

文章编号:1000-0550(2018)06-1177-13

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.120

构造成岩作用研究现状及展望

袁静^{1,2}, 俞国鼎¹, 钟剑辉¹, 董志芳¹, 谢君¹, 单康¹

1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室, 海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

摘要 构造成岩作用(structural diagenesis)是构造地质学与沉积学交叉融合形成的前沿研究领域,主要研究构造作用、构造和非构造成因的变形构造和变形效应与沉积物(岩)成岩变化之间的相互作用。变形构造及变形过程通过影响成岩流体流动对成岩作用非均质性产生重要影响;与变形构造相关的成岩作用研究则有助于揭示储层成岩演化、流体流动以及构造活动时期、期次及速率等重要信息。构造成岩作用提供了构造—成岩格架下探讨储层演化的新思路,在实际工作中应注意这一思路在储层成因与预测、致密化机制及沉积盆地动力学过程等研究方面的应用。碳酸盐岩变形条带相关研究起步较晚,相对较薄弱,未来应加强这方面的研究;同时亟待建立考虑碳酸盐岩在内的新的变形条带分类体系。目前,不同变形构造之间的研究程度不均衡,变形条带与裂缝几乎构成了构造成岩作用研究的主体;与软沉积物变形构造、砂岩脉等变形构造有关的构造成岩作用研究有待强化。变形构造空间分布预测及其对流体流动影响的研究要综合岩芯、露头及数值模拟等多种资料与方法。国内学者就中国中西部盆地深层系构造作用对储层演化的物理影响开展了研究,并取得了重要进展,构造作用对储层化学变化影响的相关研究已经起步;未来应重视运用构造成岩作用思路探究储层演化与分布的动力机制和过程,推进储层成岩动力学过程和沉积盆地动力学研究。

关键词 构造成岩作用;变形条带;裂缝;成岩流体;储层

第一作者简介 袁静,女,1972年出生,教授,储层沉积学与储层地质学,E-mail: drjyuan@163.com

中图分类号 P618.13 **文献标志码** A

长期以来,尽管人们已经认识到在沉积盆地储层的形成与演化过程中沉积作用是其基础,成岩作用和后期构造作用是其关键,但有关变形构造与岩石化学组分变化之间相互关系的研究只限于高温变质领域^[1-2],在沉积盆地这方面的研究到进入本世纪才引起人们的重视^[3]。

20世纪七、八十年代,国外学者开始关注并研究砂岩中的变形条带、裂缝及张开—闭合构造等变形构造,并在变形构造形成机制、流体流动过程及流动样式、成岩作用特征及其对构造与成岩演化响应等方面取得了一系列重要进展^[4-10];近年来砾岩、泥岩,尤其碳酸盐岩中的变形条带也开始受到人们的重视^[11-14]。Laubach *et al.*^[3]在总结前人研究成果的基础上,首次明确提出构造成岩作用(structural diagenesis)这一概念,强调变形构造或变形过程与沉积物化学变化之间的相互关系研究的重要性。

中国学者主要在我国中西部盆地开展了构造应力对储层物性的影响、构造—成岩耦合背景下的储层演化及裂缝有效性评价等方面的相关研究^[15-21],逐

渐认识到构造作用在储层演化过程中扮演着重要角色。寿建峰等^[22]提出砂岩动力成岩作用,强调将储层置于盆地动力环境(沉积—热—构造—流体)中探讨其成岩演化。李忠等^[23]是国内最早报道砂岩储层中变形构造的学者之一,指出变形条带对砂岩储层物性及流体活动有重要影响,并将其与沉积盆地成岩作用的动力机制相联系^[24]。张金亮等^[25]指出构造成岩作用有益于开拓深部盆地研究的新思路,为深层碎屑岩储层提供新的研究方向与攻关点;曾联波等^[26]也强调构造成岩作用研究在深部致密储层研究中的应用潜力与价值。邬光辉等^[27]对塔里木盆地古生界碳酸盐岩中的变形条带进行了研究,指出变形条带经成岩改造后渗透率得到明显改善,可为成岩流体提供有效渗流通道。袁静等^[19,28]则对库车坳陷大北和迪那气田中新世代与构造裂缝有关的成岩现象和储层致密化过程进行了探讨,其中对大北气田中生界致密砂岩胶结作用及其与构造裂缝关系的研究是国内对深部砂岩储层构造成岩作用最早的专文报道。

从成岩作用研究发展历史角度来看,自二十世纪

收稿日期:2018-02-05;收修改稿日期:2018-06-05

基金项目: 中国石油科技创新基金项目(2016D-5007-0105);山东省重大科技创新工程项目(2017CXGC1608) [Foundation: PetroChina Innovation Foundation, No. 2016D-5007-0105; Major Scientific and Technological Innovation Project of Shandong Province, No. 2017CXGC1608]

90年代以来,成岩作用研究进入“成岩过程及动力机制研究阶段”,当前的成岩作用研究已非沉积岩石学单一学科所能包容,而是具有强烈的学科交叉特点^[24]。构造成岩作用的正式提出和国内外学者不约而同地将构造变形、变位和沉积储层的演化与分布的关系作为焦点研究正体现了构造活动格架下的成岩作用过程不仅成为揭示沉积盆地油气储层演化与分布规律的新思路,也是揭示沉积盆地成岩作用动力机制的重要途径。

有鉴于此,本文对构造成岩作用的定义与内涵、其典型产物变形条带与裂缝的主要特征及其对流体流动的影响以及变形构造成岩作用特征及其对构造与成岩演化过程的指示等方面的研究进展进行梳理与总结,并对构造成岩作用在中国含油气盆地的应用与研究现状进行了回顾,在此基础上为我国构造成岩作用研究的未来发展态势进行预测并提出建议,旨在抛砖引玉,为进一步推进沉积盆地储层成岩作用动力机制研究、形成机理研究乃至沉积盆地动力学研究提供新的思路。

1 构造成岩作用的定义与内涵

构造成岩作用(structural diagenesis)是构造地质学与沉积学的交叉研究领域,引导人们将研究视角从高温变质领域转向相对低温的沉积盆地的构造和成岩现象中。不同于只关注流体与岩石骨架反应过程的传统成岩作用研究,构造成岩作用将变形过程或变形构造也纳入了储层成因与演化研究。Laubach *et al.*^[3]指出构造成岩作用主要研究变形过程或变形构造与沉积物化学变化之间的相互关系。曾联波等^[26]将其定义为沉积岩层从松散沉积物到固结形成沉积岩石及之后的过程中所发生的构造和成岩相互作用。

由于构造作用除形成变形构造以外,往往还具有压实效应以及形成流体超压等大尺度变形效应。参考国际经典释义^[3,26],考虑国内外研究现状,笔者将构造成岩作用定义为构造作用、构造和非构造成因的变形构造和变形效应与沉积物(岩)成岩变化之间的相互作用。这一定义有两层含义。其一,构造成岩作用并非构造作用与成岩作用简单地耦合,而是强调构造作用→成岩作用的正向研究与成岩作用→构造作用引起的反向研究,既重视变形过程(变形构造)及构造作用引起的大尺度变形效应对成岩作用的影响,也重视成岩产物对变形及成岩过程的响应(图1)。其二,构造和非构造成因的变形构造(如软沉积物变形构

造及砂岩脉等)以及与这些构造相关的成岩作用都属于构造成岩作用的研究范畴。

变形过程或变形构造通过改变储层的渗流能力、物质迁移方式等影响成岩作用过程;与变形过程或变形构造相关的成岩产物的矿物岩石学特征、地球化学特征及流体包裹体特征则能提供成岩流体来源、迁移方式以及构造活动时间、期次及活动速率等重要信息^[29]。构造变形作用贯穿沉积盆地演化及沉积物成岩作用的整个过程,考虑到变形条带与裂缝是构造成岩作用的典型产物,也是影响成岩作用非均质性与油气开发产能的主要变形构造,且目前研究程度相对较深入,本文主要对这两者的特征及其成岩作用研究方面的进展进行梳理与总结。

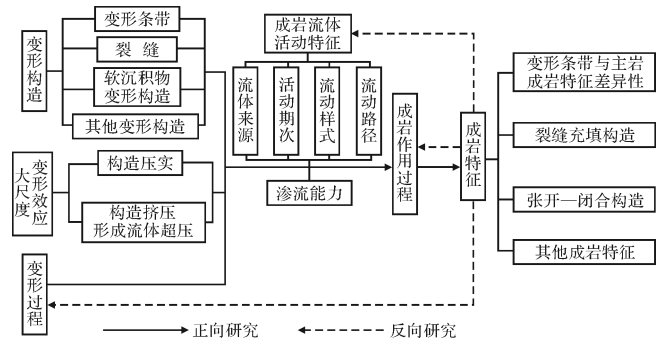


图1 构造成岩作用主要研究内容示意图

Fig.1 Schematic diagram of structural diagenesis

2 主要变形构造及其对成岩作用的影响

2.1 变形条带

2.1.1 分类

变形条带(deformation bands)一词由来已久,Aydin于1978年首次将其引入砂岩变形研究中^[30],并从动力学观点出发将砂岩中的变形条带分为压实带(compactational bands)、单剪带(simple shear bands)、扩张带(dilation bands)、压实剪切带(compactational shear bands)及扩张剪切带(dilation bands)5类^[31]。Fossen *et al.*^[4]综合考虑变形条带矿物学特征、颗粒粒径、颗粒形状、分选、胶结程度、孔隙度及应力状态等因素依据形成机制将砂岩中的变形条带分为解聚带(disaggregation band)、层状硅酸盐带(phyll-silicate band)、碎裂带(cataclastic band)以及溶蚀-胶结带(solution and cementation band)4类,并总结了前人有关变形条带的岩石学特征、几何特征、物性及其对流体流动的影响等方面的研究成果(表1)。成

