

南黄海北部盆地晚白垩世以来构造变形与盆地成因

高顺莉^{1,2}, 徐曦¹, 周祖翼¹

(1. 同济大学海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 中海石油(中国)有限公司上海分公司, 上海 200030)

摘要:南黄海盆地是中国近海的主要含油气盆地之一, 油气勘探多年但成效不大。盆地结构不清、断裂体系多样与构造演化复杂的因素致使勘探潜力不明。为探讨南黄海北部盆地晚白垩世以来的构造变形特征与断陷盆地形成机理, 通过近年最新二维地震资料解释及钻井等地质记录, 结合相关地质背景和前人研究成果, 对北部盆地的断裂特征和盆地结构开展综合研究, 形成北部盆地晚白垩世以来不同时期断裂发育模式和地层沉积充填特征的认识。通过研究认为, 中生界-古生界海相地层在印支期遭受挤压变形而形成逆冲断裂, 该断裂系构成晚白垩世以来盆地的重要基底断裂系。在后期伸展应力状态下, 基底断裂复活, 控制着盆地内断层的活动范围和活动方式, 同时控制着晚白垩世以来的地层沉积格局和构造样式, 形成以伸展构造变形为主的多凹组成的断陷群, 反映出“深层约束浅层”的关系。

关键词:构造变形; 基底断裂; 断陷; 盆地成因; 南黄海

中图分类号:TE122.1

文献标识码:A

Structural deformation and genesis of the northern sub-basin in South Yellow Sea since Late Cretaceous

Gao Shunli^{1,2}, Xu Xi¹, Zhou Zuyi¹

(1. School of Ocean and Earth Sciences, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. CNOOC China Limited-Shanghai, Shanghai 200030, China)

Abstract: South Yellow Sea Basin is one of the major petroliferous basins offshore China. It has been explored for years but with no significant commercial discovery due to a lack of understanding of its structure, diversified fault systems and complicated tectonic evolution. To evaluate the exploration potential and gain insight into faulting activities and sedimentation of the basin, we performed characterization of the tectonic deformation and formation mechanism analyses of the northern sub-basin in South Yellow Sea Basin since the Late Cretaceous based on a combination of the latest two-dimension seismic data with relevant geologic setting, drilling data and previous research papers. It shows that thrust faults were formed in the marine strata due to the compression and deformation the Indo-China period, and the fault system served as the basement faulting system since the Late Jurassic. It was later reactivated by extension and controlled the activities of faults within the basin as well as the sedimentary framework. A faulted depression cluster that was dominated by extensional structural deformation formed, reflecting a relationship of shallower strata being constrained by the deeper ones.

Key words: tectonic deformation, basement fault, fault depression, basin genesis, South Yellow Sea

南黄海北部盆地是发育于苏鲁造山带南侧的晚白垩世-古近纪断拗盆地, 是中国近海的主要含油气盆地之一, 油气勘探多年但成效不大。究其原因, 盆地结构不清, 断裂体系多样, 构造演化复杂, 致使勘探潜力不明。

由于其特殊的大地构造位置, 南黄海北部盆地的研究一直受到地质学家的关注。前人对南黄海北部盆

地晚白垩世以来的地质与地球物理特征、地层层序、构造变形特征及盆地结构、与周缘构造单元的构造特征对比等方面已进行了广泛的研究与讨论^[1-7]。有关盆地的形成过程和演化机制, 前人亦从不同角度提出了多种模式, 例如与太平洋俯冲有关的拉张盆地机制^[7]、与庐断裂有关的张扭性盆地模式^[8]、伸展拆离构造模式^[4]、经典裂谷模式^[2]、简单剪切伸展模式^[9]、造山

收稿日期: 2015-06-22; 修订日期: 2015-10-26。

第一作者简介: 高顺莉(1976—), 女, 博士, 高级工程师, 海洋地质学。E-mail: gaoshunli2012@foxmail.com。

基金项目: 国家科技重大专项(2011ZX05023)。

作用后的岩石圈垮塌模式^[10]、基底拱升式伸展模式^[5],这些模式从多个方面论证和解释了盆地的形成过程,但对盆地形成的深层控制因素讨论较少,特别是盆地基底断裂对盆地形成演化的控制作用没有引起足够的重视。近年虽然有学者指出苏北盆地形成与基底断裂关系密切,基底断裂决定了盆地内断裂系统的方位与活动方式^[3,11],但对于盆地基底断裂与盆地结构、盆地构造变形和形成演化的关系尚缺乏深入探讨。

本文基于北部盆地近年来最新的二维地震资料解释,综合钻井等地质记录,结合相关地质背景和前人研究成果,分析了不同时期盆内断裂组合方式、活动期次和发育规律,明确了不同伸展阶段盆地沉积记录 and 构造变形,形成了对北部盆地晚白垩世以来不同时期断裂发育模式和地层沉积充填特征的认识,并在此基础上探讨了该区断陷盆地的形成机制。

