

doi:10.3799/dqkx.2014.145

渤海湾盆地隐性断裂带识别及其地质意义

周维维, 王伟锋, 安邦, 胡瑜

中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

摘要: 隐性断裂带是区域或局部应力场、基底断裂体系活动、潜山块体扭动影响下在沉积盆地盖层中产生的断裂趋势带,它是断裂带的一种类型,与显性断裂伴生于沉积盆地,但由于其不具有显性断裂的固有特征,隐蔽性强而常常被忽略。可以通过以下7个方面有效识别隐性断裂带:①小型显性构造(小断层、小褶皱、断块)呈雁列式、断续状、错位对称式反映的大型隐性断裂带;②基底断裂体系活动在沉积盆地盖层中产生的隐性断裂带;③潜山、凹陷分布形成的线状、调节型或者侧列式隐性断裂带;④砂体分布反映的隐性断裂带;⑤油藏排列、分布、走向反映的隐性断裂带;⑥相干体切片显示的隐性断裂带;⑦断层叠覆端、末端、深大断裂分段活动等局部应力场变化形成的隐性断裂带。应用上述方法开展渤海湾盆地隐性断裂带识别研究,综合国内外的调研结果,建立了隐性断裂带的类型划分方案体系并阐述了不同级别构造单元中隐性断裂带的类型特征。研究表明,隐性断裂带具有多方面的地质意义,可以作为调节构造带调节盆地不均匀伸展活动,分隔凹陷、隆起等构造单元;控制盆地沉积相带发育分布,影响凹陷湖盆砂体的展布范围;控制圈闭组合排列、改造输导体系,形成串珠状、带状油气富集区;深断裂活动触发地震的过程中会在地表形成隐性断裂带,因此,隐性断裂带的识别和分析具有现实意义。

关键词: 隐性断裂带;基底断裂;雁列式;潜山;调节构造;油气富集;石油地质。

中图分类号: TE12

文章编号: 1000-2383(2014)11-1527-12

收稿日期: 2014-06-05

Identification of Potential Fault Zones and Its Geological Significance in Bohai Bay Basin

Zhou Weiwei, Wang Weifeng, An Bang, Hu Yu

School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: Potential fault zones refer to the fault zones which are influenced by regional or local stress field, basement rift activities, buried hill blocks twist and formed in the cover layer of sedimentary basin. It is a type of fault zone associated with dominant fault, which is often ignored because of the absence of inherent characteristics of dominant faults. It can be identified from 7 aspects below: ① large potential fault zones reflected by en-echelon, intermittent, dislocation of symmetrical arranged small dominant structure (small faults, small folds, fault blocks); ② potential fault zones produced by basement rift system activities; ③ linear, accommodated or side arranged potential fault zones formed by buried hills and sags; ④ potential fault zones reflected by the distribution of sandstone bodies; ⑤ potential fault zones reflected by the distribution, arrangement and strike of reservoirs; ⑥ potential fault zones reflected by coherent body slices; ⑦ potential fault zones formed by local stress field of overlapped fault, segment activities of deep and large faults. Taking the Bohai Bay basin as an example, a classification scheme of potential fault zone is established based on research results at home and abroad, and the characteristics of the potential faults in different levels of tectonic units are discussed. Potential fault zones are proved to be of geological significance in the following aspects. Firstly, it affects the tectonic pattern of basins by adjusting the inhomogeneous extension activities among different faulted blocks in basins and by separating the tectonic units such as sags and uplifts etc. Secondly, it determines the development and distribution of basin sedimentary facies and influences the distribution range of the sandstone in faulted basin. Thirdly, it yields bead string-like, belt-like, and ring-like oil-gas accumulation zones. The activities of deep faults are prone to induce earthquake and form the potential fault zones on the surface. Therefore, identification and analysis of potential fault zones can be important in reality.

Key words: potential fault zone; basement-involved fault; en-echelon; buried hill; transfer zone; hydrocarbon accumulation; petroleum geology.

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 41340008); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(No. 14CX06069).

作者简介: 周维维(1986-), 男, 在读博士, 主要从事含油气盆地地质构造研究. E-mail: weiwei29100591@163.com

0 引言

近些年来,苏北盆地东阳、花庄等地区不断发现隐蔽性圈闭带,专家和学者通过重磁、遥感、高精度的三维地震勘探、地质和钻井等资料详细论证之下,在金湖凹陷多个构造带发现了“隐性”断裂带,它们具有多种断裂组合特征和构造变形方式,同时这些隐性断裂带表现为北东向、北西向、近南北向的油藏带。“隐性”断裂带的发现引起了大量学者的重视:鄂尔多斯盆地北东向基底断裂中生代以来的“隐性”活动控制了陇东—志靖和安塞地区的北东向带状区域内,已发现的大油气田和每年新增探明储量也在该区带获得(赵文智等,2003);准噶尔盆地侏罗—白垩系油气主要聚集到二叠纪“古梁”上成藏(胡素云等,2006),已发现的石南、石西、莫北和彩南油气田均沿NE、NNE向构造带呈规律性排列,与NNE向基底断裂的分布基本对应,而“古梁”成为河道的本质是基底断裂“隐性”活动形成的断裂破碎带控制了物源水系的分布;四川盆地川中地区须家河组主要气田呈现出“三横两竖”网状分布特征,经查明北西向的气藏带受到一些断断续续分布的小断层和低幅度构造的控制(汪泽成等,2005),并且这些隐蔽性构造与基底断裂分布相对应。

国外的一些构造地质学家对隐性断裂带的研究也做出了一些探索。Crook *et al.* (2006)和Hardy (2011)应用离散元素模型开展数值模拟实验去观察陡立的(倾角为 70°)基底正断层在断距不断增加的过程中引起的盖层构造变形,分析盖层变形过程中剪应变的增量以及对应的几何学特征,持续增加滑动位移,基底断裂沿着顶点开始向盖层中下降盘的方向扩展,当位移递进增加(逐次增加125 m)过程中,盖层中出现了一条剪应变断断续续变化的趋势带,Hardy称之为离散逆断裂带,其实逆断裂只存在于剖面上的局部段落,整体上则表现为一条向上盘扩展的断裂趋势带;持续增加位移量,出现了向下盘盖层扩展的断裂趋势带,最终,在不断加位位移量的情况下形成了2条继承性发育的显性断裂。Hardy认为上述的多个演化阶段形成的构造变形,包括早期的非常不显著的背斜构造、中期形成的离散断裂带(隐性断裂带)、以及晚期形成的上下贯通的深大断裂,都在影响着圈闭形成和流体运移。Mitra and Miller(2013)在研究基底卷入构造引起的三角剪切构造变形时发现,直立基底断层,低角度逆断层,高角度正断层活动的过程中都会在基底断裂活动的盖

层部位形成上述的断裂趋势带;Jackson and Rotevan(2013)在研究盐构造相关的断裂带构造演化问题时,建立了盐构造相关的断层生长模型,他建立的平面、剖面模型显示,当基底控制的盐构造活动较弱的时期,对应于上述的数值模拟实验形成的断裂趋势带的形成期,平面上会形成一些零星分布的小断层似有似无的分布在雁列式断裂带之间。

本文综合国内外的调研结果,以及渤海湾盆地的相关研究成果,将隐性断裂带概念暂且定义为:区域或局部应力场、基底断裂体系活动、潜山块体扭动影响下在沉积盆地盖层中产生的断裂趋势带,它是断裂带的一种类型,与显性断裂伴生于沉积盆地,但由于不具有显性断裂的固有特征、隐蔽性强、常常被忽略。在此基础上提出识别分析方法,建立隐性断裂带的类型划分方案体系并阐述其类型特征,并且初步的探讨了隐性断裂带存在的地质意义,以期对隐性断裂形成演化研究、构造物理模拟、数值模拟实验等后续的研究工作提供基础。