因分类中的解聚带对应于动力学分类当中的单剪带;碎裂带的产生除了剪切分量外,还需要一定的压实分量,因此其大致对应于压剪带^[32]。

Aydin^[30]的动力学分类方案与 Fossen *et al.*^[4]的成因分类方案各有优缺点。前者的分类方案能反映变形条带形成的主要动力学过程,但没有考虑变形条带的矿物学、颗粒粒径、分选及胶结状态等影响储层形变特征的一系列因素。而后者的分类方案所考虑的因素是影响流体渗流的主要因素,对于成岩作用、油气成藏及油气开发等方面的研究更具实用意义,但其不能反映变形条带形成的动力学过程;层状硅酸盐带在实际研究过程中可能相对少见,溶蚀—胶结带则更多是对前期变形条带的改造^[33],将其单独列为一类是否合适值得进一步商榷。此外,两者的分类方案都只是针对砂岩的,涉及不同岩性的更加合理与完备的分类体系尚有待建立。

2.1.2 变形条带特征

早期研究认为变形条带一般形成于高孔砂岩中,可发育于裂谷环境、沉积物滑塌及底辟构造等多种构造背景以及非构造背景下^[4];往往密集排列于断裂两侧,远离断裂变形条带的密度呈明显降低的趋势,说明变形条带的形成与断层活动之间存在成因联系^[34]。事实上,变形条带除普遍存在于各种拉张或挤压构造背景下的孔隙砂岩中外,也广泛存在于碳酸盐岩中^[11-12,35-36],泥岩及砾岩中的变形条带也偶有报道^[13-14]。

与砂岩中的变形条带相比,碳酸盐岩中的变形条带厚度一般较薄。研究表明上覆地层压应力产生的压溶作用在变形条带形成过程中起了重要作用^[11,35]。碳酸盐岩颗粒分选程度、球度以及粒间超大孔隙度等是控制碳酸盐岩中变形条带形成的重要因素^[35];弱胶结高孔颗粒灰岩中易产生压实条带;分选好、低黏土基质含量、紧密排列的细粒灰岩中易发生压溶作用而产生缝合线构造。不同构造背景下的碳酸盐岩变形机制可能有所差别。Rotevatn *et al.*^[36]对拉张构造背景下碳酸盐岩中的变形条带进行了研究,指出拉张背景下压溶作用对变形条带形成的贡献相对较小;生物灰岩不易形成变形条带。

变形条带之间可以相互转化,随着硅酸盐矿物含量的增加,解聚带可转变为层状硅酸盐带^[4];溶蚀带也可以转变为压实带^[37]。变形条带厚度较小,一般为毫米级至厘米级,厚者可高达几十厘米,薄者甚至须借助高分辨率扫描电镜才能识别^[38]。与围岩(储

层中未变形区域)相比,变形条带一般表现为低孔低渗^[39](表1),但也可能表现出较高的渗透率,为成岩流体提供渗流通道,对前期胶结物进行溶蚀^[40]。扩张带形成初期的物性可能好于围岩,由于后期的胶结作用使得物性变差^[41-42]。

2.1.3 变形条带对流体流动的影响

变形条带对流体流动过程及动力学的影响目前尚有争议,除与变形条带的厚度、渗透率、变形条带数量、流体相态(单一油或水相、油水两相)及毛管压力等因素有关外(表1),还与变形条带的原始组分^[41]、空间组合关系^[43]、类型^[44]及其形成之后的成岩改造等因素有关^[27,33]。

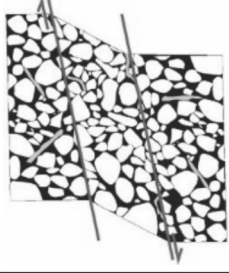
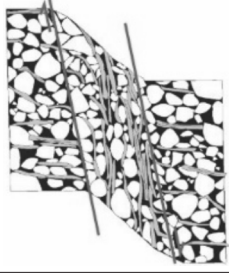
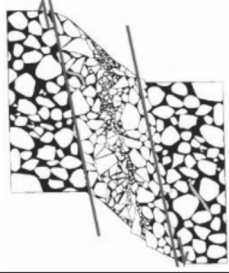
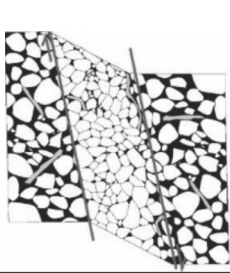
Parnell *et al.*^[45]认为变形条带是否影响流体流动过程取决于流体活动与变形条带形成之间的相对时序关系。Fossen *et al.*^[46]认为变形条带对流体流动的影响主要取决于 K/K_{DB} (围岩渗透率与变形条带渗透率之比)以及变形条带三维空间上的连续性;考虑到 K/K_{DB} 一般较小,且变形条带连续性较差,他们认为其对流体流动的影响较小甚至可以忽略。Rotevatn *et al.*^[47]通过野外观测与数值模拟研究了变形条带厚度变化对流体流动的影响,证实变形条带彼此之间以及变形条带与围岩之间的渗透率差以及变形条带的平均厚度是决定其有效渗透率的主要因素。Rotevatn *et al.*^[48]进一步通过两相流(水驱油)流体模拟,证实变形条带局部渗透率降低会引起流体流动的复杂化,造成水驱前缘不规则,降低波及系数;上述影响在低渗透储层中表现的尤为明显。除此之外,变形条带空间组合关系对其是否可作为流体运移遮挡层也有重要影响,不同延伸方向的变形条带空间上呈相互切割接触时对流体流动的影响较小^[49]。碎裂带形成过程中可能伴随多次扩张作用,因而可作为流体渗流通道^[50]。

变形条带对流体流动的影响比较复杂,除与上述影响因素有关外,可能还与流体流动方向与变形条带延伸方向、变形条带形成时间等因素有关。当流体流动方向与变形条带延伸方向呈高角度斜交时,变形条带对流体流动的影响相对较大;反之,则影响可能相对较小。变形条带形成的时间越早,后期构造及成岩作用对其叠加改造越复杂,其对流体流动的影响就越复杂。

2.1.4 变形条带对成岩作用的影响

变形构造对成岩作用具有明显的控制作用。变形条带与围岩之间的物性差异影响了成岩作用过程中成岩流体的分布及物质迁移过程,导致不同变形条带之间或变形条带与围岩之间在成岩产物的岩石学

表1 变形条带形成机制分类及其特征、识别标志、物性及对流体活动的影响(据 Fossen *et al.*^[4] 修改)Table 1 Classification of deformation bands in terms of formation mechanism and its characteristics, identification marks, physical properties and the effects on fluid flow (modified from Fossen *et al.*^[4])

变形条带	解聚带	层状硅酸盐带	碎裂带	溶蚀—胶结带
特征				
形成机制	颗粒流动或颗粒边缘滑动	层状硅酸盐涂抹	碎裂作用	溶蚀与胶结作用
赋存岩性	多见于砂质沉积物及弱固结砂岩中;均质石英砂(岩)中极少见。当板/片状硅酸盐矿物含量增加时可向层状硅酸盐带转化	形成于板/片状矿物(主要为黏土矿物)含量大于10%~15%的砂(岩)中。当板/片状矿物含量大于40%时,向泥岩涂抹带转化	全球高孔砂岩中均有发现,埋深多介于1.5~2.5 km。增生楔末/弱固结沉积物、裂谷环境松散砂沉积物、非熔结凝灰岩等岩性或沉积物中也有发现	对其他变形条带改造而成。颗粒边缘的黏土矿物能促进溶蚀作用;颗粒破碎及颗粒边缘滑动过程中造成粒表黏土膜破坏,从而促进胶结作用
真剪切位移量或位移	真剪切位移一般为几厘米	相对于其他变形条带,通常具有最大位移量	位移量小于同长度的解聚带	/
识别标志	粒间胶结物破碎;颗粒排列方式与两侧围岩存在较为明显差别	层状硅酸盐矿物(黏土矿物)定向排列,颜色与结构明显与围岩不同	明显分带。中部颗粒粒度细,基质含量高;边缘颗粒紧密接触,粒度较粗,轻微破裂	溶蚀带:以粒度小于基质的颗粒紧密排列为特征,缺少碎裂作用的标志; 胶结带:变形带胶结程度远强于围岩
物性	取决于解聚带是否具有压缩或扩张分量。纯扩张带提高约7%~8%的孔隙度;压实带能将孔隙度由原始的25%降低至仅几个百分点	对渗透率的降低程度取决于层状硅酸盐矿物的类型、丰度、分布状态及变形带位移	降低1个数量级孔隙度的同时降低2~3个数量级的渗透率	在很大程度上降低变形条带的物性,扩张带形成初期物性被短暂改善,后期胶结作用使得物性再次变差
对流体流动的影响	变形条带对流体流动的影响尚有争议,主要与流体相态(单一油或水相、油水两相)、毛管压力、变形条带厚度及渗透率、数量、类型、原始组分、空间组合关系及形成之后经历的成岩改造等多种因素有关			