1 地质概况

南黄海地区位于下扬子块体东段,是下扬子块体向海域的延伸,即郯庐断裂带以东,苏鲁造山带以南,江绍断裂带以北的区域,其东与朝鲜半岛毗邻。高分辨率数字地形清楚地呈现了现今郯庐断裂、江绍断裂和主要二级构造单元带的展布(图1a)。

近年来的研究成果表明,印支-早燕山期扬子块

体向北俯冲与中朝块体碰撞,郯庐断裂左行走滑,形成大别-苏鲁造山带,与此同时,下扬子块体向南俯冲并下插至江南-怀玉造山带之下^[12]。在此区域构造背景下,南黄海的区域应力场分布总体上以近南北向挤压为主,上三叠统-下白垩统与其下伏的震旦系-中三叠统海相地层强烈变形与变质,呈板条状逆冲体系,形成一系列NE向的褶皱和逆断层^[2,13],晚白垩世-古近纪受区域伸展背景控制而强烈裂陷,形成一系列以NE向、NNE向为主的伸展断陷盆地,叠覆在印支-早燕山期逆冲推覆构造体系之上。

本文研究区位于南黄海北部海域,北侧以千里隆起为界,南侧以南黄海盆地中部隆起为界,总面积约 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$,水深20~80 m。研究对象为晚白垩世以来的多个凹陷组成的统一坳陷,包括5个负向构造单元和3个正向构造单元。整体结构为北断南超,沉积层向南侧中部隆起区超覆,表现为箕状半地堑或不对称地堑结构。单个凹陷呈东西向或近东西向展布,坳陷的主构造线呈NEE走向(图1b)。

盆地内沉积地层与下扬子地台相一致,是在中国东部下扬子块体前震旦纪变质岩基底之上,由古生界、中生界、新生界叠置而成的一个大型叠合盆地。晚白垩世以来的中生代盆地自下而上依次发育上白垩统泰州组,古近系古新统阜宁组、始新统戴南组和三垛组,新近系盐城组及第四系东台组,总厚度达3 000~

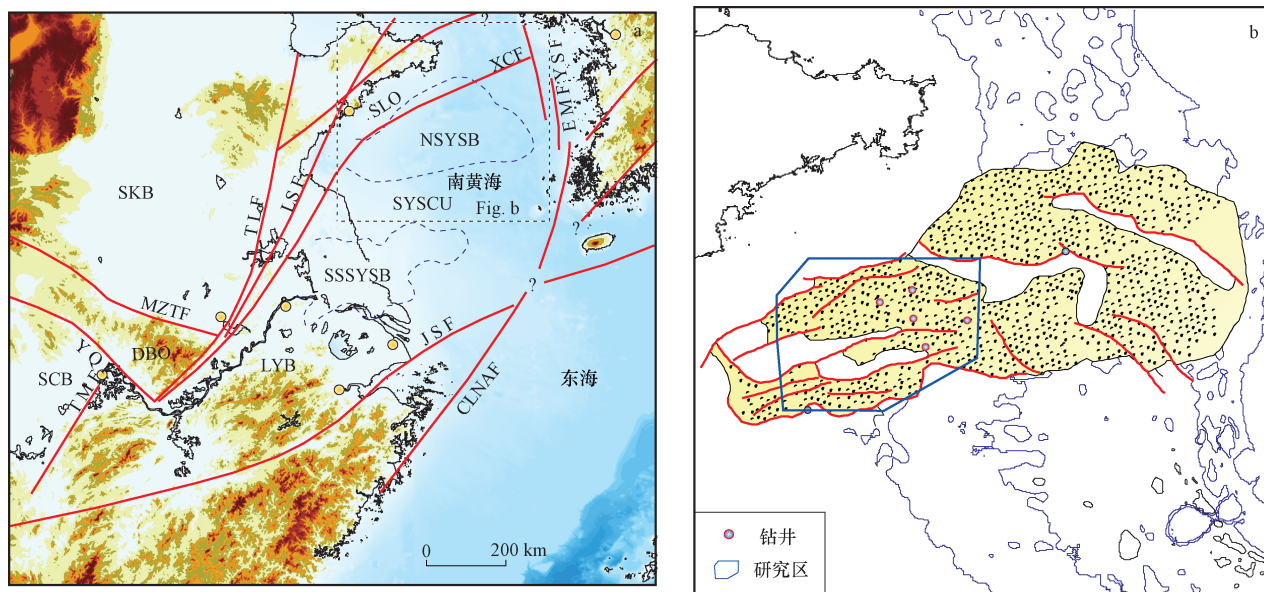


图1 南黄海及其周围地质背景、构造单元(a)与研究区范围(b)

Fig. 1 Geologic setting and tectonic unit map of the South Yellow Sea and structural elements(a)

as well as study area in the northern sub-basin(b)

SKB—中朝块体;LYB—下扬子块体;SCB—华南块体;SLO—苏鲁造山带;DBO—大别造山带;TLF—郯城-庐江断裂;WZF—五莲-诸城断裂;XCF—响水-滁州断裂;EMFYSF—朝鲜半岛西缘断裂;JSF—江山-绍兴断裂;CLNAF—长乐南澳断裂;TMF—团风-麻城断裂;MZTF—磨子潭断裂;YQF—英店-青山口断裂;SSYSB—苏北-南黄海南部盆地;SYSCU—南黄海中部隆起;NSYSB—南黄海北部盆地

