯至 1950 年代以前,但究其学科发展性质,学术界普遍认为应该始于 1960 年代(Potter and Pettijohn, 1963);至 1990 年代,地质学与地球物理学在盆地研究领域的结合取得了显著发展,形成了影响至今的现代盆地动力学的研究框架(Dickinson, 1993; 李思田, 1995).

现代盆地动力学的基本研究内容包括 4 个方面:盆地充填动力学、盆地构造动力学、盆地流体-岩石作用(化学)动力学、盆地形成演化的地球动力学.盆地形成演化的驱动机制,这是盆地地球动力学的核心目标;而解析盆地构造、沉积(充填)、流体(孔隙水)记录及其形成演变,则是开展盆地地球动力学研究的基础,后者则可谓盆地研究的“上层建筑”.

盆地形成演化驱动机制的研究对象是什么?在盆地地球动力学领域,前人比较多关注的是“形成”,即盆地的“沉降”和“充填”机制(Ingersoll and Busby, 1995; Ingersoll, 2012; Allen and Allen, 2013),而疏于对充填期后“演化”,即盆地的“深埋-剥露转换”和“改造-调整”驱动机制的研究.显然,盆地的沉降和充填机制的信息,直接或间接地、连续或不连续地都可以从构造、沉积(充填)以及流体(孔隙水)记录中获得.另一方面,对于盆地充填期后的改造-调整过程,一般难寻可供解析的沉积记录,余下构造、流体(流体-岩石作用)记录成为候选,尽管其可识别度并不显著(图 1).值得注意的是,理论上流体活动以及相关流体-岩石作用记录往往可以连续且多层位(窗口)重现盆地动力学演变的相关信息,但这方面的研究非常薄弱.

事实上,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

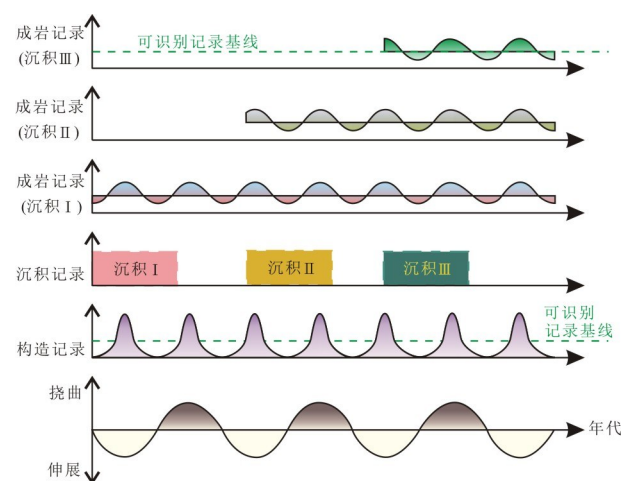


图 1 沉积盆地动力学演化主要地质记录的延续时段与可识别度示意图

Fig.1 Time ranges and identification degree for major geological records responding to basin geodynamical evolution

义)过程以及成岩后改造过程(又称后生过程)。因此,将流体-岩石作用纳入盆地动力学研究范畴,不仅有其科学性,而且有其必要性。另一方面,作为物质、能量和动量运输的重要载体,对盆地流体性质及其活动方式和期次的研究,将有助于深入认识有机-无机成岩反应机理和序列(Bethke, 1985; Bjørlykke *et al.*, 1988; Bjørlykke and Egeberg, 1993; Bjørlykke, 1994),并有助于揭示盆地时空结构及动力学演变(李忠等, 2006a, 2006b; 李忠和刘嘉庆, 2009)。

应该说,从盆地类型和演化角度认识流体-岩石作用过程,构建成岩作用知识体系,一直也是现代成岩作用研究的重要方向。Siever(1979)较早开展了从区域构造单元和盆地尺度讨论成岩作用的研究,但并未成为国际热点。随着 1990 年代以来的现代盆地动力学的兴起,对盆地演化中构造和温压体制的定量化分析逐步深入,这也使得研究不同盆地充填物的成熟演化逐渐成为盆地分析关注的主要内容(Allen and Allen, 1990)。就这一领域,笔者及合作者曾经提出成岩场的概念和研究思路(李忠, 1992; 孙永传等, 1996),并建议从盆地域、层序域、亚层序域、层内域 4 个尺度进行划分和开展系统研究(李忠等, 2006b)。

但是,由于盆地类型及其温压、流体演化的复杂性,因此从盆地动力学角度认识流体-岩石作用体系,或者说从流体-岩石作用记录反演盆地动力学

演化过程的研究,近 20 年来尽管进展颇多(Garven, 1995; Land, 1997; Moore, 2001; Garven *et al.*, 2001; Worden *et al.*, 2016),但无论理论还是方法体系仍不完善;而对于那些复杂的叠合盆地以及盆地深层而言,已有认识的局限性更加突出。

2 盆地流体-岩石作用:从非构造到构造驱动

流体成因来源和驱动机制是流体-岩石作用研究的基础问题。

理论上,盆地流体来源存在无机和有机之分。无机来源一般可以划分 3 大端员类型,即大气水、压实水、温压水(Galloway, 1984; Bjørlykke *et al.*, 1988);有机来源也大致可以划分为沉积、压实、热解-裂解 3 类。然而,由于无机-有机混合作用和温压相变影响,盆地流体的成因来源极其复杂,判识并非易事。对此,本文不再赘述,以下重点讨论驱动机制。

关于盆地流体的驱动机制,以往以深度和/或流体压力系数为原则的划分为多数学者接受(Galloway, 1984)。在这一体系下,静水压力、静岩压力及其过渡状态分带产出或交替出现;相应地,重力、差异压实驱动的流体活动交替发育,而热-盐-密度差驱动的对流活动则局域发育,平衡或调节大尺度盆地流体活动。

研究表明,大多数浅层流体活动以大气水循环、

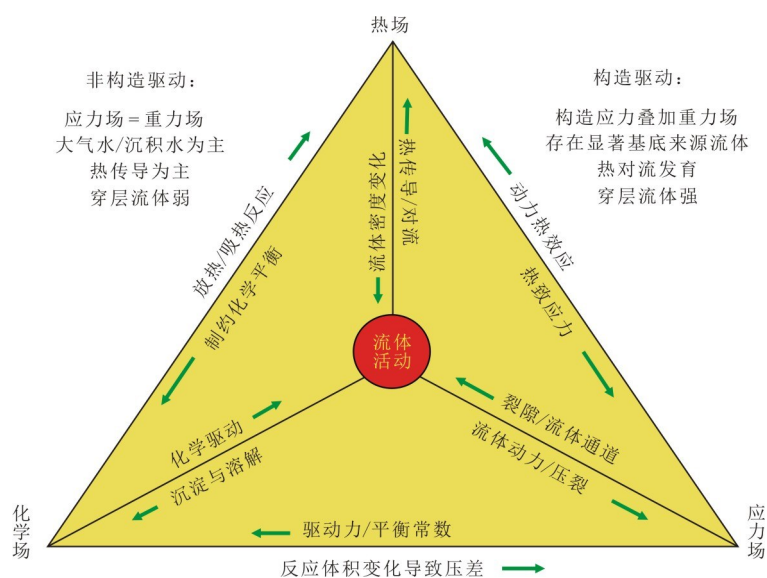


图 2 盆地流体活动与相关流体-岩石作用要素示意图

Fig.2 Basin fluid flow and its related key factors on fluid-rock interactions

据李忠(2016)修改

限制性层内循环为特征,重力、差异压实是其主要驱动机制(Galloway, 1984; Bjørlykke *et al.*, 1988; Allen and Allen, 2013);而深层主要以区域性垂向、幕式活动为特征,热盐对流驱动、构造诱发驱动可能成为主要机制(Gonçalvès *et al.*, 2004; 李忠等, 2006a)。