(颜色、成分及结构等)及成岩特征等方面存在明显差异。已有部分学者通过研究证明某些变形条带曾经是成岩流体的优势运移通道。Parry *et al.*^[51]认为 Navajo 红色砂岩中白色变形条带系还原性流体沿变形条带提供的渗流通道运移时对高价铁离子的淋滤而成,并通过物质平衡计算出了参与成岩反应所需的流体体积。Exner *et al.*^[33]认为维也纳盆地 Matzen 油田碎屑岩储层中的碎裂带在演化初期经历了孔隙度短暂增大的过程,为内源流体提供运移通道,形成了顺层分布的胶结物。

2.2 裂缝

2.2.1 主要特征

当作用于岩石的应力超过其抗破裂强度时,岩石发生破裂产生裂缝。从时间上看,裂缝的形成可能要

晚于变形条带。根据形成机制及裂缝面两侧岩石的运动学特征,可将裂缝分为张裂缝与剪裂缝两种^[52];根据倾角可裂缝分为垂直裂缝、高角度斜交裂缝、低角度斜交裂缝及水平裂缝^[53];根据发育规模可将裂缝分为宏观缝(macrofracture)与微裂缝(microfracture)^[54]。

裂缝广泛存在于碎屑岩^[55-56]及碳酸盐岩储层中^[57-58],泥岩及页岩中相对不发育。裂缝的形成、发育规模及几何学特征受沉积作用、成岩作用、构造作用、受力岩层所处的构造部位及岩层厚度等多种因素的控制^[59-61]。沉积相带是决定岩石后期变形行为的基础条件,相对来说高能环境下的沉积产物以刚性变形为主,更易于产生裂缝。成岩作用在很大程度上改变了岩石的力学性质,进而对后期岩石的变形行为及

过程产生重要影响。如 Lavenu *et al.*^[60] 认为受早期成岩作用改造的碳酸盐岩(沉积物)即使遭受后期构造运动也不易产生裂缝。岩层厚度与裂缝发育程度一般呈负相关关系。温度除影响沉积物(岩)的形变特征外,还对裂缝几何学特征有重要影响。相关研究表明裂缝粗糙度随温度升高呈现低温阶段(20℃~100℃)缓慢增大,中温阶段(100℃~500℃)缓慢减小,高温阶段(500℃~800℃)迅速减小至基本稳定的阶段性特征^[62]。

2.2.2 裂缝对流体流动的影响

开启的裂缝是储层,尤其是低孔低渗储层中流体运移的优势通道。Parsons^[63]是最早关注裂缝中流体流动特征的学者之一,其率先对流体流动、裂缝开度及渗透率之间的关系进行了研究。裂缝在形成之后往往经历成岩作用与构造作用等一系列改造^[64-65],其开度及连通性发生变化,从而对流体流动过程及动力学产生复杂的影响^[66];因此可以说成岩流体对裂缝的改造与裂缝对流体流动过程及动力学的影响是两个相互影响的过程。Laubach *et al.*^[67]认为通过现今应力场预测有效裂缝的方法存在偏颇,强调成岩改造对裂缝有效性的影响,建议人们通过裂缝与围岩的成岩历史预测有效裂缝。Wennberg *et al.*^[68]同样强调成岩改造对裂缝水力学特征的影响,他通过结合岩芯与露头对碳酸盐岩中裂缝的水力学特征进行研究,指出裂缝中的流体呈集中式而非分裂式流动,也就是说流体往往沿极少数优势通道进行运移,绝大多数裂缝为无效通道。

2.2.3 裂缝对成岩作用的影响

裂缝的产生对成岩过程具有重要意义。一方面裂缝影响成岩系统封闭性^[69]。随着储层埋深逐渐增大,成岩系统趋于封闭,物质迁移受到极大限制,裂缝的产生将封闭成岩系统激活为开放成岩系统,促进了溶蚀物质快速而高效地排出,有利于次生孔隙的产生^[70]。另一方面裂缝影响成岩流体的流动过程及波及范围,对成岩作用非均质性产生重要影响^[71]。裂缝是成岩流体的高效渗流通道,成岩流体沿裂缝运移过程中对裂缝进行溶蚀改造,形成溶蚀扩大缝,并对岩石骨架或前期粒间胶结物进行溶蚀,产生新的次生孔隙^[19]。当条件合适时,自生矿物析出形成裂缝充填物。Emmanuel *et al.*^[72]通过研究认为介质的孔隙大小对自生矿物的溶解度有明显的控制作用,孔径控制溶解度理论(PSC)可较好地解释成岩流体流动过程中大孔隙及裂缝中自生矿物的沉淀。裂缝被胶结

物完全充填时则失去渗流能力^[73],张开—闭合构造、裂缝胶结物搭桥以及未完全充填裂缝则仍可作为成岩流体运移通道影响成岩作用^[74-75]。

3 变形构造成岩特征及其对构造与成岩演化过程的指示

与变形构造相关的成岩作用特征可指示成岩作用过程及构造演化。Busch *et al.*^[40]注意到位于英国 Cumbria 的 Eden 半地堑二叠系发育岩石学及成岩作用特征明显不同的两种类型的变形条带:一类呈灰白色,另一类呈米黄色。通过微观观察他们认为研究区经历过两期变形条带的形成以及伴随该过程的两期不同成因的流体运移。Paganoni *et al.*^[76]对阿拉伯 Abu Dhabi 油田下白垩统碳酸盐岩中的缝合线构造成岩作用进行了研究,认为缝合线构造曾是构造挤压期热流体与烃类的运移通道。

微裂缝及其中充填的胶结物记录了构造及成岩演化的重要信息。微裂缝是构造活动的产物,其本身可反映古应力状态^[9]。不同期次与产状的裂缝中充填的胶结物类型、地球化学特征及流体包裹体特征保留了流体来源、理化特征及成因信息,也为了解不同成因流体混合情况提供了重要信息^[77]。胶结物是成岩流体性质、来源及演化历史等重要地质信息的承载者;确定自生矿物之间的穿插与接触关系及形成序列不仅是成岩作用研究的基础,同时也是地球化学及流体包裹体等示踪方法必须解决的关键问题。同位素保存了有关流体成因及自生矿物析出时的理化条件等重要信息^[78-81],是恢复古流体活动的有力工具。包裹体中封存的古流体是最理想的流体示踪剂。一方面包裹体测温数据能记录成岩流体活动时的温度背景或热液活动信息^[82-83],另一方面包裹体分析能提供流体成分、盐度及压力等诸多信息^[84-85]。

随着裂缝的多次开启与伴随该过程的流体活动及多期胶结物充填形成张开—闭合构造(crack-seal structure)^[5](图2),其内充填的胶结物记录了成岩流体活动特征及小尺度的构造活动信息,这些构造信息往往是常规构造分析方法无法获得的。Becker *et al.*^[29]通过联用高分辨率扫描电镜与阴极发光技术(SEM-CL)确定了微裂缝中充填的胶结物期次(图2);通过包裹体测温与激光拉曼光谱确定了胶结物中流体包裹体的成分以及被捕获时的物理化学条件,在此基础上结合埋藏史背景精确确定了微裂缝的开启时间、活动期次及速率。Vandeginste *et al.*^[86]在构