1 成因地质背景分析

渤海湾地区新生代是一个裂陷盆地(漆家福,2004),新生代成盆以前,主要形成了NE-NNE向、NW向和近EW向3组基底断裂。古近纪以后,新构造格局形成,始新世发生的区域性裂陷作用以及新近纪沉积以后太平洋板块再次俯冲、挤压,郯庐断裂发生右行走滑作用导致基底断裂活化(李三忠等,2011),北东向断裂与郯庐断裂和黄骅—德州—东明断裂一起右旋走滑,沉积盖层中不仅形成了大量的控盆控凹的显性断裂,而且形成了多条北东向—北北东向的隐性断裂带,北西向基底断层古近纪以后活动较弱对盖层变形影响较小,仅在一些小型断陷盆地群形成了局部的控盆显性断裂,在盖层中多以北西向“隐性断裂带”显现。凹陷中部的黄骅—德州—东明显性断裂带将盆地分割成西部伸展区(冀中、东濮、临清)和东部反转区(济阳、渤中),西部伸展区受基底北西向断裂“隐性”活动的影响呈现南北分段特征,形成了凹陷与凸起相间排列的构造格局。郯庐右旋走滑形成了南北向拉张应力分量,在此应力场作用下凹陷内部还发育了大量近东西走向的三、四级正断层,它们大致平行成带分布,规模较大者控制了小型断陷盆地的发育(东营凹陷等),规模中等者形成雁列式、平行式、人字等一系列构造带或者帚状断裂体系,规模较小者则形成了断断续续、时

有时无的隐性断裂带. 研究表明, 这些隐性断裂带大至盆地级别, 小至洼陷级、甚至圈闭级, 普遍存在于沉积盆地中, 具有多种识别方法和手段.

2 隐性断裂带的识别

2.1 小型显性构造(小断层、小褶皱、断块有规律组合)反映的大型隐性断裂带

隐性断裂带上的显性断层和隐蔽性小断层并不是杂乱无章的, 而是有规律的形成一定的组合关系, 通常表现为以下 4 种情况: 第 1 种情况是显性断层呈雁列式展布, 隐蔽性小断层难以识别, 沿其走向形成隐性断裂带; 第 2 种为显性断裂为雁列式展布, 隐蔽性小断层断续分布期间, 或者通过扩展、相互连接形成较易识别的显性断层, 切割雁列式断层, 隐蔽性小断层的走向指示隐性断裂带; 第 3 种断续断层型, 即不存在雁列式断裂带, 仅根据隐蔽性小断层识别; 第 4 种则表现为隐性断裂带两侧断层极性反转、走向改变, 而隐性断裂带本身断层不发育、不易识别, 而其深部对应位置通常存在一条规模较大的隐伏基底走滑断裂.

2.2 基底断裂体系及其活动性产生的隐性断裂带

基底断裂体系作为深部块体间的薄弱带, 它的活动性是盖层中形成隐性断裂带的重要原因之一. 从基底断裂性质、活动强度、走向、展布范围、数量 5 个方面来看, 基底断裂性质可以为张扭或者压扭, 既简单剪切产生的递进变形过程控制了隐性断裂带的形成演化, 其活动强度可以表现为早盛晚衰、渐盛转衰、稳定活动, 即晚期的活动性都比较弱, 此外纯剪切作用也可以形成隐性断裂带, 如形成于渤海湾盆地伸展构造系统的调节型隐性断裂带和斜向伸展形成的断续断层型隐性断裂带. 隐性断裂带走向通常与先存基底断裂平行或者小角度相交, 这取决于区域构造应力场中主应力(σ_1)方向与基底断裂走向二者之间的关系. 规模较大的基底断裂分段活动, 基底断裂垂向上活动强弱的迁移性决定了盖层中断裂不同演化期的“显性”或者“隐性”, 走向上活动强弱的迁移性(通常表现为两端活动强度较小, 构造活动强度向中段迁移)就可以导致断裂带表现为“时现时隐”这种构造变形组合特征. 活动较强的段落可能局部出露地表形成规模较大的控盆控凹断裂, 可以控制凹陷(潜山)侧列式展布, 活动较弱的段落潜藏在地下形成隐伏断裂, 具有重要的控震意义, 如密执安盆地 Scipio-Albion 构造带和圣安德列斯断裂带. 从

数量上来看, 二者并不是一一对应, 国外已经有实验证明(Bellahsen and Daniel, 2005; Hardy, 2013)一条基底断裂在伸展作用不仅会在下降盘形成隐性断裂趋势带, 在基底断裂控制的上升盘一侧同样会形成隐性断裂带. 从基底断裂演化过程来看, 很难存在一条基底断裂从中古生代演化至新生代都具有统一的断面, 在叠加扭应力场以后剖面结构会变得更加复杂(Morley, 1999)(如断裂在垂向上分叉、斜列、交织过渡), 这些分支断层在区域构造应力场作用下有些切穿盖层成为显性断裂, 有些则呈现一定的构造变形组合特征(断块群、强制褶皱、诱导裂缝带等)形成隐性断裂带, 因此, 通过基底断裂判识隐性断裂带务必结合盖层断裂组合特征、沉积相、相干体等方法.

2.3 潜山、凹陷(坳陷)分布反映的隐性断裂带

潜山、凹陷(坳陷)分布可以形成 3 种类型的隐性断裂带.

第 1 种为潜山的成山断层活动形成的隐性断裂带, 成山断层活动强度如果表现为“晚衰”或者“渐衰”, 同沉积下的潜山构造在浅层不会形成大规模的断裂构造, 仅能形成一些小褶皱、小断块呈线状排列. 这些不同走向(在渤海湾盆地主要为 NE、NW 向)的线性构造有些清晰可见, 有些似有似无、难以识别, 形成了隐性断裂带, 因此潜山构造的存在也可以作为推断盖层中隐性断裂带的证据之一.

第 2 种为潜山、凹陷(坳陷)不同构造单元伸展活动强度差异性形成调节型隐性断裂带, 这种类型的隐性断裂带在裂谷盆地和走滑拉分盆地中都极为常见.

第 3 种则是潜山或者凹陷呈侧列式展布识别的隐性断裂带, 如密执安盆地 Scipio-Albion 构造线形成的凹陷侧列型隐性断裂带(图 1), 黄骅坳陷南部孔店潜山构造带和乌马营潜山构造带呈侧列式展布.

2.4 沉积相、砂体分布可以反映隐性断裂带存在

隐性断裂带在盖层中表现为断裂破碎带(小断层、小褶皱、裂缝带), 隐性断裂带发育区则形成了特征性的古地貌, 这对于砂体成因类型和分布具有重要的影响.

影响凹陷湖盆沉积砂体类型的要素主要为物源供给速率, 其权衡指标可以涵括砂地比、粒度中值、岩性粗细以及稳定重矿物含量等. 物源供给速率较高时, 以发育三角洲为主, 较低时多为滩坝, 隐性断裂带对二者的影响存在一定的差异性. 在湖盆边缘物源供给相对充足三角洲、扇三角洲砂体伸展进入