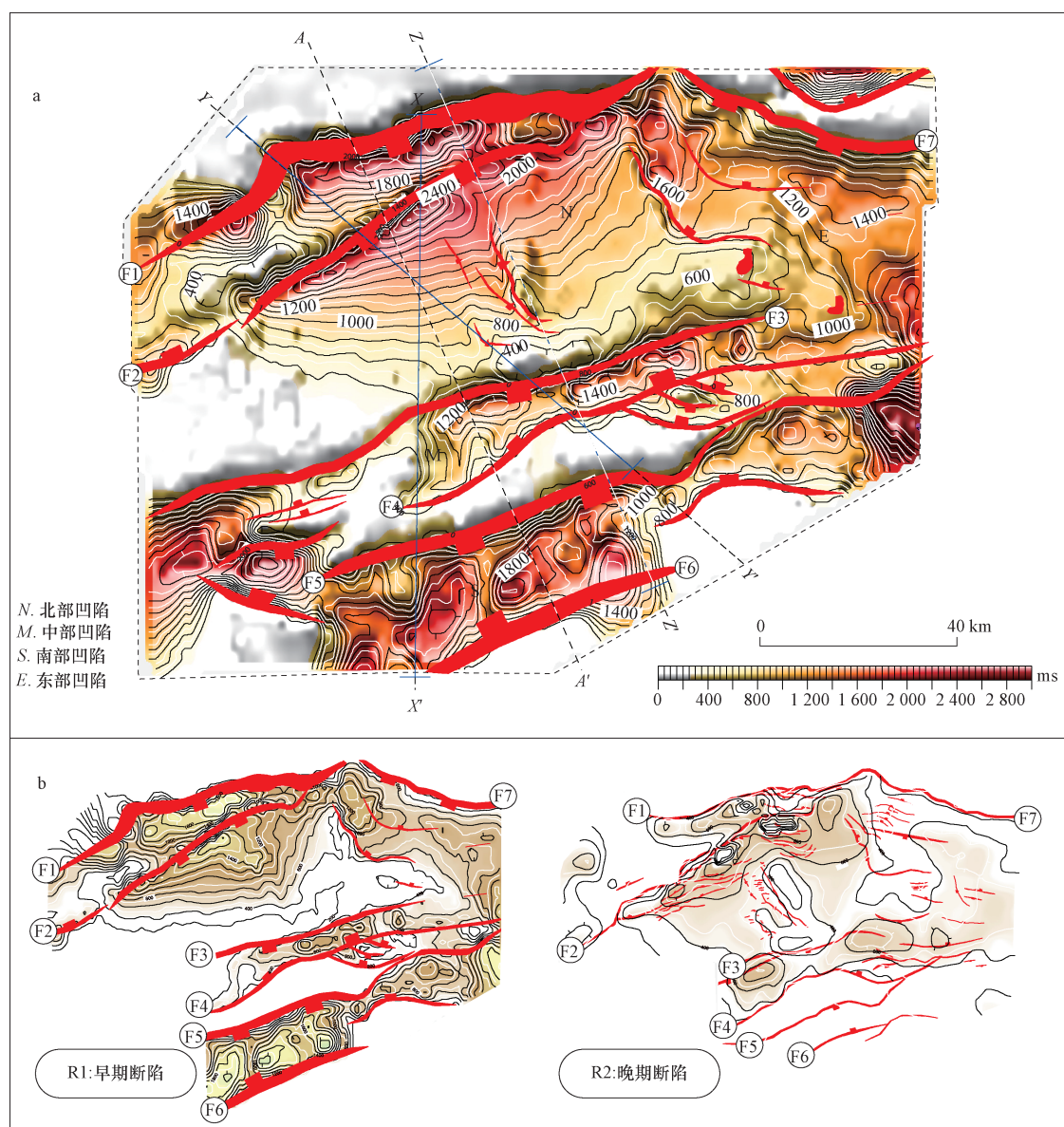


图3 南黄海北部盆地基底断裂格局(a)与早晚期沉积充填厚度(b)

Fig. 3 Structure regime of basement fault (a) and sedimentary thickness of early and late stages (b) within the northern sub-basin

注:等值线为晚白垩世以来沉积物充填厚度(地震双程时);XX',YY',ZZ'分别为地震测线位置;AA'为垂直构造走向的测线。

3 断裂系统

北部凹陷晚白垩世活动的断层主要是 NEE 向的 F1 和 F2 断层,以及 F3 ~ F7 断层,它们均为控凹的主边界断层,向下切割至盆地基底,具有基底卷入断层特征(图4)。其中 F1 和 F2 断面较陡立,向下切割深,剖面上主要表现为上盘下掉的伸展变形特征,切割盆地基底面落差由数百米至几千米不等,垂直位移分量沿断层走向有差异,同一断层在相邻剖面上表现为不同的位移。从断层平面展布特征分析,陡倾断层的线性延伸特征清楚,位移沿断层走向变化明显,可以认为是深部基底断裂带在盆地盖层中的延伸,在深部与断陷的基底断裂相连。