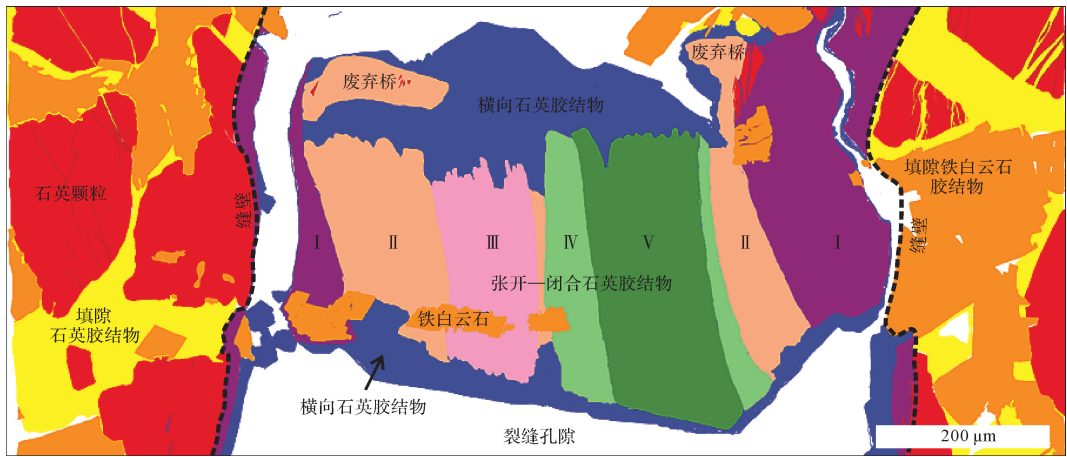


图2 根据 SEM-CL 照相结果绘制的张开—闭合构造。裂缝多次开启形成宽约 0.6 mm 的微裂缝, 在此过程中发生了多期流体运移, 形成石英胶结物 (I~V 代表石英胶结物的期次) (据 Becker *et al.* [29])

Fig.2 Image of crack-seal structure mapped according to photograph revealed by integration of high resolution SEM and CL. Cracks opened many times to form a micro-crack width of 0.6 mm, during the process multi-stage fluid migration and formation of quartz cement (I-V represents stages of quartz cement) (after Becker *et al.* [29])

造成岩作用研究思路指导下运用同位素地球化学方法对落基山脉西卡尔加里地区褶皱冲断带古流体来源及运移情况进行了调查, 研究结果表明该地区 Laramide 挤压期以扩散迁移的内源流体流动为主, 抬升期则以高速水平对流迁移的大气水为主。近期研究发现亚地震尺度(米级)碳酸盐岩露头中发育的裂缝—充填构造对纵波 (V_p) 各向异性有较好的响应, 表明地球物理方法将有助于挖掘多期构造活动叠加影响下的储层裂缝开启—闭合历史 [87]。

本文仅就目前构造成岩作用的主要研究对象——变形条带与裂缝的特征、成岩作用及其构造—成岩响应进行了简要总结。事实上, 软沉积物变形构造与砂岩脉等变形构造的成岩作用研究价值同样不可忽略。已有学者注意到软沉积物变形构造成岩作用研究在恢复沉积物变形过程方面有着重要的意义 [88-89]; 与变形条带及微裂缝一样, 针对砂岩脉的构造成岩作用研究对揭示成岩流体流动及储层演化过程具有同样重要的意义 [90]。

4 构造成岩作用在中国含油气盆地的应用

尽管构造成岩作用是最近才出现的概念, 中国学者已在塔里木、鄂尔多斯、四川、渤海湾等多个含油气盆地深层系开展了相关研究, 取得重要进展, 开拓了深部盆地研究的新思路, 有效地推动了油气勘探与开发。

构造成因裂缝(包含断裂)广泛发育于我国各个含油气盆地, 在很大程度上改善了储层储集性能。裂缝一方面增加了储层的储集空间, 另一方面为成岩流体提供了高效渗流通道, 增加了成岩作用非均质程度 [91-92]; 裂缝与不整合面附近往往是次生孔隙发育优势带 [92-96]。裂缝对碳酸盐岩储层的改造作用尤为明显, 构造裂缝将各类储集空间联系起来形成的复合储集系统往往是有利的储集层段 [97-99]。随着埋深增大, 储层致密化程度越来越强, 裂缝成为储层中的重要储集空间, 裂缝的发育也是改善致密储层储集渗流能力的主要因素之一 [100-102]。

与裂缝相关的多层式充填构造为恢复储层经历的改造作用及其相对时序提供了宝贵信息, 开始引起人们的重视。这种构造与裂缝多次开启与充填有关, 当属张开—闭合构造。袁静等 [28] 研究认为大北气田白垩系储层裂缝中充填的微晶方解石、原油裂解产物及亮晶方解石依次记录了早期碳酸盐胶结、发生于 50 Ma 左右的液态烃充注及其逸散过程及晚期碳酸盐胶结。冯明友等 [103] 运用同位素测试、流体包裹体测温等技术手段, 并结合地层埋藏史对四川盆地川北地区寒武系筇竹寺组钙质结核裂缝中充填的胶结物进行了研究, 认为裂缝中充填的四期胶结物分别指示了早期脱水、烃源岩早成熟期生烃、加里东构造运动抬升释压及深埋藏期硫酸盐热还原作用事件。

相对于(微)裂缝, 变形条带相关研究要薄弱的多。李忠等 [23] 对库车坳陷中新生界碎屑岩储层构造

应变特征进行了研究,强调构造作用对成岩作用及储层演化的重要性,提出从应变角度认识变形条带是研究储层形成与分布的重要途径。目前关于这方面的研究报道还很少^[27],且只针对塔里木盆地。值得注意的是变形条带并不是挤压应力作用下的特有产物,拉张应力作用下同样可以发育变形条带。变形条带可能广泛发育于我国含油气盆地,并对储层流体活动及成岩作用过程有重要影响^[26],在未来研究中应给予足够的重视。

构造挤压对我国中西部盆地储层演化过程具有双重影响。我国中西部盆地经历了多期构造挤压作用,侧向挤压在形成裂缝改善储层储集性能的同时,也加剧了储层的压实效应。侧向构造挤压引起的压实作用可能是我国中西部盆地储层致密化的主要因素之一。研究表明,四川盆地川西坳陷侧向构造挤压约造成11%的减孔量^[16],塔里木盆地侧向压实减孔量介于1.9%~12%^[15,19,104]。另外,侧向构造挤压是四川盆地、塔里木盆地及准噶尔盆地超压成因机制之一,甚至是形成超压的主要因素^[105-107]。超压的形成不仅有效地减缓了压实效应,还促进了溶蚀作用与超压裂缝的形成,有益于原生孔隙的保存与次生孔隙的形成^[19,108]。

5 展望与建议

(1) 构造成岩作用势必成为未来盆地和储层研究的重点与热点。在20世纪80年代萌生的成岩流体研究与近期出现的构造成岩作用研究的催生与推动下,储层成岩作用研究正在经历研究方法由粗略向精细,研究思路由静态向动态,所涉及的学科由单一的沉积学向地球化学、沉积学、流体动力学及构造地质学等多学科交叉融合等一系列转变。构造—成岩格架约束下的成岩作用研究将使人们对沉积盆地动力学过程、流体流动过程及储层成因与演化等方面的认识更加全面与深刻,因此,构造成岩作用势必成为沉积地质学家与构造地质学家共同感兴趣的研究领域,成为未来盆地和储层研究的重点与热点。

(2) 构造成岩作用研究思路将成为恢复盆地演化历史的有力工具。变形构造及与其相关的成岩产物记录了变形构造形成时期、期次及活动速率等构造信息,也记录了流体成因、流动样式等成岩作用信息以及变形过程与成岩作用之间的时序及相互关系。含油气盆地深层系经历了多期构造作用,形成多期次、多尺度变形构造,为恢复沉积盆地演化提供了实

证。借助高分辨率显微设备开展构造成岩作用研究,所揭示的构造信息的尺度与精度可为储层及盆地构造演化历史提供宝贵信息。

(3) 构造成岩作用研究深入开展亟待建立更全面、合理的变形条带分类体系。作为构造成岩作用主要研究对象之一的变形条带研究最早始于高孔砂岩,因此目前较为系统的变形条带分类只是针对砂岩,且分类的依据和出发点也不相同;其他岩性尤其是碳酸盐岩中变形条带的发现更是对现有的分类方案提出了新的要求。碳酸盐岩与砂岩在成因、组分及成岩过程等方面差异悬殊,其在漫长的演化历史中更易受到构造控制下的相关流体活动与深埋藏成岩作用的影响,因此其变形行为及形成的变形构造与砂岩存在较大差别。此外,碳酸盐岩与砂岩中的变形条带在岩石力学性质、孔渗性、渗流能力及成岩作用过程等方面可能存在较大的差别。故而亟须建立将动力学、形成机制及岩性等因素综合考虑的新的变形条带分类体系。

(4) 变形构造识别与空间分布预测是构造成岩作用研究的基础,也是致密储层研究的重点。变形构造空间分布及其对流体流动的影响直接决定了储层成岩作用非均质性、储层致密化过程以及油气田开发过程中的产能;未来应加强变形构造,尤其是变形条带与裂缝的空间分布预测及其对流体流动影响的研究。对变形构造空间分布预测既要重视岩芯尺度的变形构造及与其相关的成岩作用、流体包裹体及地球化学研究,也要重视野外露头同类变形构造的空间分布状态及其成因的研究。宏微观结合明确变形构造与流体流动之间的相互关系与作用有利于对地下裂缝型储层的有效性进行预测。