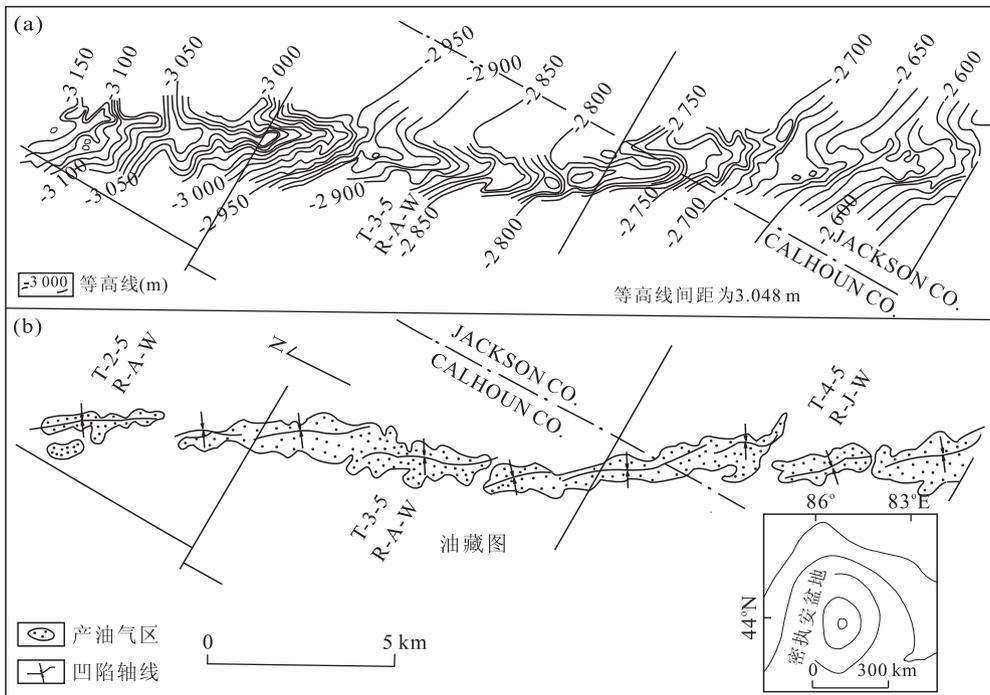


图 1 密执安盆地 Scipio-Albion 构造线凹陷侧列型隐性断裂带

Fig. 1 Michigan basin Scipio-Albion structure line sag side arranged type of potential fault zone

a. 从奥陶系 Trenton 组顶部等高线圈定的油田中北部构造图, 该组直接覆在产油层之上; b. 由构造等高线确定的凹陷轴线性样

湖盆广泛分布, 隐性断裂带表现在对其河道走向的控制作用, 如果在盆地内部没有查明相关的构造背景下所形成的隐性断裂带, 水系走向和沉积体系分布就会很让人费解. 准噶尔盆地腹部二叠纪“梁”(凸起)成了侏罗纪的古河道, 黄骅坳陷南高北低的沉积格局, 为何近东西向的物源水系进入湖盆后向南偏转, 这些现象并非是不符合沉积学原理, 是隐性断裂带的发育和分布局部的改造了古地貌. 在湖盆内部的浅湖区和深湖区物源供给速率较低并且显性断裂相对不发育, 滩坝砂体的发育主要受控于波浪作用和古地貌, 波能集中于古地貌较低幅度变化的地区, 起伏较大的地区(小褶皱和断块发育区)波高可能几倍于其他部位, 波浪能量增强, 粒度粗、分选好、厚度大的砂体就沉积下来形成优质储层沿着隐性断裂带呈线状展布, 这在沉积相角度也较为合理的解释了东营凹陷的北东向、北西向的油藏带. 隐性断裂带控制了古地貌, 影响了砂体分布, 那么砂体的分布必然也反映了隐性断裂带的存在, 如岐口凹陷北东向、北西向伸展入湖的三角洲, 东营凹陷沙四段的滩坝砂体都反映了隐性断裂带的存在.

2.5 已发现油藏分布反映的隐性断裂带

隐性断裂带上的油藏带通常表现为串状或者带状聚集. 串状油藏带通常是由一系列的雁列式断块

或者弧形断块或者复合断块(二者结合)排列构成(如渤海湾盆地东营凹陷、苏北盆地金湖凹陷, 图 2), 剖面上多表现为屋脊式或者多米诺式的断阶; 另外一种串状油藏带上断裂不发育, 油气呈线状聚集是由于基底断裂活动形成的隐性断裂带改善了砂体物性(如威利斯顿、鄂尔多斯盆地东部、四川盆地东部), 多形成一系列的低幅度, 油水分异度较差的非构造类或者复合类油气藏, 因此可以根据油藏排列、分布和走向来识别隐性断裂带.

2.6 地震水平切片识别隐性断裂带

通常由深到浅的地震相干体切片检测显示了基底断裂不同发育期的演化过程. 盖层深部的相干体切片应该反映一条延伸较远、断距较大、清晰的主断裂带; 向浅部过渡, 基底主断裂带逐渐模糊, 开始分段; 更浅的切片一般表现为雁列式小断层平行呈带沿着基底断裂走向分布. 相干体切片对于断层解释还不尽完美, 应用相干体切片识别隐性断裂带应该建立在对研究区隐性断裂带类型特征、成因机制的研究基础之上.

2.7 局部应力场变化形成的调节型隐性断裂带

调节型隐性断裂带产生于局部应力场的变化, 其形成可以是调节两条或者多条显性断层叠覆端的应力变化也可以是凹陷和隆起之间不同部位的伸展

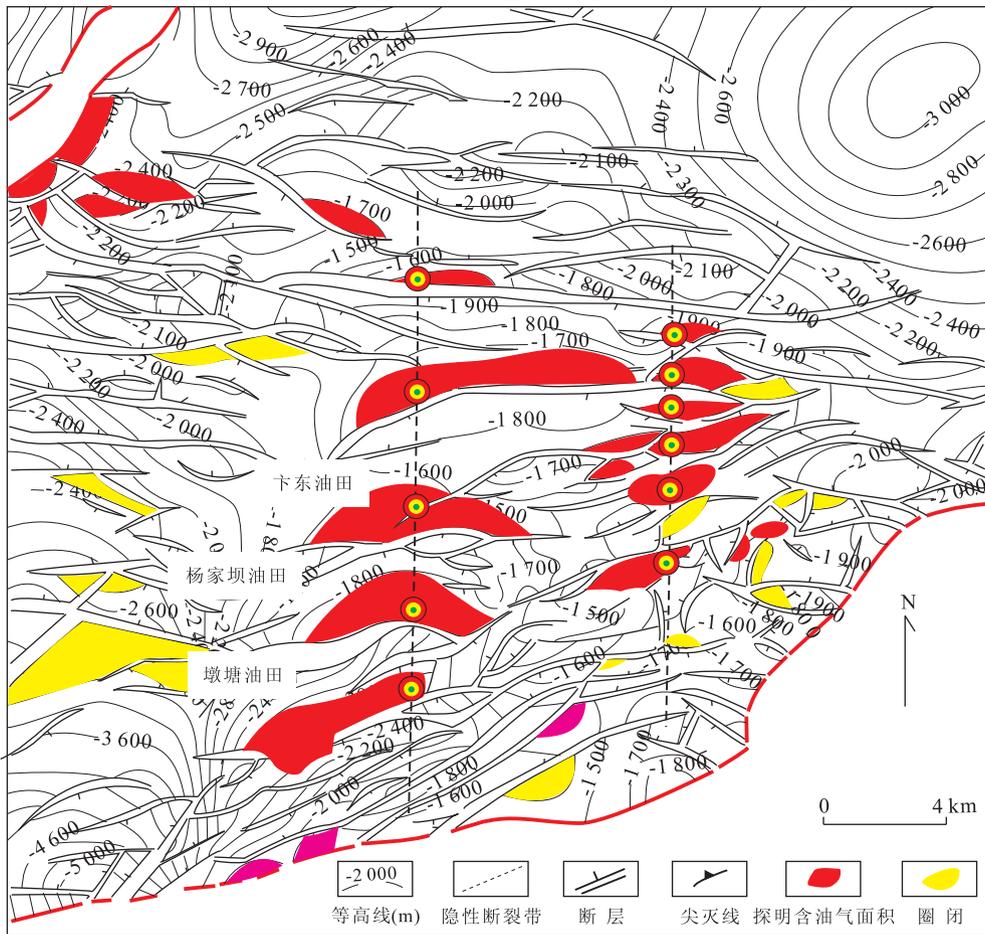


图 2 油藏分布反映的隐性断裂带

Fig. 2 Potential fault zones reflected by the distribution of reservoirs

活动强度或者是通过大断层分段活动来显现,前者虽然不具有重要的地质意义,但是对于形成于转换斜坡的圈闭具有重要的影响,比如圈闭的类型、闭合度等,后者对盆地的构造格局的形成演化具有重要的意义。