另有研究提出,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、分子扩散力驱动机制(庞雄奇等, 2014)。然而,由于目前的认识大多还是基于浅层迹象的推理或理想实验,而对深层流体及相态的实际观测还很少。

尽管如此,从已有观测可以合理推测,自浅层到深层,除了温度、压力递增外,盆地的流体活动方式和驱动机制可能存在明显差异。而值得注意的是,温压以及流体条件的变化(以深度为主的参照系)是以往大多数成岩序列和成岩剖面构建的基础。

以往对流体-岩石作用的研究,重点聚焦的是深度剖面上的温压体系,以及流体本身的来源、属性及其成岩-成矿(藏)动力学效应;而涉及其盆地流体-岩石作用驱动机制方面,实证性的研究主要针对非侧向构造应变制约的盆地演变(Garven *et al.*, 2001; Worden *et al.*, 2016),或者说关注的是近于垂向沉降/隆升为主的、均匀介质内的形成演变特征,而疏于空间上构造应变非均质性的考察。

事实上,无论在盆地尺度还是局域尺度,侧向构造应变及其非均质性普遍存在(图 2)。因此,缺乏构造应变与流体-岩石作用相互关系认识的研究,不仅难于完整揭示盆地流体-岩石作用的时空结构,其认识结论也很难真正对盆地动力学起到支撑作用。

3 盆地构造-流体-岩石作用的研究框架

3.1 早期研究与定义

构造变动是与气候变动并列的、控制盆地演化的基本驱动力,因此现代盆地动力学研究中对充填演化与不同级别构造变动的关系给予了广泛关注。然而,在盆地流体-岩石作用方面,以往对构造驱动的研究远远不够,相关认识也仅仅是框架性的,如前所述,主要考察的是成岩记录与区域性隆凹、埋藏历史或盆地一级构造格架的关系(Garven, 1995; Roure *et al.*, 2010)。

21 世纪初以来,对构造驱动的流体活动即构造-流体活动的研究有了明显加强。随着观测数据和解剖实例的积累,特别是大批量原位组构观测、流体示踪以及模拟技术的发展,有关不同尺度构造应变与流体-岩石作用关系的研究(Fossen *et al.*, 2007; Manzocchi *et al.*, 2010; Vandeginste *et al.*, 2012; Mangenot *et al.*, 2018),使得认识古流体活动与盆地构造体制的关系成为可能。由此导致了构造成岩作用(structural diagenesis)的提出(Laubach *et al.*, 2010),以及相关构造-流体-岩石作用研究的兴起(李忠和刘嘉庆, 2009; 李忠, 2016)。

关于构造-流体-岩石作用或构造成岩作用的定义,目前国内学术界有混淆趋势,主要体现在将其含义扩大化,将一些非构造驱动的流体-岩石作用也纳入其中。这显然背离了提出这一概念的初衷,也使得相关研究缺乏针对性。本文主张构造-流体-岩石作用,是指在岩石(或沉积体)由于发生构造应变而驱动形成的流体-岩石作用结果,其流体活动主要是构造应变的响应,与无应变的岩石(或沉积体)中单纯重力、差异压实驱动的流体活动不同。

显然,构造-流体-岩石研究正在改变以往对盆地动力学研究内容的认识(李忠, 2013, 2016),换句话说,针对构造-流体-岩石作用记录的流体力学研究正在成为新的研究前沿,而科学的理论模型、工作模式和有效的研究方法,这是一个新的研究领域能否持续深入的关键。

3.2 构造-流体-岩石作用研究框架

对盆地构造驱动的流体-岩石作用的研究,基于已有研究进展,其基本研究框架建议按 3 级划分(表 1)。

(1)应变强弱划分大类:即强应变构造、弱应变构造,前者以发生显著位移的破裂和应变为标志,后者仅发育变形条带(deformation band)和/或节理迹象。

(2)按构造尺度划分亚类:即一级构造单元(盆地)、二级构造单元(区带)、三级构造单元(圈闭)。

(3)按应变属性和/或几何形态划分种类:对于强应变构造大类的种类,如伸展型、挠曲型、冲断型、走滑型,或背斜、向斜、正断裂、逆断裂的划分。对于弱应变构造大类的种类,依据国际现行认识,其基本应变单元可从运动学和动力学角度加以分类,前者包括 3 种端员类型(扩张、剪切、压实条带)和两种过渡类型(扩张剪切、压实剪切条带)(Schultz and Fossen, 2008),后者分为解聚(disaggregation)或颗粒流(granular flow)条带、层状硅酸盐涂抹条带、碎

表 1 盆地构造—流体—岩石作用研究的基本分类

Table 1 The principal classification for a research on structure deformation-fluid-rock interactions in sedimentary basins

大类	理论模型		定义	类型划分及支撑依据	实例文献
	亚类	种类			
强应变构造	一级	伸展型	盆地尺度构造—流体活动; 穿层流体影响二级以上层序	按盆地构造类型划分: 主要依据数值模拟; 实际地质记录支撑较弱或缺乏	Garven(1995) Allen and Allen (2013)
		挠曲型			
		冲断型 走滑型			
强应变构造	二级	(多种组合)	盆地区带尺度构造—流体活动: 一系列成因相近的构造组成	按盆地区带构造组合类型划分: 主要依据实际地质记录支撑, 但支撑较弱	Davies and Smith (2007)
	三级	背斜 向斜 正断裂 逆断裂	圈闭尺度构造—流体活动: 单一构造及配套要素组成	按单一构造类型划分: 主要依据实际岩石—矿物—地化等地质记录支撑, 流体证据丰富	Davies and Smith (2007)
弱应变构造	一级 二级 三级	扩张 剪切 压实	构造单元边界断裂不活动, 内部岩层总体无显著应变, 变形条带、隐形裂缝发育; 流体穿层活动弱	按应变属性划分: 依据实际岩石—矿物—地化等地质记录支撑; 盆地/一级、区带/二级尺度认识较弱, 三级构造内流体证据丰富	Fossen <i>et al.</i> (2007) Schultz and Fossen (2008)

裂(cataclastic)条带、溶蚀—胶结条带等 4 类(Fossen *et al.*, 2007)。

4 盆地构造—流体—岩石作用成储效应解析

盆地多尺度构造—流体—岩石作用的研究, 总体处于初级阶段, 这是不争的事实, 但近年来在部分油气盆地中, 针对盆地中大尺度构造单元流体—岩石作用的实证性(而不是概念性)研究成果与日俱增(Davies and Smith, 2007; Vandeginste *et al.*, 2012; Worden *et al.*, 2016; Mangenot *et al.*, 2018)。以下结合笔者研究实践, 分别就碳酸盐岩和碎屑岩中大尺度构造—流体—岩石作用成储效应的典型实例作解析。需要说明的是, 以往相关碎屑岩构造—流体—岩石作用的实证性研究极少, 故作重点讨论。