(5) 与软沉积物变形构造、砂岩脉及缝合线等变形构造相关的构造成岩作用研究应受到重视。目前主要针对变形条带与裂缝开展构造成岩作用研究,事实上,与软沉积物变形构造、砂岩脉及缝合线等变形构造有关的构造成岩作用研究价值与实际意义不容忽视。如,与同沉积变形构造有关的构造成岩作用研究为恢复沉积物,尤其是震积岩及各类重力流沉积物的成因与沉积过程的动力学提供了解释基础;缝合线构造与砂岩脉同样能提供构造控制下的储层成岩演化的相关信息。

(6) 构造成岩作用研究在我国尚处于起步阶段,发展空间很大。当前,中国学者在我国诸多含油气盆地开展了构造成岩作用研究,主要就构造作用对储层

的机械效应开展了较为深入的研究;与化学变化有关的构造成岩作用研究则处于现象表征的起步阶段。变形构造或与其相关的成岩产物所蕴含的构造及成岩信息尚有待挖掘,相关的科学问题也尚待解决。今后应加强不同尺度的构造成岩作用研究,力求实现从定性到定量,从现象描述到形成机理的飞跃,以揭示构造—流体耦合机制为发端,深入研究流体—岩石相互作用效应,推进储层成岩动力学过程和沉积盆地地动力学研究。

6 主要认识

(1) 构造成岩作用主要研究构造作用、构造和非构造成因的变形构造和变形效应与沉积物(岩)成岩变化之间的相互作用,变形构造的成岩作用及形成这些构造过程中所发生的成岩作用都属于构造成岩作用的研究范畴。

(2) 构造成岩作用为人们提供了在构造—成岩格架下探讨储层演化的新思路,有助于挖掘沉积盆地低温条件下成岩与构造演化等诸多信息。构造成岩作用研究往往能获得常规构造研究方法无法获得的小尺度构造信息,能为恢复储层乃至盆地演化历史提供宝贵信息。

(3) 构造成岩作用是一个新生的研究领域,仍有很多问题有待深入研究。碳酸盐岩及泥岩中的变形条带、软沉积物变形构造、砂岩脉及缝合线等变形构造以及变形构造空间分布预测是未来研究的重点。

(4) 当前我国构造成岩作用研究取得了不菲的成绩,但与国际同行仍存在一定差距。在未来研究工作中一方面要兼顾东部盆地,做到东西部盆地均衡发展;另一方面工作重心要适当地向与构造作用有关的化学成岩作用研究倾斜。

参考文献 (References)

- [1] 邱小平. 构造动力成岩成矿模拟实验成果分析及其地质意义[J]. 地球化学, 1993(3): 237-240. [Qiu Xiaoping. Analysis of the Achievements in tectonic dynamo-petrologic and dynamo-metallogenic simulating experiments and their geological significance[J]. Geochimica, 1993(3): 237-240.]
- [2] 刘正宏,徐仲元,王可勇. 大青山高级变质岩中复晶石英条带成因的显微构造和流体包裹体证据[J]. 中国科学(D辑):地球科学, 2007, 37(4): 488-494. [Liu Zhenghong, Xu Zhongyuan, Wang Keyong. Evidence of microstructures and fluid inclusions for the origin of polycrystalline quartz ribbons in high-grade metamorphic rocks in Daqingshan region[J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2007, 37(4): 488-494.]
- [3] Laubach S E, Eichhubl P, Hilgers C, et al. Structural diagenesis [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(12): 1866-1872.
- [4] Fossen H, Schultz R A, Shipton Z K, et al. Deformation bands in sandstone: a review[J]. Journal of the Geological Society, 2007, 164(4): 755-769.
- [5] Ramsay J G. The crack-seal mechanism of rock deformation[J]. Nature, 1980, 284(5752): 135-139.
- [6] Ahlgren S G. The nucleation and evolution of Riedel shear zones as deformation bands in porous sandstone[J]. Journal of Structural Geology, 2001, 23(8): 1203-1214.
- [7] Eichhubl P, Taylor W L, Pollard D D, et al. Paleofluid flow and deformation in the Aztec Sandstone at the Valley of Fire, Nevada—Evidence for the coupling of hydrogeologic, diagenetic, and tectonic processes[J]. Geological Society of America Bulletin, 2004, 116(9/10): 1120-1136.
- [8] Laubach S E, Reed R M, Olson J E, et al. Coevolution of crack-seal texture and fracture porosity in sedimentary rocks; cathodoluminescence observations of regional fractures[J]. Journal of Structural Geology, 2004, 26(5): 967-982.
- [9] Anders M H, Laubach S E, Scholz C H. Microfractures: a review [J]. Journal of Structural Geology, 2014, 69: 377-394.
- [10] Kristensen T B, Rotevatn A, Peacock D C P, et al. Structure and flow properties of syn-rift border faults: the interplay between fault damage and fault-related chemical alteration (Dombjerg Fault, Wollaston Forland, NE Greenland)[J]. Journal of Structural Geology, 2016, 92: 99-115.
- [11] Wennberg O P, Casini G, Jahanpanah A, et al. Deformation bands in chalk, examples from the Shetland Group of the Oseberg Field, North Sea, Norway[J]. Journal of Structural Geology, 2013, 56(7): 103-117.
- [12] Cilon A, Baud P, Tondi E, et al. Deformation bands in porous carbonate grainstones: field and laboratory observations[J]. Journal of Structural Geology, 2012, 45: 137-157.
- [13] Milliken K L, Reed R M. Multiple causes of diagenetic fabric anisotropy in weakly consolidated mud, Nankai accretionary prism, IODP Expedition 316[J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(12): 1887-1898.
- [14] Exner U, Grasemann B. Deformation bands in gravels: displacement gradients and heterogeneous strain[J]. Journal of the Geological Society, 2010, 167(5): 905-913.
- [15] 寿建峰,朱国华,张惠良. 构造侧向挤压与砂岩成岩压实作用:以塔里木盆地为例[J]. 沉积学报, 2003, 21(1): 90-95. [Shou Jianfeng, Zhu Guohua, Zhang Huiliang. Lateral structure compression and its influence on sandstone diagenesis: A case study from the Tarim Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003, 21(1): 90-95.]
- [16] 郭迎春,庞雄奇,陈冬霞,等. 川西坳陷中段须二段致密砂岩储层致密化与相对优质储层发育机制[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(增刊2): 21-32. [Guo Yingchun, Pang Xiongqi, Chen Dongxia, et al. Densification of tight gas sandstones and formation mechanism of relatively high-quality reservoir in the Sec-