北部盆地晚白垩世以来构造变形的主要样式是伸展断裂构造,根据断裂构造变形卷入的地层层序及断裂活动时期,北部盆地晚白垩世以来断裂活动期可分为晚白垩世(泰州组沉积时期)、古新世(阜宁组沉积时期)、始新世-渐新世(戴南组和三垛组沉积时期)和新近纪-第四纪。各主控断裂在晚白垩世至古新世持续活动,具有明显同沉积断裂特征,并形成与主断裂大致平行或同向的张性次级断裂。同时,断陷伸展,箕状断陷充填,沉积地层整体表现为向控盆断裂渐厚的倾斜式展布,先存断裂对断陷沉积起着明显的控制作用。始新世-渐新世,断裂活动减弱,断距明显减小。新近纪-第四纪,虽部分活动断层切割上覆地层,但多数活动断裂不明显,未见断层同沉积特征。四个时期活动的断层产状和走向未发生明显变化,但断层活动

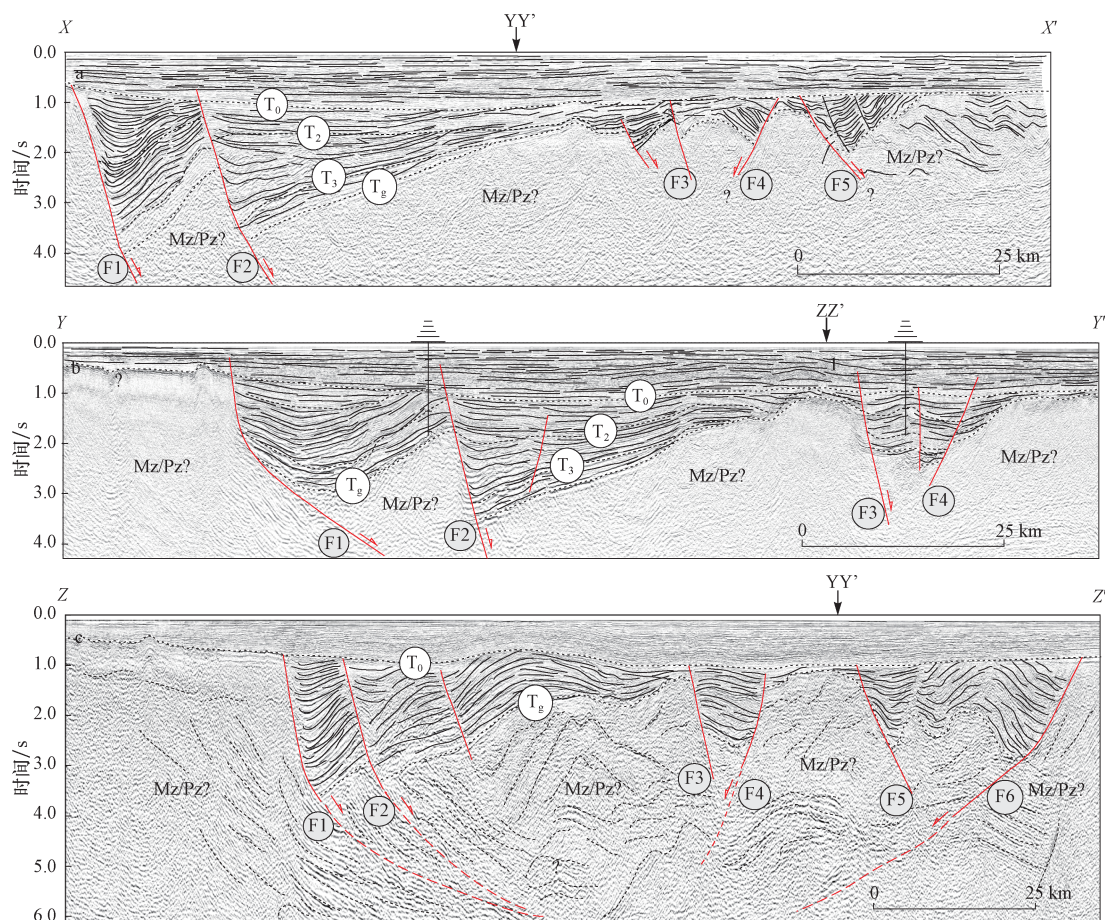


图4 南黄海北部盆地地震剖面解释(剖面位置见图3a)

Fig. 4 Section and its seismic interpretation of the northern sub-basin(see Fig. 3a)