4.1 盆地深埋碳酸盐岩构造—流体—岩石作用

有关碳酸盐岩构造—流体—岩石作用的研究, 以往国内外工作较多, 无论在北美、欧洲、中东和中国都有很多典型研究实例(Davies and Smith, 2007; 李忠, 2013, 2016)。梳理碳酸盐岩构造—流体—岩石作用特征, 如下问题值得深入讨论:

(1) 与硅酸盐矿物为主构成的碎屑岩相比, 碳酸盐岩成岩作用对构造—流体体制演变具有更大的敏感性(李忠和刘嘉庆, 2009; Laubach *et al.*, 2010; Agar *et al.*, 2013)。也正因为如此, 有关具备碳酸盐

岩强应变构造特征的实例比比皆是。但是, 是否碳酸盐岩就不存在弱应变构造—流体—岩石作用呢? 笔者的初步回答是否定的。因为, 尽管碳酸盐岩不像碎屑岩那样易于产出变形条带, 但弱应变阶段碳酸盐岩很容易产生隐形裂缝, 并在此基础上很容易发生大面积扩溶以及充填—交代等作用, 后者既是构造—流体—岩石作用的结果, 也因此使得“隐形裂缝”的记录难于识别。

(2) 除了构造活动尺度和样式外, 碳酸盐岩构造—流体—岩石作用存在明显的浅表层和深层之分。Davies and Smith(2007)给出的经典模式无疑是深层构造—流体—岩石作用的代表。准确识别不同期次的流体活动及其与构造驱动的关系, 这既是一个关键研究环节, 同时也是一个难点。

笔者对塔里木盆地塔中奥陶系鹰山组不同构造单元碳酸盐岩胶结物原位碳氧同位素(图 3)、流体包裹体、微区锶同位素的研究, 表明有效储层往往经历了浅表层构造—地貌控制的岩溶作用、深层构造—热流体控制的溶蚀—交代作用的多期叠加(李忠等, 2016)。基于原位流体—岩石作用记录与埋藏—热历史的匹配研究(图 3, 4), 笔者认为中晚奥陶世北西走向逆冲断裂主要对岩溶起控制作用(图 3 中 C2); 志留—泥盆纪北东向或南北向转换或左旋走滑断裂, 乃至晚石炭世末期—二叠纪张裂—热流体活动, 主要控制中—后期总体沿北东向断裂及其与北西向断裂交叉部位的岩石破裂和热流体扩溶作用(图 3 中 C4)。

(3) 对于深埋碳酸盐岩规模储层的构造—流

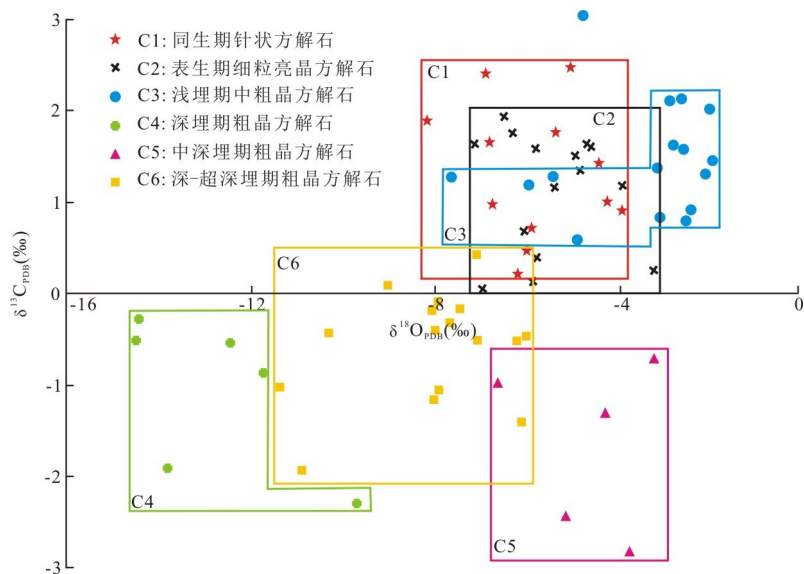


图 3 塔中鹰山组碳酸盐胶结物原位碳-氧同位素特征

Fig.3 Scatter diagram for in-situ isotopic values of oxygen and carbon of the Yingshan Formation carbonate cements, Tazhong
据李忠等(2016)修改