- ond Member of the Xujiahe Formation, western Sichuan depression [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2012, 42(Suppl.2): 21-32.]
- [17] Li Y, Guo S, Wang X, et al. Stratification model of an ultra-deep tight sandstone fracture reservoir under tectonic stress: A case study of a Cretaceous reservoir in the Kuqa foreland thrust belt of the Tarim Basin [J]. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 2017, 45: 53-64.
- [18] 张荣虎,姚根顺,寿建峰,等. 沉积、成岩、构造一体化孔隙度预测模型[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(2): 145-151. [Zhang Ronghu, Yao Genshun, Shou Jianfeng, et al. An integration porosity forecast model of deposition, diagenesis and structure [J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2011, 38(2): 145-151.]
- [19] 袁静,李欣尧,李际,等. 库车坳陷迪那2气田古近系砂岩储层孔隙构造—成岩演化[J]. *地质学报*, 2017, 91(9): 2065-2078. [Yuan Jing, Li Xinyao, Li Ji, et al. Tectonic-diagenetic evolution of Paleocene tight sandstone reservoir pores in the DN2 gas field of Kuqa depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2017, 91(9): 2065-2078.]
- [20] 刘成林,朱筱敏,朱玉新,等. 不同构造背景天然气储层成岩作用及孔隙演化特点[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 746-753. [Liu Chenglin, Zhu Xiaomin, Zhu Yuxin, et al. Characteristics of diagenesis and pore evolution of gas reservoirs formed in different tectonic settings [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(6): 746-753.]
- [21] 冯磊,曾联波,杜宜静,等. 构造成岩作用对裂缝有效性的影响:以库车前陆盆地白垩系致密砂岩储层为例[J]. *中国矿业大学学报*, 2015, 44(3): 514-519. [Gong Lei, Zeng Lianbo, Du Yijing, et al. Influences of structural diagenesis on fracture effectiveness: A case study of the Cretaceous tight sandstone reservoirs of Kuqa foreland basin [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2015, 44(3): 514-519.]
- [22] 寿建峰,张惠良,斯春松,等. 砂岩动力成岩作用[M]. 北京:石油工业出版社,2005. [Shou Jianfeng, Zhang Huiliang, Si Chun-song, et al. *Dynamic diagenesis of sandstone* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.]
- [23] 李忠,张丽娟,寿建峰,等. 构造应变与砂岩成岩的构造非均质性:以塔里木盆地库车坳陷研究为例[J]. *岩石学报*, 2009, 25(10): 2320-2330. [Li Zhong, Zhang Lijuan, Shou Jianfeng, et al. Structural strain and structural heterogeneity of sandstone diagenesis: A case study for the Kuqa subbasin in the northern Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2009, 25(10): 2320-2330.]
- [24] 李忠,刘嘉庆. 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[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 837-848. [Li Zhong, Liu Jiaqing. Key problems and research trend of diagenetic geodynamic mechanism and spatio-temporal distribution in sedimentary basins [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 837-848.]
- [25] 张金亮,张鹏辉,谢俊,等. 碎屑岩储集层成岩作用研究进展与展望[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(9): 957-967. [Zhang Jinliang, Zhang Penghui, Xie Jun, et al. Diagenesis of clastic reservoirs: advances and prospects [J]. *Advances in Earth Science*, 2013, 28(9): 957-967.]
- [26] 曾联波,朱如凯,高志勇,等. 构造成岩作用及其油气地质意义[J]. *石油科学通报*, 2016, 1(2): 191-197. [Zeng Lianbo, Zhu Rukai, Gao Zhiyong, et al. Structural diagenesis and its petroleum geological significance [J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2016, 1(2): 191-197.]
- [27] 郭光辉,陈志勇,郭群英. 碳酸盐岩变形带特征及其与油气关系:以塔里木盆地古生界为例[J]. *大地构造与成矿学*, 2014, 38(3): 580-589. [Wu Guanghui, Chen Zhiyong, Guo Qunying. Characteristics of carbonate deformation band and its significance for hydrocarbon exploration: An example from the Lower Paleozoic in the Tarim Basin [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2014, 38(3): 580-589.]
- [28] 袁静,杨学君,袁凌荣,等. 库车坳陷 DB 气田白垩系砂岩胶结作用及其与构造裂缝关系[J]. *沉积学报*, 2015, 33(4): 754-763. [Yuan Jing, Yang Xuejun, Yuan Lingrong, et al. Cementation and Its relationship with tectonic fractures of Cretaceous sandstones in DB gas field of Kuqa Sub-basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2015, 33(4): 754-763.]
- [29] Becker S P, Eichhubl P, Laubach S E, et al. A 48 m.y. history of fracture opening, temperature, and fluid pressure: cretaceous Travis Peak Formation, East Texas Basin [J]. *GSA Bulletin*, 2010, 122(7/8): 1081-1093.
- [30] Aydin A. Small faults formed as deformation bands in sandstone [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1978, 116(4/5): 913-930.
- [31] Aydin A, Borja R I, Eichhubl P. Geological and mathematical framework for failure modes in granular rock [J]. *Journal of Structural Geology*, 2006, 28(1): 83-98.
- [32] Fossen H, Soliva R, Ballas G, et al. A review of deformation bands in reservoir sandstones: geometries, mechanisms and distribution [M]//Ashton M, Dee S J, Wennberg O P. *Subseismic-scale reservoir deformation*. Geological Society, London, Special Publications, 2017.
- [33] Exner U, Kaiser J, Gier S. Deformation bands evolving from dilation to cementation bands in a hydrocarbon reservoir (Vienna Basin, Austria) [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2013, 43(5): 504-515.
- [34] Schueller S, Braathen A, Fossen H, et al. Spatial distribution of deformation bands in damage zones of extensional faults in porous sandstones; statistical analysis of field data [J]. *Journal of Structural Geology*, 2013, 52: 148-162.
- [35] Rustichelli A, Tondi E, Agosta F, et al. Development and distribution of bed-parallel compaction bands and pressure solution seams in carbonates (Bolognano Formation, Majella Mountain, Italy) [J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 37(4): 181-199.
- [36] Rotevatn A, Thorsheim E, Bastesen E, et al. Sequential growth of deformation bands in carbonate grainstones in the hangingwall of an active growth fault; implications for deformation mechanisms in different tectonic regimes [J]. *Journal of Structural Geology*, 2016, 90(9): 27-47.

- [37] Tavani S, Vitale S, Grifa C, et al. Introducing dolomite seams; hybrid compaction-solution bands in dolomitic limestones[J]. *Terra Nova*, 2016, 28(3): 195-201.
- [38] Ishii E. Microstructure and origin of faults in siliceous mudstone at the Horonobe Underground Research Laboratory site, Japan[J]. *Journal of Structural Geology*, 2012, 34(1): 20-29.
- [39] Busch B, Winkler R, Osivandi K, et al. Evolution of small-scale flow barriers in German Rotliegend siliciclastics[M]//Armitage P J, Butcher A R, Churchill J M, et al. Reservoir quality of clastic and carbonate rocks; analysis, modelling and prediction. Geological Society, London, Special Publications, 2015.
- [40] Busch B, Hilgers C, Gronen L, et al. Cementation and structural diagenesis of fluvio-aeolian Rotliegend sandstones, northern England[J]. *Journal of the Geological Society*, 2017, 174(5): 855-868.
- [41] Lommatzsch M, Exner U, Gier S, et al. Dilatant shear band formation and diagenesis in calcareous, arkosic sandstones, Vienna Basin (Austria)[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 62(4): 144-160.
- [42] Khan I, Ahmad S, Arif M, et al. Impact of diagenetic and depositional fabric on reservoir quality; a synthesis from Late Cretaceous and Early Paleocene sandstones in Eastern Sulaiman Range, Pakistan[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2016, 9: 388.
- [43] Tindall S E. Jointed deformation bands may not compartmentalize reservoirs[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(2): 177-192.
- [44] 付晓飞,肖建华,孟令东. 断裂在纯净砂岩中的变形机制及断裂带内部结构[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2014, 44(1): 25-37. [Fu Xiaofei, Xiao Jianhua, Meng Lingdong. Fault deformation mechanisms and internal structure characteristics of fault zone in pure sandstone[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2014, 44(1): 25-37.]
- [45] Parnell J, Watt G R, Middleton D, et al. Deformation band control on hydrocarbon migration[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2004, 74(4): 552-560.
- [46] Fossen H, Bale A. Deformation bands and their influence on fluid flow[J]. *AAPG Bulletin*, 2007, 91(12): 1685-1700.
- [47] Rotevatn A, Sandve T H, Keilegavlen E, et al. Deformation bands and their impact on fluid flow in sandstone reservoirs; the role of natural thickness variations[J]. *Geofluids*, 2013, 13(3): 359-371.
- [48] Rotevatn A, Fossmark H, Bastesen E, et al. Do deformation bands matter for flow? Insights from permeability measurements and flow simulations in porous carbonate rocks[J]. *Petroleum Geoscience*, 2016, 23(1): 104-119.
- [49] Tindall S E. Simple calculations of fluid flow across jointed cataclastic deformation bands[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2014, 57(11): 152-159.
- [50] Onasch C M, Farver J R, Dunne W M. The role of dilation and cementation in the formation of cataclasite in low temperature deformation of well cemented quartz-rich rocks[J]. *Journal of Structural Geology*, 2010, 32(12): 1912-1922.
- [51] Parry W T, Chan M A, Beitler B. Chemical bleaching indicates episodes of fluid flow in deformation bands in sandstone[J]. *AAPG Bulletin*, 2004, 88(2): 175-191.
- [52] Segall P. Formation and growth of extensional fracture sets[J]. *GSA Bulletin*, 1984, 95(4): 454-462.
- [53] 周文. 裂缝性油气储集层评价方法[M]. 成都:四川科学技术出版社, 1998. 39-43, 78-88. [Zhou Wen. Evaluation methods of fracture reservoir in oil and gas pool[M]. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1988: 39-43, 78-88.]
- [54] 袁静,曹宇,李际,等. 库车坳陷迪那气田古近系裂缝发育的多样性与差异性[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(5): 840-850. [Yuan Jing, Cao Yu, Li Ji, et al. Diversities and disparities of fracture systems in the Paleogene in DN gas field, Kuqa depression, Tarim Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(5): 840-850.]
- [55] 王改云,刘金萍,简晓玲,等. 北黄海盆地地下白垩统致密砂岩储层特征及成因[J]. *地球科学*, 2016, 41(3): 523-532. [Wang Gaiyun, Liu Jinping, Jian Xiaoling, et al. Characteristics and genetic mechanism of tight sandstone reservoirs of Lower Cretaceous in North Yellow Sea Basin[J]. *Earth Science*, 2016, 41(3): 523-532.]
- [56] 王建民,张三. 特低渗砂岩储集层孔隙结构差异与低电阻率油层成因:以鄂尔多斯盆地中部烟雾岭区块为例[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(2): 1-8. [Wang Jianmin, Zhang San. Pore structure differences of the extra-low permeability sandstone reservoirs and the causes of low resistivity oil layers: A case study of Block Yanwumao in the middle of Ordos Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2018, 45(2): 1-8.]
- [57] 谢传礼. 长庆气田奥陶系马五段碳酸盐岩裂缝发育程度与气藏关系研究[J]. *天然气勘探与开发*, 2005, 28(3): 8-13. [Xie Chuanli. Relationships between fracture development and gas reservoirs in Member Ma 5 of Ordovician carbonate formation, Changqing gas field[J]. *Natural Gas Exploration and Development*, 2005, 28(3): 8-13.]
- [58] 何伶,赵伦,李建新,等. 碳酸盐岩储集层复杂孔渗关系及影响因素:以滨里海盆地台地相为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(2): 206-214. [He Ling, Zhao Lun, Li Jianxin, et al. Complex relationship between porosity and permeability of carbonate reservoirs and its controlling factors: A case of platform facies in Pre-Caspian Basin[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2014, 41(2): 206-214.]
- [59] 王珂,张惠良,张荣虎,等. 超深层致密砂岩储层构造裂缝特征及影响因素:以塔里木盆地克深2气田为例[J]. *石油学报*, 2016, 37(6): 715-727, 742. [Wang Ke, Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, et al. Characteristics and influencing factors of ultra-deep tight sandstone reservoir structural fracture: A case study of Keshen-2 gas field, Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(6): 715-727, 742.]
- [60] Lavenu A P C, Lamarche J, Gallois A, et al. Tectonic versus diagenetic origin of fractures in a naturally fractured carbonate reservoir analog (Nerthe anticline, Southeastern France)[J]. *AAPG*