性却存在明显差异。根据垂直 NEE 向断裂的地震剖面 AA', 对切割地层的断层进行断距实测, 通过与地层的沉积时间相对比, 可获得断层各时期的平均活动速率(图5)。可以看出, 断块抬升与断陷沉降同步进行, 断层活动性引起的差异沉降是盆地沉积充填的主控因素, 主断裂的活动性控制着凹陷最大沉积厚度。结合断裂在剖面上的垂直位移和平面上的组合分布特征, 北部盆地多数断层为正断层, 呈现伸展构造变形特征。

北部盆地内控制断陷形成的伸展断裂包括复活的基底断层与新生正断层。利用近年来针对中古生界采集和处理的地震资料的追踪和对比, 可对盆地再活动的基底断层进行识别(图4)。从针对中古生界老地层的地震剖面上看, 中古生界与新生界存在明显的角度、频率和振幅特征上的差异, 可以清晰地刻画主要断裂的特征。通过地震剖面的识别, 再活动基底断裂(F1-F6)与盆地伸展方向垂直或高角度相交, 垂向落差最大, 控制着盆地的沉积中心展布。虽然新生代的正断层走向也与伸展方向相垂直, 但其落差小, 对盆地的沉积格局影响较小。盆内控盆断层以 NEE 向为主体, 局部为 EW 向断层, 前者断层的走向垂直于拉伸方向, 呈现较大的断距, 后者断层的走向斜交于拉伸方

向, 呈现了较小的断距, 且盆地内各断陷的沉积中心展布与其受控正断层走向近似平行。因此, 断层的发育规律与活动性表明北部盆地在断陷发育时期处于近 NNW 向的伸展应力状态中。

依据伸展断裂运动学特征与活动规律可以判断, 北部盆地断陷期的控盆断层主体为基底复活型断层, 具有明显的继承性特征。因此, 北部盆地晚白垩世以来的断裂是一套以 NEE 向为主体, 局部发育近 EW 向的伸展断裂系统。该张性断裂体系是一系列控制上白垩统-古近系沉积充填的同生正断层, 晚白垩世以来沉积地层受近 NNW 向区域拉张作用而产生相应的伸展构造变形。

4 盆地先存断裂与盆地形成

北部盆地在地质历史时期具有复杂的结构, 呈现结构上的叠加性, 是一个具有中古生界海相挤压和新生界陆相伸展双重性质的叠合型盆地。虽然目前地震勘探技术对 T_g 反射层之下的中古生界海相内幕构造特征的成像与识别还存在限制, 地震品质相对较差, 影响了基底先存断裂识别与解释。本次工作基于区域构造特征, 结合重力、磁力与地震联合反演, 对边界控盆

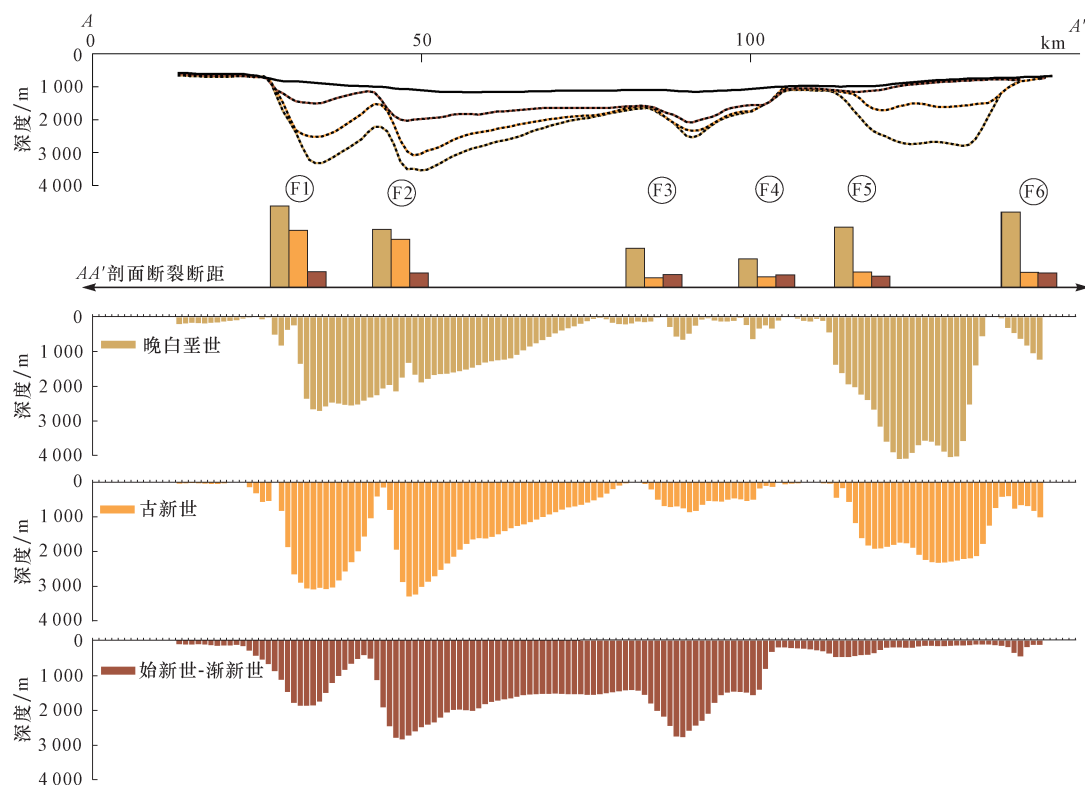


图5 主断层断距和下盘地层垂直落差

Fig. 5 Displacement of the main faults and vertical downthrow of foot wall

断裂进行解释约束,在地震剖面上识别向下深切入基底的断层,并根据区域演化过程展示的中古生界地层构造变形规律,绘制出北部盆地晚白垩世之前基底断裂图(图3a)。结果显示,在北部盆地内主要发育六组NEE向和一组EW向基底断层,这基本上能够反映北部盆地基底断裂展布规律与变形格局。