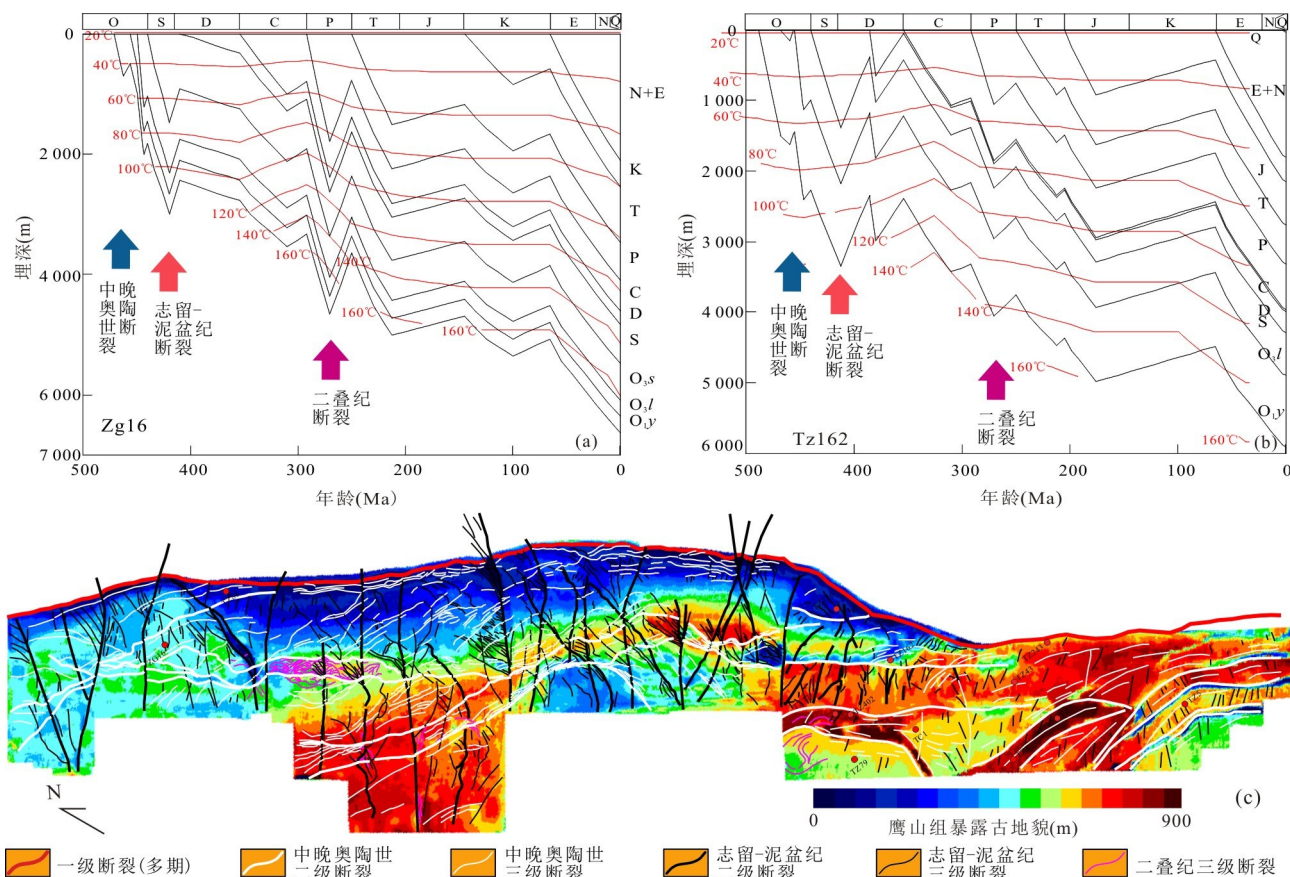


图 4 塔中鹰山组碳酸盐岩主要构造-流体活动的时空界定

Fig.4 Spatio-temporal identification for major structural-fluid records in the Yingshan Formation carbonates, Tazhong
图 a 为塔中西北部 Zg16 井区埋藏-热演化史与 3 期断裂活动标定;图 b 为塔中西北部 Tz162 井区埋藏-热演化史与 3 期断裂活动标定;图 c 为不同期次和级序断裂与鹰山组沉积晚期暴露古地貌叠合图

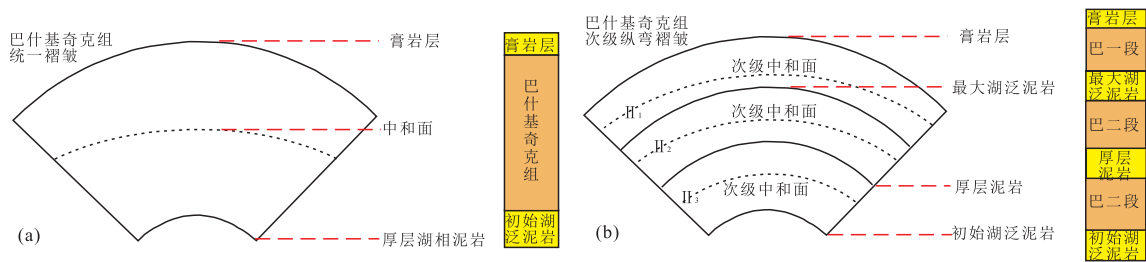


图 5 库车坳陷克深 201 井区巴什基奇克组统一背斜(a)与次级纵弯背斜(b)划分对比

Fig.5 Comparison between the unifying anticline (a) and its subordinate bending one (b) of the Basijiqike Formation in the Keshen-201 region, Kuqa Depression

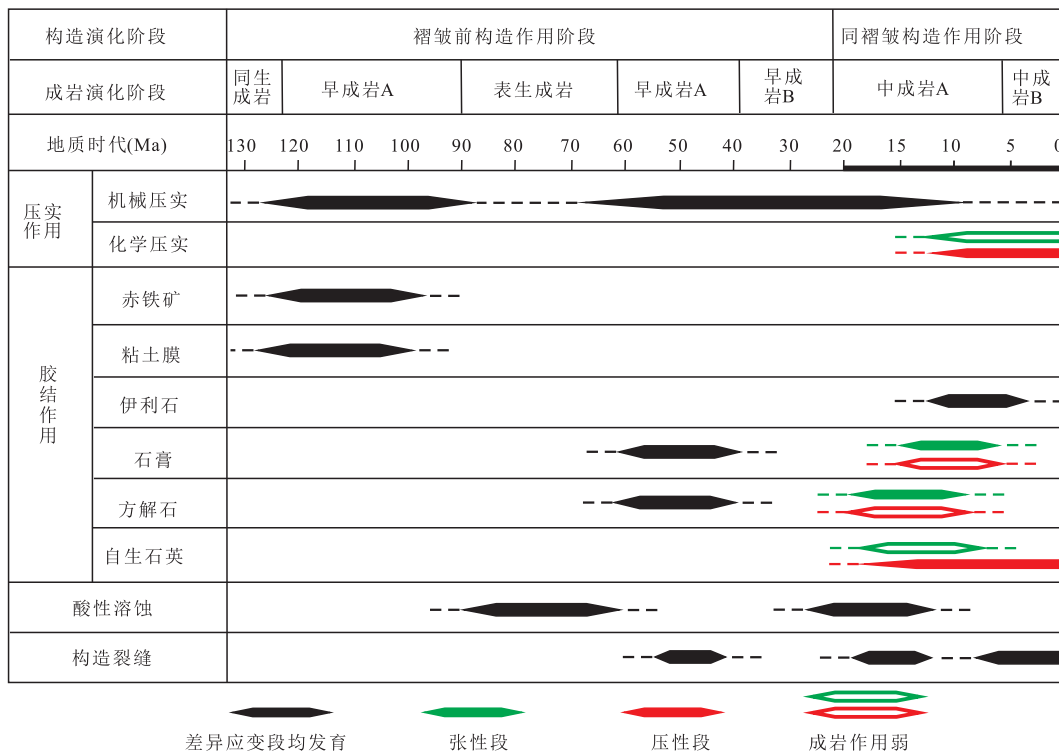


图 6 克深 201 井区巴什基奇克组次级纵弯背斜构造差异应变段储层成岩演化序列及对比

Fig.6 Diagenetic sequences for sandstone reservoirs in differential strain sections, corresponding to the subordinate bending anticlines of the Basijiqike Formation in the Keshen-201 region, Kuqa Depression

体-岩石作用,由上而下的大气水、由下而上的深层热流体循环系统记录可能均不可忽视。目前对深层热流体的成岩-成储效应存在诸多争议,包括以往提出的一些深层构造控制的、有效的云化、硅化作用,一些学者认为也并非对储层有规模性、建设性改造,反而可能是充填、破坏作用效应。对此,分别以塔里木盆地塔河、塔中奥陶系碳酸盐岩为例,笔者作了统计分析,结果表明:储层段存在明显的盆地热流体活动证据,而非储层段则早期胶结显著,且盆地热流体活动证据少见或缺乏。当然,这一问题的解决仍然有待研究。

4.2 盆地深埋碎屑岩构造-流体-岩石作用

4.2.1 库车白垩系深层巴什基奇克组背斜层间滑脱构造应变分级

对于塔里木盆地山前挠曲冲断带深层非煤系巴什基奇克组,其上部发育巨厚的库姆格列木组膏岩层,成为顶部主滑脱层;巴什基奇克组底部为巴西盖组厚层的湖相泥岩,成为底部主滑脱层,巴什基奇克组整体在上下滑脱层夹持之下形成背斜构造。据此,前人将巴什基奇克组自上而下分为张性段、过渡段和压性段 3 部分(韩登林等,2011;王招明等,2016;杨宪彰等,2016),探讨其对储层的差异影响。但将巴什基奇克组作为一个整体的褶皱