3 隐性断裂带的类型及特征

通过对国内外的大量沉积盆地研究表明,隐性断裂带具有共同的一些特征:①雁列式断裂带与其间断续连的小断层构成一条不存在主破裂面的断裂趋势带;②断续分布的小断层沿着一定走向分布,它们往往沿着一个或几个方向断断续续、时隐时现、似有似无成带分布;③盆地内部形成首尾相连、窄长的凹陷或者潜山,并且呈侧列式展布,油藏沿其走向呈线状排列;④断陷湖盆边缘广泛分布入湖三角洲、三角洲水系长轴具有优势伸展方向,分支河道携带碎屑沉积物多沿着该方向呈带状展布,滩坝砂体多

沿着上述断裂趋势带展布。按照隐性断裂带规模、力学性质、成因地质背景、组成成分、走向、趋势带宽、演化程度、平面特征、地质意义等可以划分为多种类型(表 1)。

本文以渤海湾盆地为例,按照规模大小分别举例阐述隐性断裂带的类型特征。

3.1 盆地级别隐性断裂带

盆地级隐性断裂带既可以为雁列式断层切割形成的破碎带也可以是小褶皱、小断块定向排列组合形成的地质体变形区,其构造发育特征与断裂组合特征与先存基底断裂和与其软连接或者硬连接的主构造关系密切。

渤海湾盆地西部黄骅—德州—东明断裂与太行山断裂之间形成多条隐性断裂带,通过大断层的分段活动、凹陷隆起的分布以及盖层断裂组合特征,至少可以识别出 4 条北西向的隐性断裂带(图 3)。徐水—安新隐性断裂带穿过霸县凹陷与饶阳凹陷,由黑龙江口断层、牛南断层、苏 23 井南断层等雁行排

表 1 隐性断裂带分类

Table 1 The classification of potential fault zones

规模大小	盆地级	坳陷级	凹陷级	洼陷级	圈闭级
力学性质	拉张型	挤压型	走滑型	张扭型	压扭型
成因地质背景	裂谷盆地	前陆盆地	走滑拉分盆地	克拉通盆地	叠合型盆地
组成成分	雁列构造型	凹陷侧列型	断续断层型	油藏串珠型	复杂构造型
按走向	北东向	北西向	南北向	东西向	弧形
趋势带宽度	超宽趋势带(>100 km)	宽趋势带(50~100 km)	中带(10~50 km)	窄带(1~10 km)	线状带(<1 km)
按演化程度	早期弱雁列式	早中期强雁列式	中期断续状	中后期串状	后期显性断裂
平面特征	隐伏型	转换型	不连续型	准成熟型	复合型
地质意义	调节型	控凹型	控相型	控藏型	控震型

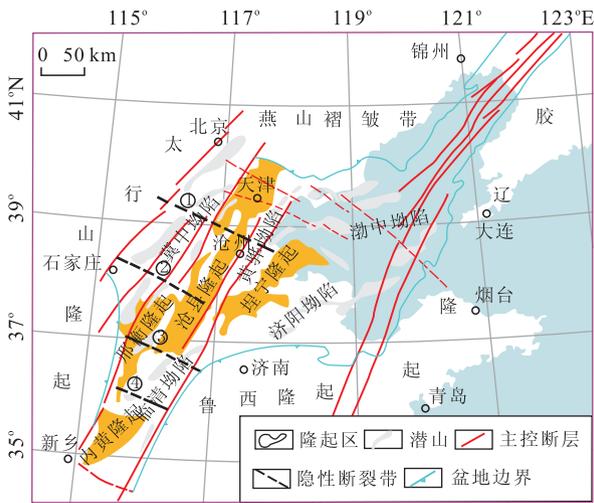


图 3 渤海湾盆地调节型隐性断裂带

Fig. 3 Transformation type of potential fault zones in Bohai Bay basin

①徐水—安新隐性断裂带；②衡水隐性断裂带；③夏津—腰站隐性断裂带；④回隆镇—马陵隐性断裂带

列的断层组成,同时表现为大小不等、形态各异的构造断块、洼槽及凸起等呈线状展布,NW 向的调节型隐性断裂带与 NE 向潜山侧列型隐性断裂带穿插复合,控制了水系通道的形成和沉积体系的展布. 回隆镇—马陵隐性断裂带沿大名、马陵和范县一线展布,该隐性断裂带位于构造高部位,同时表现为南北两侧正断层的断距在此处减小和终止的结合部. 夏津—腰站隐性断裂带表现为左行扭动的宽缓断裂破碎带,其两侧也发育一些雁列式、侧列式展布的小断层,剖面上呈花状构造. 衡水隐性断裂带西段位于太行山东缘断裂错位的部分(劳海港等,2012),其两侧的岩性和古构造明显不同(杨明慧,2009),西段的无极低凸起通过自身强烈变形实现其对太行山东缘断裂南部及中部不同时期应变进行调节(杨旭升等,2004),中东段为旧城北断裂、衡水断裂等局部显性构造断续相连,其中衡

水断层分段活动明显,尤其是沙三段后期,由于虎北断裂上升盘抬升致使东段以后不再活动,而西段继续活动,基岩断距向东逐渐较小,逐渐表现为一些次级断层形成的西翘东倾的小块体组合形成的隐性断裂带.

3.2 坳陷级隐性断裂带

根据深部基底断裂、两侧构造变换特征、走向的断层组合特征,我们可以识别出多条北西向隐性断裂带(图 4a). 它们表现为平行大致呈等间距分布将黄骅坳陷西北部分割成凹、凸相间的构造格局. 其中 1 号隐性断裂带位于海河地区,沧东断层走向改变,北侧是羽状发散区,南侧则是翘倾断块区;2 号隐性断裂带表现为觉道庄、齐家务、羊三木、扣村—黄骅等正向构造呈北西向侧列式展布,北侧的北大港、南大港等断层以及南侧的孔西、孔东等断层延伸至该带附近都发生急剧转向而消失;3 号隐性断裂带发育于小站横向鼻状构造带上,在北次凹与南次凹之间发育断断续续小断层;4 号隐性断裂带起自沧东断裂锯齿追踪的近东西向段落,表现为隐伏的横向构造将港西凸起和港东低凸起错开;5 号隐性断裂带是由一些雁列式小断层组成,东西两侧断层倾向相反;6 号隐性断裂带北侧是掀斜断块区,主体构造走向北东向,南侧是斜坡区,主体构造走向近东西向,除此之外,其两侧的地层产状、断层走向和构造展布特点也不尽相同.

根据坳陷内部正向构造单元的分布以及整体构造格局可以识别出一条北东向隐性断裂带(图 4b). 该隐性断裂带表现为孔店潜山构造带、小集断裂构造带、乌马营潜山构造带以及东光鼻状构造带呈侧列式展布. 三维地震解释成果显示,潜山构造的形态为由北向南倾伏,且潜山的宽度由北向南逐渐变窄收敛,新生代发育的断裂在潜山北部不发育,活动性较弱,对潜山的结构和分布影响较小,在南部数量增多,走向 NNE 为主且延伸较远,呈侧列式展布,表