- Bulletin, 2013, 97(12): 2207-2232.
- [61] 丁文龙,王兴华,胡秋嘉,等. 致密砂岩储层裂缝研究进展[J]. 地球科学进展, 2015, 30(7): 737-750. [Ding Wenlong, Wang Xinghua, Hu Qiuji, et al. Progress in tight sandstone reservoir fractures research[J]. Advances in Earth Science, 2015, 30(7): 737-750.]
- [62] Feng G, Kang Y, Meng T, et al. The influence of temperature on mode I fracture toughness and fracture characteristics of sandstone [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2017, 50(8): 2007-2019.
- [63] Parsons R W. Permeability of idealized fractured rock[J]. Society of Petroleum Engineers Journal, 1966, 6(2): 126-136.
- [64] Laubach S E, Ward M E. Diagenesis in porosity evolution of opening-mode fractures, Middle Triassic to Lower Jurassic La Boca Formation, NE Mexico[J]. Tectonophysics, 2006, 419(1/2/3/4): 75-97.
- [65] Liu W Q, Manga M. Changes in permeability caused by dynamic stresses in fractured sandstone[J]. Geophysical Research Letters, 2009, 36(20): L20307.
- [66] Gong J, Rossen W R. Modeling flow in naturally fractured reservoirs; effect of fracture aperture distribution on dominant sub-network for flow[J]. Petroleum Science, 2017, 14(1): 138-154.
- [67] Laubach S E, Olson J E, Gale J F W. Are open fractures necessarily aligned with maximum horizontal stress? [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2004, 222(1): 191-195.
- [68] Wennberg O P, Casini G, Jonoud S, et al. The characteristics of open fractures in carbonate reservoirs and their impact on fluid flow: a discussion[J]. Petroleum Geoscience, 2016, 22(1): 91-104.
- [69] Wilkinson M, Darby D, Haszeldine R S, et al. Secondary porosity generation during deep burial associated with overpressure leak-off; Fulmar formation, United Kingdom Central Graben [J]. AAPG Bulletin, 1997, 81(5): 803-813.
- [70] Yuan G H, Cao Y C, Gluyas J, et al. Feldspar dissolution, authigenic clays, and quartz cements in open and closed sandstone geochemical systems during diagenesis; typical examples from two sags in Bohai Bay Basin, East China[J]. AAPG Bulletin, 2015, 99(11): 2121-2154.
- [71] Guidry S A, Grasmueck M, Carpenter D G, et al. Karst and early fracture networks in Carbonates, Turks and Caicos Islands, British West Indies[J]. Journal of Sedimentary Research, 2007, 77(6): 508-524.
- [72] Emmanuel S, Berkowitz B. Effects of pore-size controlled solubility on reactive transport in heterogeneous rock [J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(6): L06404.
- [73] de Graaf S, Reijmer J J G, Bertotti G V, et al. Fracturing and calcite cementation controlling fluid flow in the shallow-water carbonates of the Jandaíra Formation, Brazil[J]. Marine and Petroleum Geology, 2017, 80(2): 382-393.
- [74] Olson J E, Laubach S E, Lander R H. Combining diagenesis and mechanics to quantify fracture aperture distributions and fracture pattern permeability[M]//Loneragan L, Jolly R J H, Rawnsley K, et al. Fractured reservoirs. Geological Society, London, Special Publications, 2007, 270(1): 101-116.
- [75] Gale J F W, Lander R H, Reed R M, et al. Modeling fracture porosity evolution in dolostone [J]. Journal of Structural Geology, 2010, 32(9): 1201-1211.
- [76] Paganoni M, Al Harthi A, Morad D, et al. Impact of stylolitization on diagenesis of a lower cretaceous carbonate reservoir from a giant oilfield, Abu Dhabi, United Arab Emirates[J]. Sedimentary Geology, 2016, 335: 70-92.
- [77] Sirat M, Al-Aasm I S, Morad S, et al. Saddle Dolomite and calcite cements as records of fluid flow during basin evolution: Paleogene Carbonates, United Arab Emirates[J]. Marine and Petroleum Geology, 2016, 74: 71-91.
- [78] 王琪,郝乐伟,陈国俊,等. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理[J]. 石油学报, 2010, 31(4): 553-558. [Wang Qi, Hao Lewei, Chen Guojun, et al. Forming mechanism of carbonate cements in siliciclastic sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun sag[J]. Acta Petrolei Sinica, 2010, 31(4): 553-558.]
- [79] Fricke H C, Wickham S M, O'Neil J R. Oxygen and hydrogen isotope evidence for meteoric water infiltration during mylonitization and uplift in the Ruby Mountains-East Humboldt Range core complex, Nevada [J]. Contributions to Mineralogy and Petrology, 1992, 111(2): 203-221.
- [80] Denny A C, Kozdon R, Kitajima K, et al. Isotopically zoned carbonate cements in Early Paleozoic sandstones of the Illinois Basin: $\delta^{18}O$ and $\delta^{13}C$ records of burial and fluid flow[J]. Sedimentary Geology, 2017, 361: 93-110.
- [81] 黄思静,兰叶芳,黄可可,等. 四川盆地西部中二叠统栖霞组晶洞充填物特征与热液活动记录[J]. 岩石学报, 2014, 30(3): 687-698. [Huang Sijing, Lan Yefang, Huang Keke, et al. Vug fillings and records of hydrothermal activity in the Middle Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2014, 30(3): 687-698.]
- [82] 蔡春芳,赵龙. 热化学硫酸盐还原作用及其对油气与储集层的改造作用:进展与问题[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2016, 35(5): 851-859. [Cai Chunfang, Zhao Long. Thermochemical sulfate reduction and its effects on petroleum composition and reservoir quality: advances and problems [J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2016, 35(5): 851-859.]
- [83] 李继岩,王永诗,刘传虎,等. 热液流体活动及其对碳酸盐岩储集层改造定量评价:以渤海湾盆地东营凹陷西部下古生界为例 [J]. 石油勘探与开发, 2016, 43(3): 359-366. [Li Jiyan, Wang Yongshi, Liu Chuanhu, et al. Hydrothermal fluid activity and the quantitative evaluation of its impact on carbonate reservoirs: A case study of the Lower Paleozoic in the west of Dongying sag, Bohai Bay Basin, East China [J]. Petroleum Exploration & Development, 2016, 43(3): 359-366.]
- [84] Dolnčec Z, Kropáč K, Janččková K, et al. Diagenetic source of fluids causing the hydrothermal alteration of teschenites in the Silesian Unit, Outer Western Carpathians, Czech Republic; Petrole-