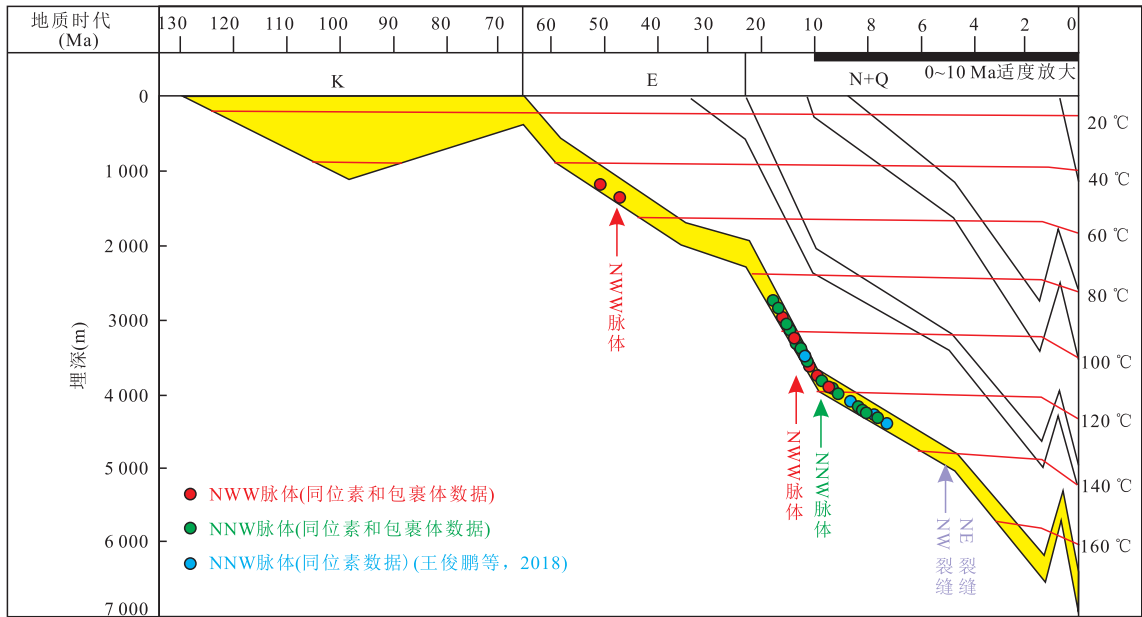


图 7 克深地区巴什基奇克组砂岩储层埋藏史与裂缝充填物形成时空厘定

Fig.7 Burial history and spatial-temporal fields of fracture-filling cements for the Basijiqike Formation sandstone reservoirs in the Keshen-201 region, Kuqa Depression

体系进行研究,显然是比较粗略的处理办法,主要表现在:(1)所谓巴什基奇克组张性段、过渡段和压性段 3 部分的砂岩物性差异不大,甚至出现物性反转;(2)缺乏构造-流体-岩石作用证据。

为此,以埋深达 6 000~7 000 m 的克深地区巴什基奇克组砂岩储层为例开展深入解析。首先基于岩相组合,结合垂向上岩石电阻率和密度的变化趋势以及构造裂缝分布特征等证据,在巴什基奇克组内部识别出两套次级泥岩滑脱层,将克深地区 201 井区巴什基奇克组背斜构造进一步分为 3 层(II₁、II₂、II₃)纵弯褶皱(图 5),其每个“构造层”的构成大致相当于四级/五级层序。由此建立了构造应变格架工作模式——对应表 1 中的强应变构造大类、三级(圈闭)构造亚类、背斜种类。

4.2.2 构造差异应变段砂岩成岩-成储效应 成岩现象观察与对比研究表明,巴什基奇克组次级纵弯背斜构造差异应变段(张性段和压性段)储层成岩演化序列与早期建立的笼统的巴什基奇克组背斜砂岩储层成岩演化序列差异明显(图 6)。

上述次级张性段典型成岩演化序列为:早期压实作用→赤铁矿、粘土矿物胶结作用→构造抬升导致的长石和岩屑溶蚀作用→深埋早期方解石和硬石膏胶结作用与构造裂缝→有机酸充注导致的长石与岩屑溶蚀作用和少量石英次生加大→晚期铁方解石和硬石膏胶结。总体张性段砂岩晚期压溶弱,张裂缝发育。

而压性段典型成岩演化序列为:早期压实作用→赤铁矿、粘土矿物胶结作用→构造抬升导致的长石和岩屑溶蚀作用→深埋早期方解石和硬石膏胶结作用与构造裂缝→有机酸充注导致的长石与岩屑溶蚀作用和少量石英次生加大→晚期铁方解石和硬石膏胶结与构造裂缝。总体压性段砂岩晚期压溶强,紧闭裂缝较发育。

针对不同成岩矿物,开展了流体包裹体、(微区)氧同位素测试,分析结果与前人资料(张惠良等, 2014; 毛亚昆等, 2015; 潘荣等, 2018)表明,早期方解石胶结物沉淀温度分布在 43.5~53.7 °C 之间;晚期方解石沉淀温度分布在 95.6~99.1 °C 之间,同时流体包裹体测试显示均一温度峰值主要分布在 90~110 °C 之间,少量分布在 110~130 °C 之间。因此,结合储层埋藏演化史(图 7)可以确定方解石胶结物形成时间,进而限定其成岩演化阶段(图 6)。

分析次级纵弯褶皱构造差异应变段储层成岩演化特征,可以看到差异应变段早中期(浅-中埋深)成岩作用类似,分异较弱;而后期分异显著:张性段晚期方解石、硬石膏等相对发育,压性段晚期石英胶结相对发育(图 6)。此外,根据裂缝充填物分析,早中期(浅-中埋深)NWW、NNW、NNE 向构造裂缝(张仲培等, 2006; 王俊鹏等, 2014, 2018)大多被充填胶结,而有效的、沟通孔隙的破裂(充填极小或无)主要为 5 Ma 以来发育的 NW 和 NE 向破裂(图 7),

且主要产出于次级纵弯褶皱构造的张性段。

综上,次级纵弯褶皱构造差异应变段砂岩储层流体一成岩差异演化明显.在三层次级纵弯背斜构造中,进一步选取微相类型相同的砂岩进行大批量($n=710$)统计,表明张性段较压性段平均孔隙度高出 2.8%,这对于平均孔隙度仅为 5%~7%的砂岩储层而言是显著的,反映差异应变是控制其储层差异演化的重要因素.反之,笼统对巴什基奇克组背斜构造按一个中和面划分统计,其差异应变段储层成岩演化差异较小(孔隙度均值 $<1\%$),对储层控制作用也不显著。

5 讨论

5.1 构造—流体—岩石作用基本特征

构造—流体—岩石作用的研究,目前主要认识集中在盆地中小尺度,甚至微观尺度.由于岩石组构及其物理—化学属性的差异,构造驱动的碳酸盐岩和碎屑岩的流体—岩石作用,无论类型、强度和分布均存在显著不同(表 2)。

对于碳酸盐岩,快速胶结成岩是其构造破裂、压溶,以及相关流体—岩石作用广泛发育的内在原因之一;而主要岩石组成物理—化学稳定性较弱,则是在弱应变阶段,构造—流体—岩石作用就比较显著的另一重要内因。

反观碎屑岩(砂岩),慢速胶结成岩使得碎屑颗粒具备较强的应变调整能力,因而发育了特征的变形条带及其构造成岩演变序列(表 2),加之岩石组构中存在大量物理—化学稳定性较强的硅酸盐颗

粒,其(微)裂缝发育的频度和广度也远不及碳酸盐岩,尤其在弱应变阶段.当然,对于深层—超深层致密碎屑岩,强应变将可能在相当程度上改善(微)裂缝及其相关构造—流体—岩石作用的发育,并有利于规模储集空间的形成分布。

此外,考察构造—流体—岩石作用分布特征,总体上盆地深层较浅层发育.这可能与深层异常高压条件下的岩石应变强度的减弱有关(Suppe, 2014),也可能与高温高压(演变)下的流体物理—化学属性、矿物结晶属性有关(李忠, 2016)。