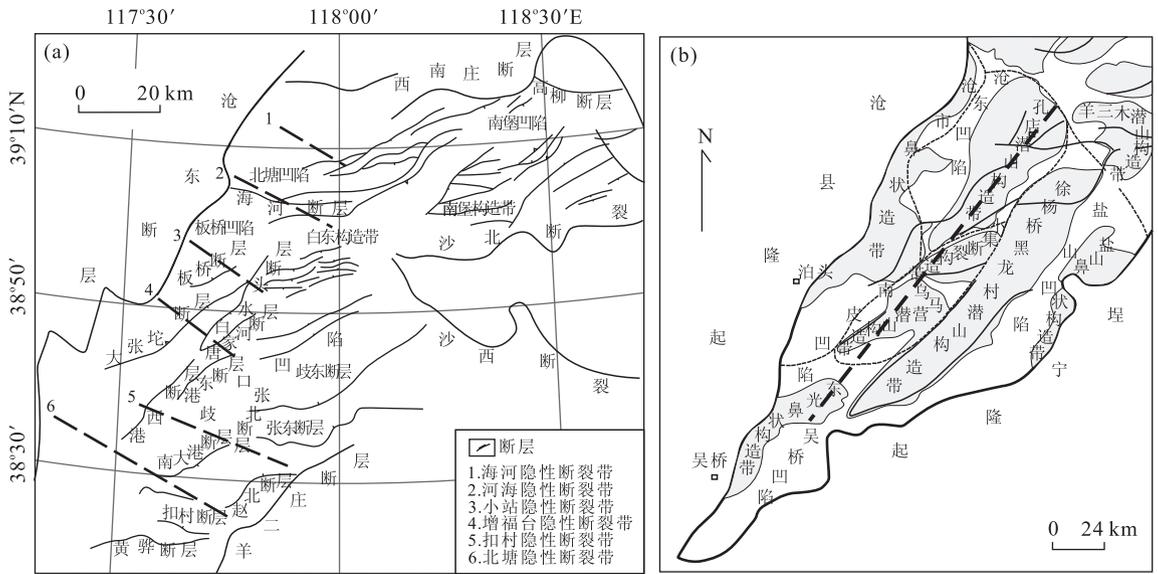


图 4 黄骅坳陷隐性断裂带

Fig. 4 The potential fault zones in Huanghua depression

a. 调节型隐性断裂带; b. 潜山侧列型隐性断裂带

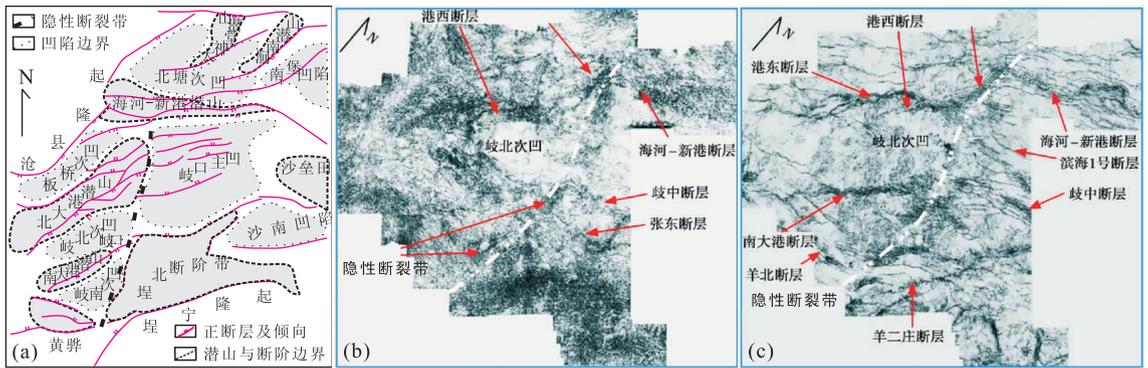


图 5 歧口凹陷转换型隐性断裂带(据王家豪等,2010 略改)

Fig. 5 Transformation type of potential fault zones in Qikou sag

a. 歧口凹陷构造; b. 3 320 ms 相干体切片; c. 1 320 ms 相干体切片

现出一定的构造迁移性. 整体表现为直扭, 每个构成段落表现为西南端收敛、北东向发散的帚状构造, 是一个“复合型扭动构造体系”.

3.3 凹陷级隐性断裂带(歧口凹陷)

3.3.1 歧口凹陷调节转换型隐性断裂带 通过断裂组合特征和地震相干体分析在歧口凹陷西侧识别出一条凹陷级别的隐性断裂带(图 5a), 隐性断裂带上并没有形成断续分布的小断层或者雁列式断裂带, 但隐性断裂带两侧具有以下特点: 两侧断层倾向相反, 走向突变(西侧北北东, 东侧近东西向); 两侧断层叠覆量较小, 沿着隐性断裂带走向发育一系列的中低幅度凸起(4~8 km); 两侧的潜山、凹陷存在着不协调的对接关系, 并且呈雁列式错位分布于隐

性断裂带两侧(如歧口主凹对应北大港潜山的位置, 歧南次凹对应埕北断阶带), 西部表现为板桥次凹—北大港潜山—歧北次凹—南大港潜山—歧南次凹构成的隆—凹相间格局, 东侧的歧口凹陷表现为地堑式的结构; 断层数量上西少东多, 相干体切片显示深部存在一条呈北北东向展布的“S”形走滑断层(图 5b), 表现为相关系数很低的暗色条带, 浅部相干体切片反映暗色条带呈线状断断续续分布(图 5c), 依稀可以识别, 但对两侧断裂带发育和盆地结构的调节转换作用一直存在.

前人研究表明(李明刚等,2009), 中国东部 3 条北北东向大型走滑断裂带之一的黄骅—聊城—兰考断裂带(或称为黄骅—德州—东明走滑构造带)的北

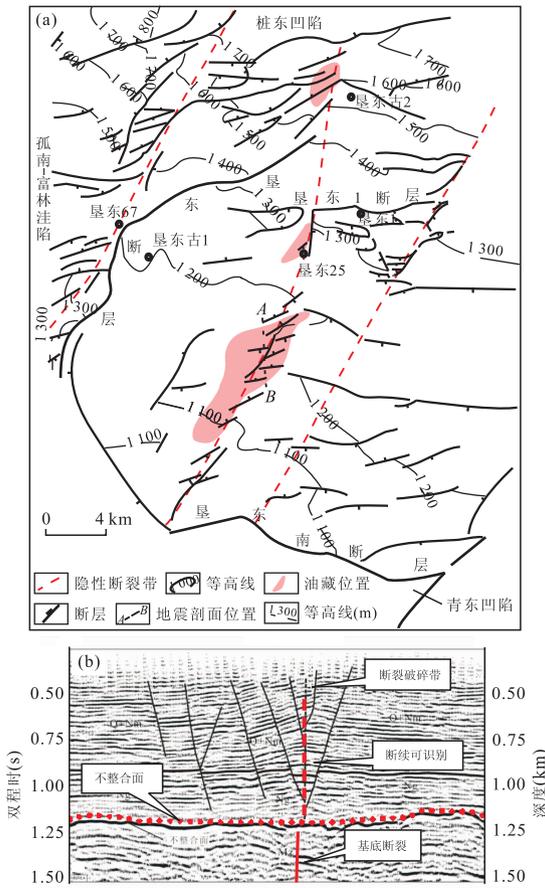


图 6 垦东凸起复杂构造型隐性断裂带

Fig. 6 Complicated structure type of potential fault zone in Kendong Uplift

a. 复杂构造型隐性断裂带平面特征(渤海湾盆地东部 T1 构造);
b. 复杂构造型隐性断裂带剖面特征(剖面位置如 a 黑色虚线所示)

延段穿越研究区,其主干走滑断层隐伏于基底,与本文识别的隐性断裂带的位置一致。

3.3.2 垦东凸起复杂构造型隐性断裂带 该断裂带是指沿着走向以不同的构造变形类型而显现隐性断裂带存在. 渤海湾盆地济阳坳陷垦东凸起存在一条浅层断续分布的小断层带(图 6a). 这条隐性断裂带位于垦东南断层的转折端,将垦东凸起分成东西两个部分,隐性断裂西侧断层走向近北东,东侧断层走向近东西向. 隐性断裂带整体为北北东走向,分为南、中、北 3 段,南段走向北北东,由一系列近北东向北倾或南倾的张性小断层形成雁列式断层带;中段走向北北东,表现为一系列北东向小断层彼此平行,呈雁列式分布,并有北北东向断层断续相连;北段走向近北北东向,表现为较大规模的北东向断层雁列式展布. 隐性断裂带中段剖面上自下而上主要表现为单根插入基底的深大断裂、沿主断裂撒开的花状构造、沿花状构造外延扩散的断裂破碎带 3 个部分(图 6b),深部具有清晰的同相轴错段,浅部地震振幅弱、频率高、连续性差. 隐性断裂带上形成了古 2、孤南 25、孤南 29、孤南 451、孤南 32 等断块油藏构成的北北东向的油藏带。