- um-bearing vein mineralization from the Stříbrník site[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 37(1): 27-40.
- [85] 单秀琴,张宝民,张静,等. 古流体恢复及在储集层形成机理研究中的应用:以塔里木盆地奥陶系为例[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(3): 274-282. [Shan Xiuqin, Zhang Baomin, Zhang Jing, et al. Paleofluid restoration and its application in studies of reservoir forming: A case study of the Ordovician in Tarim Basin, NW China[J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2015, 42(3): 274-282.]
- [86] Vandeginste V, Swennen R, Allaeyns M, et al. Challenges of structural diagenesis in foreland fold-and-thrust belts: A case study on paleofluid flow in the Canadian Rocky Mountains West of Calgary [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2012, 35(1): 235-251.
- [87] Matonti C, Guglielmi Y, Viseur S, et al. P-wave velocity anisotropy related to sealed fractures reactivation tracing the structural diagenesis in carbonates[J]. *Tectonophysics*, 2017, 705(5): 80-92.
- [88] Fossen H. Deformation bands formed during soft-sediment deformation: observations from SE Utah[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2010, 27(1): 215-222.
- [89] Ábalos B, Elorza J. Structural diagenesis of siderite layers in black shales (Albian Black Flysch, Northern Spain)[J]. *The Journal of Geology*, 2012, 120(4): 405-429.
- [90] Ravier E, Guiraud M, Vennin E, et al. Micro- to macro-scale internal structures, diagenesis and petrophysical evolution of injectite networks in the Vocontian Basin (France): implications for fluid flow[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2015, 64(11): 125-151.
- [91] 朱东亚,胡文瑄,张学丰,等. 塔河油田奥陶系灰岩埋藏溶蚀作用特征[J]. *石油学报*, 2007, 28(5): 57-62. [Zhu Dongya, Hu Wenxuan, Zhang Xuefeng, et al. Characteristics of burial dissolution in the Ordovician limestone of Tahe oilfield[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(5): 57-62.]
- [92] 郭沫贞,徐洋,寿建峰,等. 准噶尔盆地西北缘二叠系碎屑岩次生孔隙发育控制因素[J]. *沉积学报*, 2017, 35(2): 330-342. [Guo Mozhen, Xu Yang, Shou Jianfeng, et al. Controlling factors of secondary pore development and petroleum exploration significance of Permian clastic rocks in northwest margin of Junggar Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(2): 330-342.]
- [93] 黄思静,武文慧,刘洁,等. 大气水在碎屑岩次生孔隙形成中的作用:以鄂尔多斯盆地三叠系延长组为例[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2003, 28(4): 419-424. [Huang Sijing, Wu Wenhui, Liu Jie, et al. Generation of secondary porosity by meteoric water during time of subaerial exposure: An example from Yanchang Formation sandstone of Triassic of Ordos Basin [J]. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences*, 2003, 28(4): 419-424.]
- [94] 张文才,李贺,李会军,等. 南堡凹陷高柳地区深层次生孔隙成因及分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2008, 35(3): 308-312. [Zhang Wencai, Li He, Li Huijun, et al. Genesis and distribution of secondary porosity in the deep horizon of Gaoliu area, Nanpu sag [J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2008, 35(3): 308-312.]
- [95] 赵文智,沈安江,胡素云,等. 中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 1-12. [Zhao Wenzhi, Shen Anjiang, Hu Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China [J]. *Petroleum Exploration & Development*, 2012, 39(1): 1-12.]
- [96] 李克永,李文厚,张东阳,等. 鄂尔多斯盆地安塞油田长10优质储层特征[J]. *地质通报*, 2013, 32(9): 1453-1460. [Li Keyong, Li Wenhui, Zhang Dongyang, et al. An analysis of favorable reservoir characteristics of Chang 10 Formation in the Ansai oilfield, Ordos Basin[J]. *Geological Bulletin of China*, 2013, 32(9): 1453-1460]
- [97] 樊生利,童崇光. 四川二叠系碳酸盐岩裂缝系统成因模式探讨[J]. *石油实验地质*, 1995, 17(4): 343-350. [Fan Shengli, Tong Chongguang. A discussion on the genetic model of crack system in the Permian carbonate rocks of Sichuan province[J]. *Experimental Petroleum Geology*, 1995, 17(4): 343-350.]
- [98] 曹中宏,张红臣,刘国勇,等. 南堡凹陷碳酸盐岩优质储层发育主控因素与分布预测[J]. *石油与天然气地质*, 2015, 36(1): 103-110. [Cao Zhonghong, Zhang Hongchen, Liu Guoyong, et al. Main control factors and distribution prediction of high-quality carbonate reservoirs in the Nanpu sag, Bohai Bay Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36(1): 103-110.]
- [99] 曲长伟,林春明,蔡明俊,等. 渤海湾盆地北塘凹陷古近系沙河街组三段白云岩储层特征[J]. *地质学报*, 2014, 88(8): 1588-1602. [Qu Changwei, Lin Chunming, Cai Mingjun, et al. Characteristics of dolostone reservoir in Sha 3 group from Palaeogene Shahejie Formation in Beitang sag, Bohaiwan Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2014, 88(8): 1588-1602.]
- [100] 高志勇,马建英,崔京钢,等. 埋藏(机械)压实—侧向挤压地质过程下深层储层孔隙演化与预测模型[J]. *沉积学报*, 2018, 36(1): 176-187. [Gao Zhiyong, Ma Jianying, Cui Jinggang, et al. Deep reservoir pore evolution model of a geological process from burial compaction to lateral extrusion [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(1): 176-187.]
- [101] 冯佳睿,高志勇,崔京钢,等. 库车坳陷迪北侏罗系深部储层孔隙演化特征与有利储层评价:埋藏方式制约下的成岩物理模拟实验研究[J]. *地球科学进展*, 2018, 33(3): 305-320. [Feng Jiarui, Gao Zhiyong, Cui Jinggang, et al. Reservoir porosity evolution characteristics and evaluation of the Jurassic deep reservoir from Dibe in Kuqa depression: Insight from diagenesis modeling experiments under the influence of burial mode [J]. *Advances in Earth Science*, 2018, 33(3): 305-320.]
- [102] 王俊鹏,张惠良,张荣虎,等. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(1): 77-88. [Wang Junpeng, Zhang Huiliang, Zhang Ronghu, et al. Enhancement of ultra-deep tight sandstone reservoir quality by fractures: A case study of Keshen gas field in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(1): 77-88.]

- [103] 冯明友,郑江,刘田,等. 川北地区寒武系筇竹寺组钙质结核裂缝充填物特征及指示意义[J]. 地质论评, 2018, 64(3): 711-722. [Feng Mingyou, Zheng Jiang, Liu Tian, et al. Characteristics and implications of fracture-filling in carbonate concretions from the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, northern Sichuan[J]. Geological Review, 2018, 64(3): 711-722.]
- [104] 韩登林,赵睿哲,李忠,等. 不同动力学机制共同制约下的储层压实效应特征:以塔里木盆地库车坳陷白垩系储层研究为例[J]. 地质科学, 2015, 50(1): 241-248. [Han Denglin, Zhao Ruizhe, Li Zhong, et al. The characteristic of diagenetic compaction induced by multiform geodynamic mechanisms in reservoir: An example from Cretaceous sandstone reservoir in Kuqa depression, Tarim Basin [J]. Chinese Journal of Geology, 2015, 50(1): 241-248.]
- [105] 柳广弟,王雅星. 库车坳陷纵向压力结构与异常高压形成机理[J]. 天然气工业, 2006, 26(9): 29-31. [Liu Guangdi, Wang Yaxing. Vertical pressure structure and genetic mechanism of overpressure in Kuqa depression, the Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2006, 26(9): 29-31.]
- [106] Yang R, He S, Li T Y, et al. Origin of over-pressure in clastic rocks in Yuanba area, northeast Sichuan Basin, China[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2016, 30: 90-105.
- [107] 刘震,孙迪,李淮莲,等. 沉积盆地地层孔隙动力学研究进展[J]. 石油学报, 2016, 37(10): 1193-1215. [Liu Zhen, Sun Di, Li Weilian, et al. Advances in research on stratigraphic porodynamics of sedimentary basins[J]. Acta Petrolei Sinica, 2016, 37(10): 1193-1215.]
- [108] Nguyen B T T, Jones S J, Gouly N R, et al. The role of fluid pressure and diagenetic cements for porosity preservation in Triassic fluvial reservoirs of the central Graben, North Sea[J]. AAPG Bulletin, 2013, 97(8): 1273-1302.

An Overview of Structural Diagenesis

YUAN Jing^{1,2}, YU GuoDing¹, ZHONG JianHui¹, DONG ZhiFang¹, XIE Jun¹, SHAN Kang¹

1. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China

2. Evaluation and Detection Technology Laboratory of Marine Resources, Qingdao National Laboratory For Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong, 266071, China

Abstract: Structural diagenesis, which is a cross-discipline of structural geology and sedimentology, is a frontier research field; it mainly studies the interaction between the tectonic action and its deformation structure and effect and the diagenesis of the sediments (rock). Deformation structures and processes have an important influence on the diagenesis heterogeneity through influencing the diagenetic fluid flow; the diagenesis research related to the deformation structure can provide people with diagenetic evolution, fluid flow, and period, stage and rate of structure development. Structural diagenesis provides a new idea for researching the reservoir evolution under the structure-diagenetic framework. It should be noted in practical work that this idea should be considered in research including genesis and prediction, densification mechanism of the reservoir, and evolution of sedimentary basins. The new classification system for deformation bands that include carbonates needs to be established urgently; the research related to deformation bands in carbonate rock started relatively late and is relatively weak. Therefore, research in this area should be strengthened in the future. The degree of research between different deformation structures is not balanced. Deformation bands and fractures constitute the main body of diagenesis research; diagenesis research related to deformation structures, such as soft sediment deformation structure and sandstone veins, needs further strengthening. The research concerning spatial distribution prediction of deformation structures and their influence on the fluid flow should be conducted by integration of various data and methods, such as cores, outcrops, and numerical simulations. Domestic scholars have carried out research on the impact of tectonic activity on physical changes of reservoirs in the Midwest Basin and made important progress; the influence of tectonism on reservoir chemical change has started. The dynamic mechanism and process of reservoir evolution and distribution should be explored by using structural diagenesis in the future in order to promote studies of reservoir diagenesis dynamics and sedimentary basin dynamics.

Key words: structural diagenesis; deformation bands; fracture; diagenetic fluid; reservoir