5.2 构造—流体—岩石作用驱动机制

前已述及,无论在盆地尺度还是局域尺度,(侧向)构造应变及其非均质性均普遍存在.就目前已有的观测和认识,笔者认为,与非构造驱动不同,构造驱动的流体—岩石作用的特色机制或本质,可能表现在如下 3 方面:

其一,流体介质压力环境的强烈更变及其流体—岩石作用效应.构造驱动,尤其是不同尺度断裂对流体活动的制约,都会引发流体介质压力环境的快速、强烈更变.在这方面,较早的研究已经触及,如对高压振荡流体的分析,其直接动因就是与欠压实地质体相关的断层闸门活动和/或封盖层渗透性演替相关.学者们已经认识到,盆地高压振荡流体活动可能对自生硅酸盐环带矿物、局域和大尺度碳酸盐胶结分带(Tigert and Alshaiib, 1990; 李忠等, 2003)、成烃以及成烃—成岩相互作用产生重要控制(Dewers and Ortoleva, 1988; Williamson, 1995)。

其二,固体介质受应力/应变改造而发生矿物稳定性变化.构造叠加作用促进骨架颗粒和基质矿物

表 2 盆地深埋过程中构造驱动的碳酸盐岩和碎屑岩的流体—岩石作用对比

Table 2 Comparison of fluid-rock interactions driven by structure deformation between carbonates and sandstones in basin deep-buried processes

岩类	作用类型	碳酸盐岩	碎屑岩(砂岩)
弱应变	压实/压溶	内生节理广泛发育,存在破裂作用,微裂缝及压溶局域发育	压实变形条带广泛发育
	胶结/充填	在碱性介质条件下,可促进局域粒间胶结和裂缝充填作用	对胶结和充填作用影响不大
	溶蚀/扩溶	在酸性介质条件下,可促进局域溶蚀和裂缝扩溶作用	对溶蚀和扩溶作用影响不大
强应变	压实/压溶	破裂和压溶作用广泛发育	促进压实/压溶作用,微裂缝局域发育,变形条带局域保存
	胶结/充填	可促进应变区域范围内的粒间胶结和裂缝充填作用、交代/云化作用	可在应变范围内或局域促进粒间胶结和裂缝充填作用
	溶蚀/扩溶	可促进应变区域范围内的溶蚀和裂缝扩溶作用	可在应变范围内或局域促进溶蚀和裂缝扩溶作用

发生破裂、压溶,这是沉积岩中常见的作用类型,也易于在不同尺度识别(Fossen *et al.*, 2007; Agar *et al.*, 2013; 李忠, 2016).前述库车白垩系构造中和面控制的碎屑岩组构差异也是说明相关机制的良好实例.然而,目前难于认识和预测的是,深部复杂的温压环境、复杂的流体介质条件如何控制岩矿变形、破裂和压溶的结构分异.

其三,流体-岩矿反应界面和空间的快速、强烈更变.岩矿变形、破裂致使其与流体反应界面和空间发生快速、强烈更变,间接也影响了介质压力和温度的扰动,从而制约着流体-岩石作用和产物形成速率和分布格局.这在碎屑岩多期次破裂控制石英快速生长(Laubach *et al.*, 2010)、碳酸盐岩构造-热流体云化和硅化改造(Davies and Smith, 2007; 李忠等, 2016)中均有显著表现.

应该说,构造驱动的流体-岩石作用过程具有相对快速、强烈变化的特点,因此针对天然实验室或结合自然观测开展实验模拟,可能不失为一种有效方法.但目前这一领域的研究仍然面临诸多难题,特别是针对盆地尺度构造-流体-岩石作用记录研究,其中的关键技术及科学问题值得关注,主要有:

(1)脆性构造及其相关流体活动期次识别、定年和大尺度追踪对比;(2)古构造应变测定和恢复;(3)构造-流体-岩石作用基础研究单元尺度界定及其相互关系(模型);(4)盆地深埋构造/岩石流变与流体-岩石作用动态演化及其相互作用机制;(5)构造驱动的流体-岩石作用与实验-数值模拟研究的配套和客观解析.

6 结论

(1)流体-岩石作用是盆地构造和非构造共同驱动的结果,但前者研究认识极弱,特别在针对大尺度对象方面.为此,本文综合提出了不同尺度构造驱动的流体-岩石作用的概念研究模型或工作模式,并认为构造-流体-岩石作用记录可以连续且多窗口重现盆地动力学演变信息.

(2)对比研究表明,由于岩石组构及其物理-化学属性的差异,构造驱动的碳酸盐岩和碎屑岩的流体-岩石作用,无论类型、强度和分布均存在显著不同,但总体上盆地深层较浅层显著发育.

(3)尽管碳酸盐岩不像碎屑岩那样易于产出变形条带,但弱应变阶段碳酸盐岩很容易发生隐形裂隙,并在此基础上很容易发生大面积扩溶,以及充

填-交代等作用;此外,深埋、强应变碳酸盐岩储层受控于盆地构造控制的由上而下的大气水、由下而上的深层热流体-岩石作用,二者均不可忽视.

(4)构造驱动的碎屑岩流体-岩石作用行为,不仅在强应变阶段,而且在弱应变阶段均显示出特殊性.实例研究指出,受控于盆地构造应变过程,库车白垩系背斜层间滑脱构造应变分级明显,次级纵弯褶皱构造(地层厚度相当四级层序)差异应变段砂岩流体-成岩作用与储层物性差异演化明显,而且这种差异主要发生在盆地强应变期.

(5)构造驱动流体-岩石作用的实质是,流体介质压力环境的强烈更变,固体介质受应力/应变改造而发生矿物稳定性变化,以及流体-岩矿反应界面和空间的快速、强烈更变.这些特征作用机制及其成储效应,在盆地不同尺度(尤其大尺度)上的研究认识,仍然任重道远.

致谢:本文第一作者早年得益于李思田教授有关盆地动力学研究思想的启蒙教育.在此恩师八十五岁暨从事地质事业 65 年之际,谨以本文表示恭贺,由衷祝愿李老师和师母王老师福如东海、寿比南山!

References

- Agar, S., Geiger, S., Léonide, P., et al., 2013. Summary of the AAPG-SPE-SEG Hedberg Research Conference on "Fundamental Controls on Flow in Carbonates". *AAPG Bulletin*, 97(4): 533 - 552. <https://doi.org/10.1306/12171212229>
- Allen, P.A., Allen, J.R., 1990. *Basin Analysis: Principles and Applications*. Blackwell Scientific Publications, Cambridge, 263-308.
- Allen, P.A., Allen, J.R., 2013. *Basin Analysis: Principles and Application to Petroleum Play Assessment*. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Bethke, C. M., 1985. A Numerical Model of Compaction-Driven Groundwater Flow and Heat Transfer and Its Application to the Paleohydrology of Intracratonic Sedimentary Basins. *Journal of Geophysical Research*, 90(B8): 6817 - 6828. <https://doi.org/10.1029/jb090ib08p06817>
- Bjørlykke, K., 1994. Fluid-Flow Processes and Diagenesis in Sedimentary Basins. *Geological Society, London, Special Publications*, 78(1): 127 - 140. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1994.078.01.11>
- Bjørlykke, K., Egeberg, P.K., 1993. Quartz Cementation in Sedimentary Basins. *AAPG Bulletin*, 9(9): 1538 - 1548. <https://doi.org/10.1306/bdff8ee8-1718-11d7-8645000102c1865d>