3.4 洼陷级隐性断裂带

王家岗构造带主要由一系列近东西向和北东向展布的正断层构成(图 7a, 7b),近东西向断层分布在主构造带上,主要为北倾,北东向断层主要分布在构造带侧翼,主要为南东倾. 根据生烃洼陷位置及断层倾向配置关系,北倾和北西倾断层为顺向断层. 近东西向断层呈弧形弯曲的特征,其间断续分布北东向小断层与弧形断层指向北东的段落构成隐性断裂带,整体呈雁列式展布,断鼻圈闭成串珠状分布在隐性断裂带上。

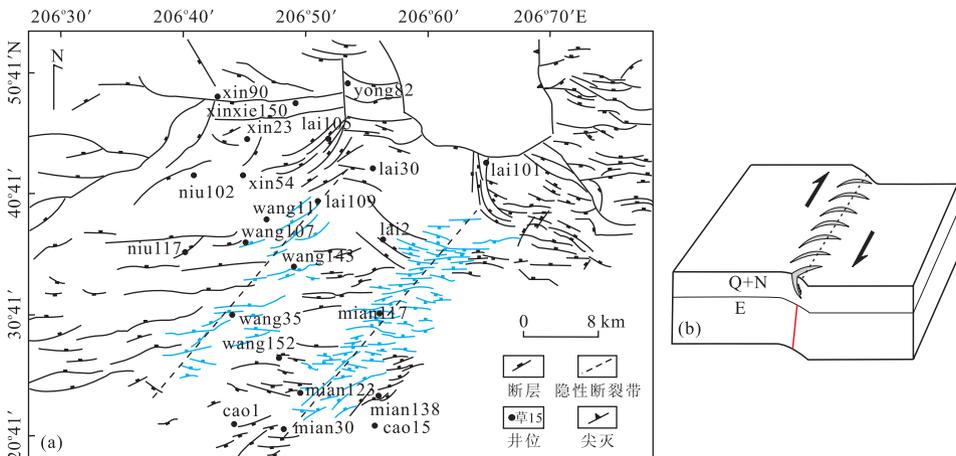


图 7 青南洼陷雁列构造型隐性断裂带

Fig. 7 En-echelon structure type of potential fault zone in Qingnan Subsag

a. 青南洼陷沙三段构造; b. 雁列构造型隐性断裂带模式

八面河地区具有明显的张性走滑构造特征,北东向基底断裂与左行斜列式盖层正断层及北西向挤压构造等其他伴生构造形成了隐性断裂带,隐性断裂带上形成了北东向、近东西向的断裂体系,近东西向断裂雁列式展布,北东向小断层断续分布其间,构成连接或者切割等组合关系将八面河鼻状构造切割成大小不同的断块. 隐性断裂带上形成了众多的反向屋脊断鼻,形成串状油气聚集带.

3.5 圈闭级隐性断裂带

圈闭级隐性断裂带多形成于同向倾斜型调节带的转换斜坡或者相向而倾调节带背斜顶部,仅仅影响圈闭闭合度和形成演化,地质意义有限,在此不再赘述.

4 隐性断裂带的地质意义

4.1 调节构造变形幅度、控制盆地格局

渤海湾盆地沿北西向不均匀伸展作用形成了多条北西向大致等间距分布的调节带. 这些横向调节带是由 2 条断层叠覆或大断层分段活动显现的,这

些断层断续分布,若隐若现,即所谓的隐性断裂带. 这些隐性断裂带平行展布,大致将渤海湾盆地南部分隔为 5 个部分,成为东濮凹陷、临清拗陷、黄骅拗陷等构造单元的分界控凹断裂. 隐性断裂带两侧的伸展强度,断裂活动方式、构造形态等方面都具有较大差异. 这种调节型隐性断裂带若形成于凹陷,通常作为次级构造单元的分界. 如苏北盆地的金湖凹陷的东部深凹带,北西向的隐性断裂带平行等间距展布将范水次凹、卞闵杨次凸、龙岗次凹等次级构造单元分隔开来.

4.2 控制沉积相形成展布

隐性断裂带控制了大量的雁列式、断续状小断层带的形成和分布,二者形成切割、连接等组合关系,剖面上表现为断阶、地堑等小构造形成断裂破碎带,河道冲刷下切就极易取其走向,富集了大量的河道砂体. 因此,沿其走向物源水系十分发育,控相作用显著.

歧口凹陷沙三段扇三角洲伸展进入湖盆(图 8),物源主要来自东北部的燕山隆起和西部的沧县隆起,在沧县隆起短轴方向伸展入湖的三角洲,在湖

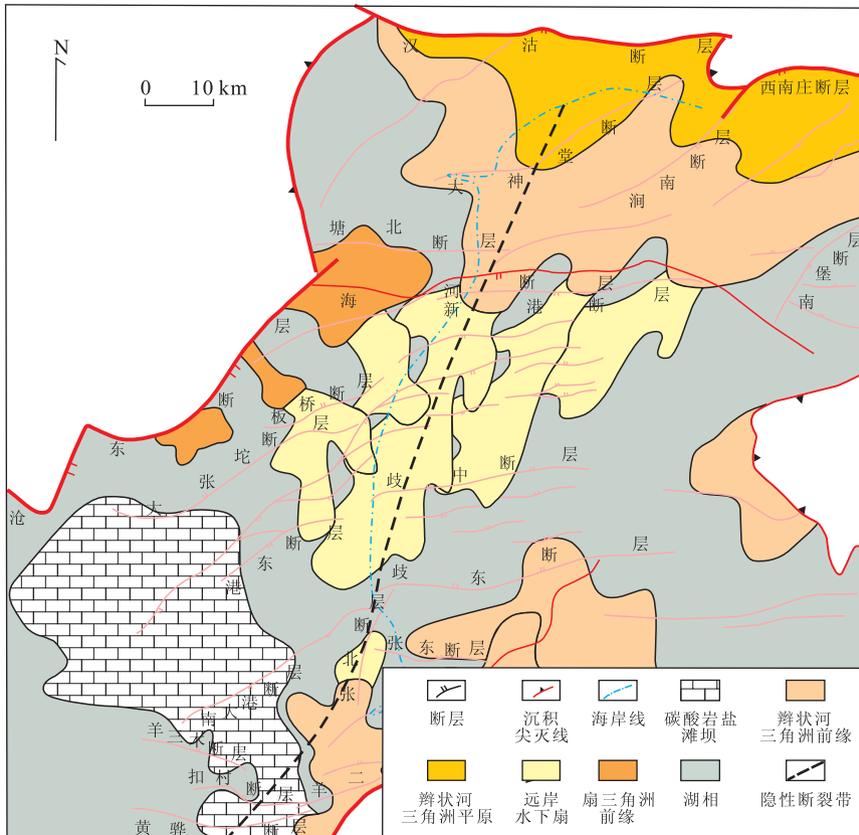


图 8 歧口凹陷隐性断裂带对沉积体系展布的控制(据吴永平等,2010 略改)

Fig. 8 The control of potential fault zone in the distribution of depositional system in Qikou Depression

盆深处形成了远岸水下扇沉积体系, 深湖相显性断裂不发育, 但扇体的河道走向多由早期的近东西向偏转至北西向, 但实际情况是按其南高北低的沉积古地形应该向北东偏, 这似乎与沉积学原理不符, 正是北西向的调节型隐性断裂带局部的影响了古地形, 形成断裂破碎带, 改变了物源水系的走向, 物源水系携带大量的砂体沿着局部改变的古地貌沉积下来. 而燕山隆起和埕宁隆起物源区伸展入湖的扇体, 也主要沿着北北东向生长, 这与歧口凹陷隐性断裂带分布相吻合. 因此, 隐性断裂带形成区也是优质储层发育区.