北部盆地晚白垩世-古近纪凹陷的形成和展布受盆地先存断裂控制,且与邻区造山带形成和演化具有密切的关系。中三叠世末-侏罗纪,下扬子块体与中朝块体沿苏鲁造山带陆-陆碰撞,黄海北部地区受南东向挤压,成为前陆变形带,且发育前陆盆地^[17],在前陆变形带中,发育一系列与苏鲁造山带平行的褶皱与逆冲断裂(图6a)。晚白垩世-古近纪,下扬子侧向伸展,郯庐断裂右旋,北部盆地基底断裂复活,表现为伸展性质(图6b)。在走向上,北部地区晚白垩世-古近纪断陷盆地的展布方向与苏鲁造山带走向保持一致,呈现为北东东向。随着接近郯庐断裂,造山带走向过渡为北北东向,受郯庐断裂带错断与左行平移牵引控制,在空间分布上表现为弧形弯曲,且在造山带走向转换区域,伸展盆地基本不发育。同时,苏鲁地区的变质岩出露情况总体上也呈现自东向西由超高压至高压过渡的趋势。由此可见,接近苏鲁造山带超高压出露区的南黄海北部地区,主要为北东东走向的前陆构造变形带,且发育有伸展盆地,而远离苏鲁超高压变质带的地区,北东东走向的褶皱冲断带不发育或弱发育,断陷

盆地基本不发育,反映了南黄海北部地区断陷盆地的分布随苏鲁造山带的空间位置变化而变化,并且直接受前陆变形带的控制,由此呈现南黄海北部断陷盆地与苏鲁造山带走向一致的构造特征。苏皖详细的油气勘探地震、钻孔资料以及海相地层露头,对下扬子陆域前陆褶皱冲断带构造特征进行了较好地揭示^[18],南黄海北部地区是下扬子陆域构造变形的海域延伸,由此佐证了南黄海北部地区前陆冲断带与苏鲁造山带的成因关系。盆地展布方向、冲断带构造方向与苏鲁造山带走向的一致性表明,南黄海北部前陆冲断带是北部断陷盆地的重要先存基底断裂,直接控制了北部伸展盆地的位置与走向。

从重磁异常特征上看,南黄海北部边缘有一条总体走向NEE向的重磁线性异常或线性梯度带^[6],在走向上呈锯齿状变化,被解释为滁州(嘉山)-响水断裂带在海域的延伸,是平行于苏鲁造山带向东南倾的区域边界断裂,对造山带的形成与发展起着重要的控制作用,也是控制南黄海北部断陷盆地形成与演化的主断裂。由陆至海,响水-滁州断裂带北侧分布着深潜层次构造变形的基底变质岩,南侧分布着苏北盆地与南黄海北部盆地,其断裂带是盆地与造山带之间的构造界线,现今为下扬子块体与苏鲁造山带之间的缝合带。其形成与演化可分为两个阶段,早期形成于印支-早燕山苏鲁造山,是一条自北向南的逆冲断裂带;晚期受伸展应力场控制,逆冲断裂复活而伸展,成为控