- 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. [https://doi.org/10.1016/0264-8172\(88\)90027-x](https://doi.org/10.1016/0264-8172(88)90027-x)
- Davies, G. R., Smith, L. B. Jr., 2007. Structurally Controlled Hydrothermal Dolomite Reservoir Facies: An Overview; Reply. *AAPG Bulletin*, 91 (9): 1342–1344. <https://doi.org/10.1306/04290707031>
- Dewers, T., Ortoleva, P., 1988. The Role of Geochemical Self-Organization in the Migration and Trapping of Hydrocarbons. *Applied Geochemistry*, 3 (3): 287–316. [https://doi.org/10.1016/0883-2927\(88\)90108-4](https://doi.org/10.1016/0883-2927(88)90108-4)
- Dickinson, W. R., 1993. Basin Geodynamics. *Basin Research*, 5 (4): 195–196. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.1993.tb00066.x>
- Fossen, H., Schultz, R. A., Shipton, Z. K., et al., 2007. Deformation Bands in Sandstone: A Review. *Journal of the Geological Society*, 164(4): 755–769. <https://doi.org/10.1144/0016-76492006-036>
- Galloway, W. E., 1984. Hydrogeologic Regimes of Sandstone Diagenesis. In: McDonald, D. A., Surdam, R. C., eds., *Clastic Diagenesis*. AAPG Memoir 37, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 3–13.
- Garven, G., 1995. Continental-Scale Groundwater Flow and Geologic Processes. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23 (1): 89–117. <https://doi.org/10.1146/annurev.earth.23.1.89>
- Garven, G., Bull, S. W., Large, R. R., 2001. Hydrothermal Fluid Flow Models of Stratiform Ore Genesis in the McArthur Basin, Northern Territory, Australia. *Geofluids*, 1 (4): 289–311. <https://doi.org/10.1046/j.1468-8123.2001.00021.x>
- Gonçalves, J., Violette, S., Guillocheau, F., et al., 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. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.2004.00243.x>
- Han, D. L., Li, Z., Shou, J. F., 2011. Reservoir Heterogeneities between Structural Positions in the Anticline: A Case Study from Kela-2 Gas Field in the Kuqa Depression, Tarim Basin, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 38(3): 282–286 (in Chinese with English abstract).
- Ingersoll, R. V., 2012. *Tectonics of Sedimentary Basins*. Busby C, Azor A. Tectonics of Sedimentary Basins; Recent Advances. Wiley-Blackwell, Oxford.
- Ingersoll, R. V., Busby, C. J., 1995. *Tectonics of Sedimentary Basins*. Blackwell Science, Oxford.
- Land, L. S., 1997. Mass Transfer During Burial Diagenesis in the Gulf of Mexico Sedimentary Basin: An Overview. In: Montaez, I. P., Gregg, J. M., Shelton, K. L., eds., *Basin-Wide Diagenetic Patterns: Integrated Petrologic, Geochemical, and Hydrologic Considerations*. SEPM Special Publication 57, Tulsa, 29–39.
- Laubach, S. E., Eichhubl, P., Hilgers, C., et al., 2010. Structural Diagenesis. *Journal of Structural Geology*, 32(12): 1866–1872. <https://doi.org/10.13039/100006151>
- Li, S. T., 1995. Geodynamics of Sedimentary Basins—The Trend of Basin Research. *Earth Science Frontiers*, 2 (3–4): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., 1992. Basic Ideas and Methods of Diagenesis Study in Oil-Bearing Basin. *Natural Gas Geoscience*, 3(5): 1–6. (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., 2013. Sedimentary Basin Geodynamics in China: Advances and Frontiers during the First Decade of the 21st Century. *Bulletin of Mineralogy, Petrology, and Geochemistry*, 32(3): 290–300 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., 2016. Research Frontiers of Fluid-Rock Interaction and Oil-Gas Formation in Deep-Buried Basins. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35 (5): 807–816 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Chen, J. S., Guan, P., 2006a. Scientific Problems and Frontiers of Sedimentary Diagenesis Research in Oil-Gas-Bearing Basins. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (8): 1745–1754 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Han, D. L., Shou, J. F., 2006b. Diagenesis Systems and Their Spatio-Temporal Attributes in Sedimentary Basins. *Acta Petrologica Sinica*, 22 (8): 2151–2164 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Fei, W. H., Shou, J. F., et al., 2003. Overpressure and Fluid Flow in Dongpu Depression, North China: Constraints on Diagenesis in Reservoir Sandstones. *Acta Geologica Sinica*, 77 (1): 126–134 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Li, J. W., Zhang, P. T., et al., 2016. Key Structural-Fluid Evolution and Reservoir Diagenesis of Deep-Buried Carbonates: An Example from the Ordovician Yingshan Formation in Tazhong, Tarim Basin. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 35(5): 827–838 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Liu, J. Q., 2009. Key Problems and Research Trend of Diagenetic Geodynamic Mechanism and Spatio-Temporal Distribution in Sedimentary Basins. *Acta Sedimentologica Sinica*, 27(5): 837–848 (in Chinese with English abstract).