4.3 控制隐蔽性圈闭分布

隐性断裂带上主要形成了 4 类隐蔽性圈闭. 第 1 类是基底断裂活动在盖层中形成的断续分布的 NNE 向小断层, 它们被限制在近 NE 向显性断层之间组合构成的交叉型隐性断块圈闭, 如歧 55、85 断块. 第 2 类是 NE 向与 NNE 向隐性断层联合形成弧形隐性断块圈闭, 如歧南 9x1 断块. 需要指出的是, 尽管上述 2 种圈闭具有隐性断裂带控制的构造背景, 但圈闭成因应该受岩性和构造双重控制. 例如歧南 9x1 井钻探揭示该井沙三段油藏高度达 120 m, 其上倾方向的断层断距仅为 30~40 m, 很难封堵如此高的油气藏, 故推测还受岩性的控制. 第 3 类则是砂岩差异压实或者构造活动强度较低的情况下形成的微构造圈闭, 该类圈闭幅度低, 含油高度一般较小, 如隐性断裂带上的港深 33 断块. 第 4 类两种走向的断层都不发育, 仅形成一些低幅度坡折带控制的岩性上倾尖灭圈闭, 如歧 26 井, 这是隐性断裂带对古地貌改造而形成的一种隐蔽性圈闭.

4.4 改善储集层物性, 控制输导体系形成

隐性断裂带从 2 个方面控制输导性. 首先, 隐性断裂带小幅度活动可以产生裂缝也可以抵抗深埋压实作用对储层物性的破坏, 可以大大改善储层的物性; 其次, 基底断裂活动, 沿着隐性断裂带形成雁列式排列的潜山构造高带, 切入深部汲烃的基底断裂与浅部受隐性断裂带控制的次级小断层以及隐性断裂带活动所改造的裂缝发育带与古地貌匹配构成立体的输导脊, 隐性断裂带上多个时期油气聚集于此, 形成复式油气聚集带. 歧口凹陷隐性断裂带上自古近系至新近系的明化镇组都形成了多种类型的油气藏.

4.5 控制油藏形成与分布

东营凹陷是济阳拗陷南部的古近和新近系富油气凹陷, 是渤海湾裂谷系内典型的开阔型箕状凹陷.

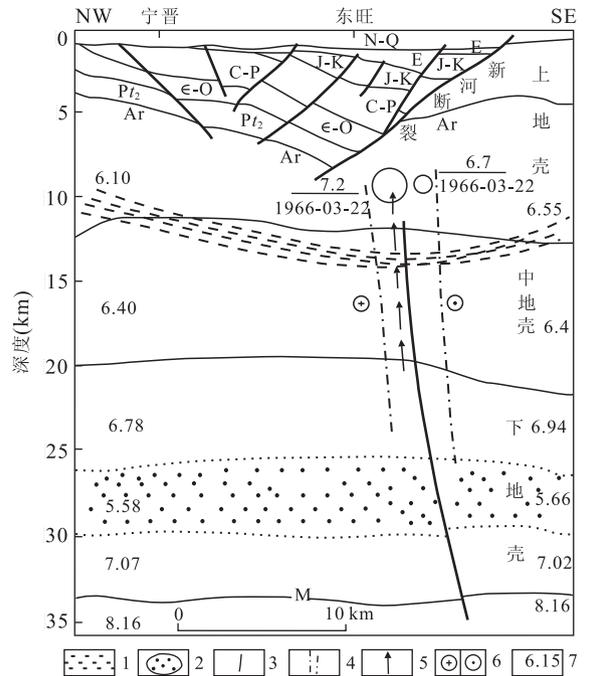


图 9 邢台地震区地壳结构构造剖面(据刘保金等, 2011)

Fig. 9 The cross section of crustal structure in earthquake area of Xingtai

1. 保定—石家庄断裂的拆离面; 2. 壳内低速层; 3. 高角度深断裂; 4. 主要震源破裂带; 5. 震源破裂扩展方向; 6. 右旋平移; 7. P 波速度 (km/s)

通过叠合多个时期的勘探成果, 凹陷明显存在着北东、北西、南北向 3 组油藏带(图 9). 北东向的油藏带一共有 5 条, 它们分别是滨南—平方王油藏带、胜坨—一大芦湖油藏带、永安镇—东辛—梁家楼油藏带、广利—王家岗—乐安油藏带以及八面河油藏带. 北西向的油藏带一共有 3 条: 胜坨—东辛—广利油藏带、滨南—王家岗油藏带、林樊家—平方王—纯化—乐安油藏带, 以及南北向的平方王—正理庄—金家油藏带. 东营凹陷满凹含油, 但几乎全部油藏都分布在隐性断裂带上, 多个时期形成的多套含油气系统叠合连片分布在隐性断裂带交叉的部位, 而隐性断裂带外围和之间几乎没有油藏分布, 整个济阳拗陷也存在这种北东向、北西向的油藏带. 因此, 隐性断裂带上油藏稀少和未发现油藏分布的段落是勘探需要重点查明的地区. 除此之外, 东营凹陷古近系不同时期的油气分布还具有自东南向西北的迁移性, 构造活动强度的迁移性也与之匹配, 据此推测东营凹陷的油气分布受断裂的“显性”和“隐性”活动的联合控制, 具体控制作用以及油气的迁移过程还有待于深入研究.

4.6 隐性断裂带对地震的指示意义

震源构造和多种深部构造探测研究结果显示,

部分基底断裂可能终止于上地壳的拆离面,中下地壳可能还存在着高角度深断裂(刘保金等,2011),高角度深断裂可以与上地壳基底断裂会而未交,存在一个闭锁的空间(震源破裂带)(图 9),震源破裂带触动上地壳的基底断裂,高角度的深断裂成为发震构造,1966 年邢台发生的 7.2 级地震就是个很好的例子。当然也可以上下贯通,在浅部盖层发育完整的花状构造或者 Y 字形构造,同样发震构造也是高角度深断裂,这种发震机制近期已经有学者通过 1976 年唐山 7.8 级地震这个例子给出了很好的解释(刘保金等,2011),那么形成于盖层中的隐性断裂带与它们具有怎样的联系呢?

深部流体活动或者板块运动会导致基底断裂活化产生断裂或者发生地震,能量在深部积累向浅部传递的过程中必然会衰减。一种情况是板块运动和深部地幔流体作用足够剧烈,向上切穿盖层形成岩石圈级别的活动断裂带,如郯庐断裂和张家口—蓬莱断裂,都是地震易发区和频发区(徐杰等,2012);另一种情况则是基底断裂活动强度不足以切穿上部盖层,盖层中对应的位置扭动、撕裂作用形成隐性断裂带,高角度深断裂的震源垂直投影在盖层中的位置多位于隐性断裂带上或者附近,尤其是交汇处。详细对比渤海湾盆地地震中分布图可以发现,除了两大活动断裂带密集分布以外,在张家口以南的盆地级隐性断裂带上,也偶有震中分布,因此隐性断裂带对于地震预测的意义应该引起重视。

5 结论

(1)隐性断裂带是区域或局部应力场、基底断裂体系活动、潜山块体扭动影响下在沉积盆地盖层中产生的断裂趋势带,它是断裂带的一种类型,与显性断裂伴生于沉积盆地,它们形成规模大至盆地,小至圈闭,普遍的存在于沉积盆地中,具有控相、控藏、控震等多方面的地质意义。

(2)小型显性构造(小断层、小褶皱、断块)呈雁列式、断续状、错位对称式分布,潜山、凹陷分布、砂体分布、油藏排列、分布、走向等是隐性断裂带赋存于沉积盖层中较为重要和直观的认识依据;通过分析基底断裂体系及其活动性,以及断层叠覆端、末端、深大断裂分段活动所引起局部应力场变化,可以有效识别隐性断裂带,但需要结合前述多种构造变形组合特征以及相干体切片技术去综合判识,这样识别出的隐性断裂带具有较高的可信度,并且具有