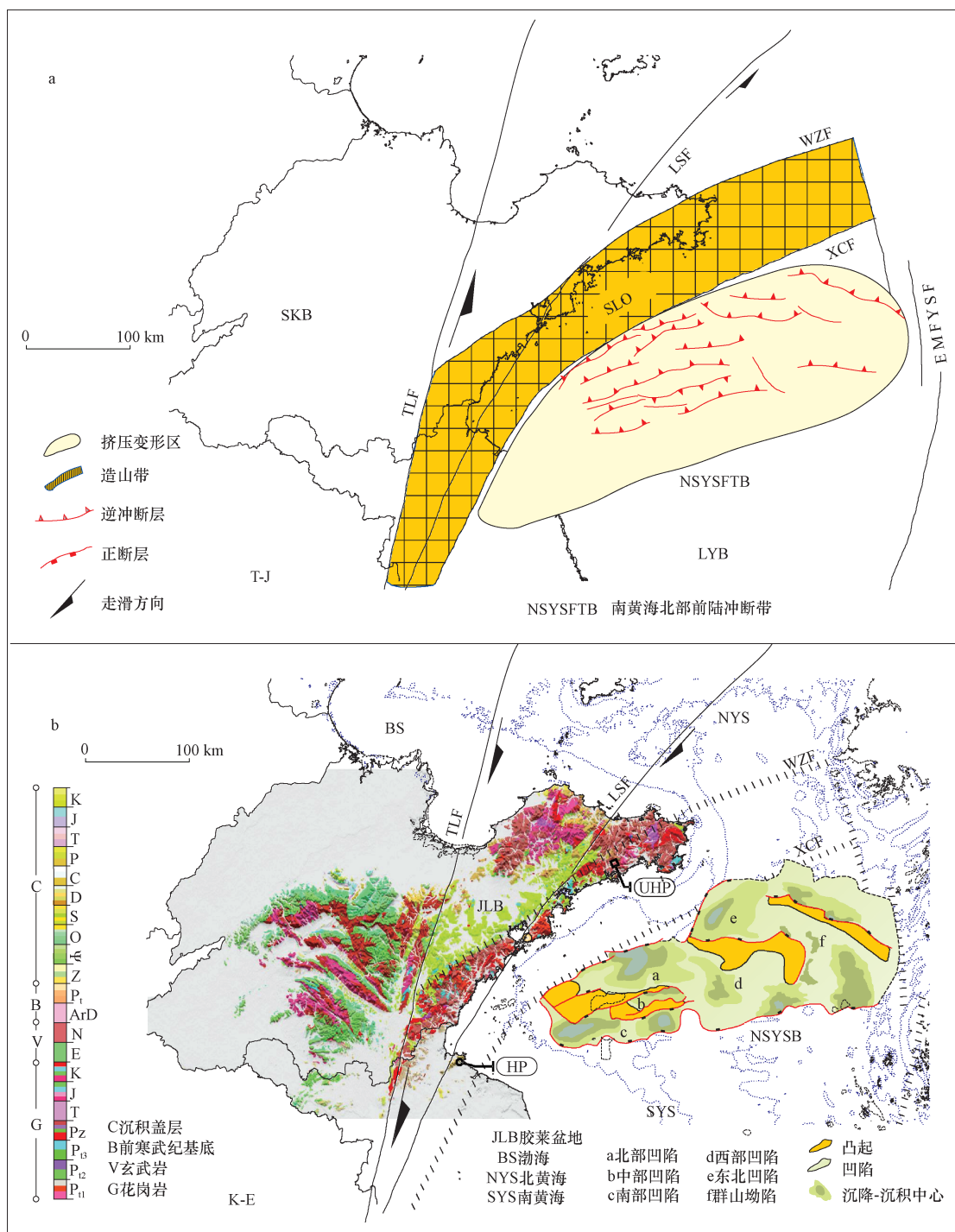


图6 南黄海北部盆地先存断裂演化与盆地形成

Fig. 6 Pre-existing faults evolution and formation of the northern sub-basin

- a. 中三叠世末-侏罗纪, 苏鲁造山, 郯庐断裂左旋, 南黄海北部前陆褶皱冲断带形成;
b. 晚白垩-古近纪, 下扬子侧向伸展, 郯庐断裂右旋, 北部盆地基底断裂复活

制晚白垩世-古近纪沉积的控盆同生正断层。在垂直横切北部盆地的地震剖面上清楚地反映了北部盆地基底的复杂构造变形特征(图4),其地震反射特征与上覆地层差异显著,地震表现为低频弱振幅,杂乱反射,连续性差,地层倾角大,大致能识别印支期以来逆冲-褶皱的构造迹象,具有中古生界挤压而形成褶皱或推覆体断块形态的缩短变形特征。而上覆地层地震振幅强,频率高,连续性较好,表现为伸展盆地地层反射特征。同时,

盆地内主要的断裂皆向下逐渐变缓收敛于海相地层内幕的断裂面,在剖面上可见断续且趋于水平的反射层,这是基底先存逆冲断裂的重要指示特征。

从地震剖面上判读,控制断陷的边界断层在结构上常表现为断面向深处延伸,呈铲状变缓或被缓倾角伸展断层所截,并以倾缓平面状切入深层地壳并以某种方式与深断裂联系在一起。根据控盆或控凹断裂的结构、几何学与运动学特征分析,此结构实际上是挤压

体系与伸展体系不同时期、不同类型构造变形的叠加。先存的挤压体系深断裂构造面被新生代伸展断层利用和改造,显现出由伸展构造系统和挤压构造系统叠加构成的复杂变形现象,新生代盆地的分布与海相内幕先存断裂带的横向分布密切相关,反映出“深层约束浅层”的关系。伸展断层的位置和长度基本保持不变,大部分控制断陷沉积充填的正断层向深处延伸,与深层的先存断裂带直接连在一起。盆地基底先存断裂在伸展应力场下复活而呈伸展构造特征,断裂面上盘地块向南东滑移,绕水平轴旋转,北断南超,北深南浅,北陡南缓,表现出不对称的箕状凹陷结构特征。如控盆边界断裂 F1 断裂深度达 8~10 km,断面形态呈铲状,下盘所控制地层北断南翘,北厚南薄,北部盆地沉积充填的最大厚度位于其断裂旁的沉积凹陷内。与在渤海(渤中凹陷)、东海、琼东南、珠江口等盆地的上地壳拱张裂谷成因不同,前者主要表现为高角度正断层控制的非旋转伸展,因而呈现显著的裂后热沉降,但南黄海北部盆地的基底断裂复活而伸展,断块旋转,因而热沉降微弱,盆地的形成机制差异显著,表现为不同的沉降特征与断裂系统,进而呈现了不同的盆地结构,故根据盆地的成因机制,称南黄海北部盆地称为“断陷”盆地,而非“裂谷”盆地。