- English abstract).
- Mangenot, X., Gasparrini, M., Rouchon, V., et al., 2018. Basin-Scale Thermal and Fluid Flow Histories Revealed by Carbonate Clumped Isotopes ($\Delta 47$)-Middle Jurassic Carbonates of the Paris Basin Depocentre. *Sedimentology*, 65(1): 123–150. <https://doi.org/10.1111/sed.12427>
- Manzocchi, T., Childs, C., Walsh, J. J., 2010. Faults and Fault Properties in Hydrocarbon Flow Models. *Geofluids*, 10(1–2): 94–113. <https://doi.org/10.1111/j.1468-8123.2010.00283.x>
- Mao, Y. K., Zhong, D. K., Neng, Y., et al., 2015. Fluid Inclusion Characteristics and Hydrocarbons Accumulation of the Cretaceous Reservoirs in Kuqa Foreland Thrust Belt, Tarim Basin, Northwest China. *Journal of China University of Mining & Technology*, 44(6): 1033–1042 (in Chinese with English abstract).
- Moore, C. H., 2001. Carbonate Reservoirs Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework. *Developments in Sedimentology Vol. 55*, Elsevier, New York.
- Pan, R., Zhu, X. M., Tan, M. X., et al., 2018. Quantitative Research on Porosity Evolution of Deep Tight Reservoir in the Bashijiqike Formation in Kelasu Structure Zone, Kuqa Depression. *Earth Science Frontiers*, 25(2): 159–169 (in Chinese with English abstract).
- Pang, X. Q., Jiang, Z. X., Huang, H. D., et al., 2014. Formation Mechanisms, Distribution Models, and Prediction of Superimposed, Continuous Hydrocarbon Reservoirs. *Acta Petrolei Sinica*, 35(5): 795–828 (in Chinese with English abstract).
- Potter, P. E., Pettijohn, F. J., 1963. Basin Analysis and the Sedimentary Model. *Paleocurrents and Basin Analysis*. Springer, Berlin, 224–251.
- Powley, D. E., 1990. Pressures and Hydrogeology in Petroleum Basins. *Earth-Science Reviews*, 29(1–4): 215–226. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(0\)90038-w](https://doi.org/10.1016/0012-8252(0)90038-w)
- Roure, F., Cloetingh, S., Scheck, W. M., et al., 2010. Achievements and Challenges in Sedimentary Basin Dynamics: A Review. In: Cloetingh, S., Negendank, J., eds., *New Frontiers in Integrated Solid Earth Sciences*. Springer, Netherlands.
- Schultz, R. A., Fossen, H., 2008. Terminology for Structural Discontinuities. *AAPG Bulletin*, 92(7): 853–867.
- Siever, R., 1979. Plate-Tectonic Controls on Diagenesis. *The Journal of Geology*, 87(2): 127–155. <https://doi.org/10.1086/628405>
- Sun, Y. C., Li, Z., Li, H. S., et al., 1996. Diagenesis of Oil-Gas Bearing Fault Basins in Eastern China. Science Press, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Suppe, J., 2014. Fluid Overpressures and Strength of the Sedimentary Upper Crust. *Journal of Structural Geology*, 69: 481–492. <https://doi.org/10.13039/501100006477>
- Tigert, V., Alshaieb, Z., 1990. Pressure Seals; Their Diagenetic Banding Patterns. *Earth-Science Reviews*, 29(1–4): 227–240. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(0\)90039-x](https://doi.org/10.1016/0012-8252(0)90039-x)
- Vandeginste, V., Swennen, R., Allaey, M., et al., 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. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2012.02.014>
- Wang, J. P., Zhang, R. H., Zhao, J. L., et al., 2014. Characteristics and Evaluation of Fractures in Ultra-Deep Tight Sandstones Reservoir: Taking Keshen Gasfield in Tarim Basin, NW China as an Example. *Natural Gas Geoscience*, 25(11): 1735–1745 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. P., Zhang, H. L., Zhang, R. H., et al., 2018. Enhancement of Ultra-Deep Tight Sandstone Reservoir Quality by Fractures: A Case Study of Keshen Gas Field in Kuqa Depression, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology*, 39(1): 77–88 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. M., Li, Y., Xie, H. W., et al., 2016. Geological Understanding on the Formation of Large-Scale Ultra-Deep Oil-Gas Field in Kuqa Foreland Basin. *China Petroleum Exploration*, 21(1): 37–43 (in Chinese with English abstract).
- Williamson, M. A., 1995. Overpressures and Hydrocarbon Generation in the Sable Sub-Basin, Offshore Nova Scotia. *Basin Research*, 7(1): 21–34. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2117.1995.tb00092.x>
- Wolf, K. H., Chilingar, G. V., 1992. Diagenesis III. Elsevier, Amsterdam.
- Wolf, K. H., Chilingar, G. V., 1994. Diagenesis IV. Elsevier, Amsterdam.
- Worden, R. H., Benschatwan, M. S., Pott, G. J., et al., 2016. Basin-Scale Fluid Movement Patterns Revealed by Veins; Wessex Basin, UK. *Geofluids*, 16(1): 149–174. <https://doi.org/10.1111/gfl.12141>
- Yang, X. Z., Mao, Y. K., Zhong, D. K., et al., 2016. Tectonic Compression Controls the Vertical Property Variation of Sandstone Reservoir: An Example of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kuqa Foreland Thrust Belt, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience*, 27(4): 591–599 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, H. L., Zhang, R. H., Yang, H. J., et al., 2014. Charac-

terization and Evaluation of Ultra-Deep Fracture-Pore Tight Sandstone Reservoirs: A Case Study of Cretaceous Bashijiqike Formation in Kelasu Tectonic Zone in Kuqa Foreland Basin, Tarim, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 41(2): 158–167 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Z.P., Wang, Q.C., Wang Y., et al., 2006. Brittle Structure Sequence in the Kuqa Depression and Its Implications to the Tectonic Paleostress. *Earth Science*, 31(3): 309–316 (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2006.03.004>

附中文参考文献

- 韩登林, 李忠, 寿建峰, 2011. 背斜构造不同部位储集层物性差异——以库车坳陷克拉 2 气田为例. *石油勘探与开发*, 38(3): 282–286.
- 李思田, 1995. 沉积盆地的动力学分析——盆地研究领域的主要趋向. *地学前缘*, 2(3–4): 1–8.
- 李忠, 1992. 含油气盆地成岩作用研究的基本思路及方法. *天然气地球科学*, 3(5): 1–6.
- 李忠, 2013. 中国的盆地动力学——21 世纪开初十年的主要研究进展及前沿. *矿物岩石地球化学通报*, 32(3): 290–300.
- 李忠, 2016. 盆地深层流体—岩石作用与油气形成研究前沿. *矿物岩石地球化学通报*, 35(5): 807–816.
- 李忠, 陈景山, 关平, 2006a. 含油气盆地成岩作用的科学问题及研究前沿. *岩石学报*, 22(8): 1745–1754.
- 李忠, 韩登林, 寿建峰, 2006b. 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, 费卫红, 寿建峰, 等, 2003. 华北东濮凹陷异常高压与流体活动及其对储集砂岩成岩作用的制约. *地质学报*, 77(1): 126–134.
- 李忠, 李佳蔚, 张平童, 等, 2016. 深层碳酸盐岩关键构造—流体演变与成岩—成储——以塔中奥陶系鹰山组为例. *矿物岩石地球化学通报*, 35(5): 827–838.
- 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.
- 毛亚昆, 钟大康, 能源, 等, 2015. 库车前陆冲断带白垩系储层流体包裹体特征与油气成藏. *中国矿业大学学报*, 44(6): 1033–1042.
- 潘荣, 朱筱敏, 谈明轩, 等, 2018. 库车坳陷克拉苏冲断带深部巴什基奇克组致密储层孔隙演化定量研究. *地学前缘*, 25(2): 159–169.
- 庞雄奇, 姜振学, 黄捍东, 等, 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.
- 孙永传, 李忠, 李蕙生, 等, 1996. 中国东部含油气断陷盆地的成岩作用. 北京: 科学出版社.
- 王俊鹏, 张惠良, 张荣虎, 等, 2018. 裂缝发育对超深层致密砂岩储层的改造作用——以塔里木盆地库车坳陷克深气田为例. *石油与天然气地质*, 39(1): 77–88.
- 王俊鹏, 张荣虎, 赵继龙, 等, 2014. 超深层致密砂岩储层裂缝定量评价及预测研究——以塔里木盆地克深气田为例. *天然气地球科学*, 25(11): 1735–1745.
- 王招明, 李勇, 谢会文, 等, 2016. 库车前陆盆地超深层大油气田形成的地质认识. *中国石油勘探*, 21(1): 37–43.
- 杨宪彰, 毛亚昆, 钟大康, 等, 2016. 构造挤压对砂岩储层垂向分布差异的控制——以库车前陆冲断带白垩系巴什基奇克组为例. *天然气地球科学*, 27(4): 591–599.
- 张惠良, 张荣虎, 杨海军, 等, 2014. 超深层裂缝—孔隙型致密砂岩储集层表征与评价——以库车前陆盆地克拉苏构造带白垩系巴什基奇克组为例. *石油勘探与开发*, 41(2): 158–167.
- 张仲培, 王清晨, 王毅, 等, 2006. 库车坳陷脆性构造序列及其对构造古应力的指示. *地球科学*, 31(3): 309–316. <https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-2383.2006.03.004>