现实意义。

(3)根据规模大小可以将所识别的隐性断裂带划分为盆地级、坳陷级、凹陷级、洼陷级和圈闭级隐性断裂带。规模较大者调节构造变形幅度,控制了盆地格局以及沉积相带的分布,规模较小者控制隐蔽圈闭呈带分布,改造了储集层物性,并且控制了输导体系的形成,隐性断裂带上及其交汇处是油气藏富集区。

(4)隐性断裂带是深部基底断裂的活动的响应,基底断裂活化可能触发地震,隐性断裂带的研究对地震危险性预测也具有重要的参考价值。

References

- Bellahsen, N., Daniel, J. M., 2005. Fault Reactivation Control on Normal Fault Growth: An Experimental Study. *Journal of Structural Geology*, 27(4): 769—780. doi: 10.1016/j.jsg.2004.12.003
- Crook, A. J. L., Willson, S. M., Yu, J. G., et al., 2006. Predictive Modelling of Structure Evolution in Sandbox Experiments. *Journal of Structural Geology*, 28(5): 729—744. doi:10.1016/j.jsg.2006.02.002
- Hardy, S., 2011. Cover Deformation above Steep, Basement Normal Faults: Insights from 2D Discrete Element Modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 28(5): 966—972. doi:10.1016/j.marpetgeo.2010.11.005
- Hardy, S., 2013. Propagation of Blind Normal Faults to the Surface in Basaltic Sequences: Insights from 2D Discrete Element Modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 48: 149—159. doi:10.1016/j.marpetgeo.2013.08.012
- Hu, S. Y., Yu, Y. J., Dong, D. Z., et al., 2006. Control of Fault Activity on Hydrocarbon Accumulation in Central Junggar Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 27(1): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Jackson, C. A. L., Rotevatn, A., 2013. 3D Seismic Analysis of the Structure and Evolution of a Salt-Influenced Normal Fault Zone: A Test of Competing Fault Growth Models. *Journal of Structural Geology*, 54: 215—234. doi:10.1016/j.jsg.2013.06.012
- Lao, H. G., Wu, K. Y., Chen, Q. H., et al., 2012. Evolution Characteristics of Maozhou Transition Zone and Its Control Function of Reservoirs Forming in Jizhong Depression. *Journal of China University of Petroleum*, 36(5): 12—19 (in Chinese with English abstract).
- Li, M. G., Qi, J. F., Yang, Q., et al., 2009. Cenozoic Structure Features of Huanghua Depression and Its Structure Dynamics Model. *Acta Geoscientica Sinica*, 30(2): 201—209 (in Chinese with English abstract).

- Li, S. Z., Suo, Y. H., Zhou, L. H., et al., 2011. Pull-Apart Basin within the North China Craton; Structural Pattern and Evolution of Huanghua Depression in Bay Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 41(5): 1362–1378 (in Chinese with English abstract).
- Liu, B. J., Qu, G. S., Sun, M. X., et al., 2011. Crustal Structure and Tectonics of the Tangshan Earthquake Area: Results from Deep Seismic Reflection Profiling Results. *Seismology and Geology*, 33(4): 901–912 (in Chinese with English abstract).
- Mitra, S., Miller, J. F., 2013. Strain Variation with Progressive Deformation in Basement-Involved Trishear Structures. *Journal of Structural Geology*, 53: 70–79. doi: 10.1016/j.jsg.2013.05.007
- Morley, C. K., 1999. How Successful Are Analogue Models in Addressing the Influence of Pre-Existing Fabrics on Rift Structure? *Journal of Structural Geology*, 21(8–9): 1267–1274. doi: 10.1016/S0191-8141(99)00075-9
- Qi, J. F., 2004. Two Tectonic Systems in the Cenozoic Bohai Bay Basin and Their Genetic Interpretation. *Geology in China*, 31(1): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J. H., Wang, H., Ren, J. Y., et al., 2010. A Great Oblique Transition Zone in the Central Huanghua Depression and Its Significance for Petroleum Exploration. *Acta Petrolei Sinica*, 31(3): 355–360 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Z. C., Zhao, W. Z., Men, X. Y., et al., 2005. Control of Basement Fault Minor-Activity on Gas Pool Formation of Upper Paleozoic, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 32(1): 9–13 (in Chinese with English abstract).
- Wu, Y. P., Yang, C. Y., Wang, H., et al., 2010. Integrated Study of Tectonics-Sequence Stratigraphy-Sedimentology in the Qikou Sag and Its Application. *Geotectonica et Metallogenia*, 34(4): 451–460 (in Chinese with English abstract).
- Xu, J., Zhou, B. G., Ji, F. J., et al., 2012. Features of Seismogenic Structures of Great Earthquakes in the Bohai Bay Basin Area, North China. *Seismology and Geology*, 34(4): 618–636 (in Chinese with English abstract).
- Yang, M. H., 2009. Transfer Structure and Its Relation to Hydrocarbon Exploration in Bohai Bay Basin. *Acta Petrolei Sinica*, 30(6): 816–823 (in Chinese with English abstract).
- Yang, X. S., Liu, C. Y., Yang, B. Y., et al., 2004. Characteristics and Evolution of Hengshui Transfer Fault Zones in Jizhong Depression. *Coal Geology & Exploration*, 32(3): 5–8 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, W. Z., Hu, S. Y., Wang, Z. C., et al., 2003. Key Role of Basement Fault Control on Oil Accumulation of Yangchang Formation, Upper Triassic, Ordos Basin. *Petroleum Exploration and Development*, 30(5): 1–5 (in Chinese with English abstract).

附中中文参考文献

- 胡素云, 蔚远江, 董大忠, 等, 2006. 准噶尔盆地腹部断裂活动对油气聚集的控制作用. *石油学报*, 27(1): 1–7.
- 劳海港, 吴孔友, 陈清华, 等, 2012. 冀中坳陷郑州变换带演化特征及控藏作用. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 36(5): 12–19.
- 李明刚, 漆家福, 杨桥, 等, 2009. 渤海湾盆地黄骅坳陷新生代结构特征及构造动力学模式. *地球学报*, 30(2): 201–209.
- 李三忠, 索艳慧, 周立宏, 等, 2011. 华北克拉通内部的拉分盆地: 渤海湾盆地黄骅坳陷结构构造与演化. *吉林大学学报(地球科学版)*, 41(5): 1362–1378.
- 刘保金, 曲国胜, 孙铭心, 等, 2011. 唐山地震区地壳结构和构造: 深地震反射剖面结果. *地震地质*, 33(4): 901–912.
- 漆家福, 2004. 渤海湾盆地新生代盆地的两种构造系统及其成因解释. *中国地质*, 31(1): 15–22.
- 王家豪, 王华, 任建业, 等, 2009. 黄骅坳陷中区大型斜向变换带及其油气勘探意义. *石油学报*, 31(3): 355–360.
- 汪泽成, 赵文智, 门相勇, 等, 2005. 基底断裂“隐性活动”对鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏的作用. *石油勘探与开发*, 32(1): 9–13.
- 吴永平, 杨池银, 王华, 等, 2010. 歧口凹陷构造—层序—沉积一体化研究及其应用. *大地构造与成矿学*, 34(4): 451–460.
- 徐杰, 周本刚, 计凤桔, 等, 2012. 华北渤海湾盆地地区大震发震构造的基本特征. *地震地质*, 34(4): 618–636.
- 杨明慧, 2009. 渤海湾盆地变换构造特征及其成藏意义. *石油学报*, 30(6): 816–823.
- 杨旭升, 刘池阳, 杨斌谊, 等, 2004. 冀中坳陷衡水转换断裂带特征及演化. *煤田地质与勘探*, 32(3): 5–8.
- 赵文智, 胡素云, 汪泽成, 等, 2003. 鄂尔多斯盆地基底断裂在上三叠统延长组石油聚集中的控制作用. *石油勘探与开发*, 30(5): 1–5.