北部盆地晚白垩世以来断裂分布与沉积格局表明,该时期盆地处于近 NNW 向或近 NS 向的区域伸展的应力场中,该应力场控制着先存断裂带后期的继承性活动方式。先存断裂由于垂直于区域伸展方向,且断裂深入基底,规模较大,活动强度大,表现为强烈而持续的伸展,由此控制了盆地的构造走向。与此同时,先存断裂的伸展持续控制着北部盆地的沉积充填发育。与北部盆地处于同一构造地质背景下的苏北盆地,也揭示了类似的成盆机制。苏北盆地的地震与钻井等勘探资料表明,在盆地基底内已识别一系列 NEE 向和 NNE 向基底断层,并且在断陷盆地形成与演化的伸展活动中,复活而呈现正断层活动。

近年来盆地构造物理和数值模拟实验^[19]表明,可从构造物理实验的角度研究裂陷盆地的构造形成机制及分析断裂构造活动性的变化规律。例如“不协调伸展”模式^[19]指出,盆地断裂活动初期盆地内构造薄弱带的基底断裂由于其较低的强度而易于活动。同时,基于高精度三维地震勘探的苏北盆地研究实例表明,基底断层对盆地的断层系统与分布起着决定性控制作用^[11]。北部盆地新生代断裂伸展活动受控于近 NNW 向拉张作用(最大伸展方向),NEE 向或近 EW 向基底断裂表现为张性复活,控制着北部盆地断陷的形成与演化。

由此可见,先存逆冲断层的作用与影响是不容忽

视的,其决定了北部盆地内断裂活动方式与方位。基底断裂的复活是南黄海北部盆地晚白垩世以来伸展构造变形与盆地形成的根本原因,先存断层的成因与位置决定于此盆地形成前所经历的构造变形过程。因此,北部凹陷盆地中的伸展断层向深层延伸都会以不同的过渡或连接方式与深断裂构造联系在一起,虽然现有的地震勘探技术尚不能准确识别与落实这类复杂的中古生界内部构造变形特征,但近年来基于重磁与地震联合反演的研究,为南黄海海相中古生界内幕结构的鉴别和判断,提供了重要的参考和约束。

5 讨论

5.1 大别-苏鲁造山带与南黄海北部盆地的构造关系

大别-苏鲁造山带是中三叠世末扬子块体与华北块体间的陆陆碰撞造山带,由于碰撞挤压变形,在南黄海北部地区形成了一系列褶皱与逆冲断裂区,总体上以 NEE 向为主,从而成为前陆变形带^[13,17],其形成的时间与大别-苏鲁造山带形成的一致(图 6)。这一系列逆冲断裂带构成了南黄海海域海相中古生界的断裂系统,基本控制着南黄海新生代盆地形成与演化的主体构造轮廓,这与区域的地球物理场显示特征一致^[6]。

北部盆地以嘉山-响水断裂带为界,而与苏鲁造山带相邻,其构造变形和结构特征与苏鲁造山带形成过程密切相关,苏鲁造山带与北部盆地的先存断裂在形成时间和构造特征上具有耦合性,苏鲁造山带的碰撞造山是南黄海北部地区海相内幕先存构造格局的动力来源,均为中三叠世末扬子块体向华北块体俯冲而形成,新生代断陷盆地叠置于中生代前陆盆地之上,北部地区的晚白垩世-古近纪伸展构造变形则继承了早白垩世逆冲构造格局而形成了现今的构造形态,直接控制着盆地的形成演化和沉积格局等。以响水-滁州(嘉山)断裂为例,它是一组平行于苏鲁造山带的边界断裂,是北部地区前陆变形带中的一条逆冲断裂^[6,20]。该断裂向海域的延伸部分是南黄海北部盆地的重要基底断裂,在新生代表现为重要的边界控盆大断裂。与此同时,苏北盆地海相内幕与北部盆地基底逆冲断裂的构造背景相同,两者均属于大别-苏鲁造山带前陆变形,两新生代盆地的成盆机制相似且相互验证。

起源于中三叠世末印支期华北块体与扬子块体碰撞过程的海相内幕逆冲断裂系统,构成了北部盆地或南黄海海域重要的基底断裂,海相内幕断裂带的复活对新生代断层方位、活动方式和沉积充填产生显著的影响,新生代盆地结构也反映了南黄海大型叠合盆地多期原型相互叠加与改造变形的重要特征。这套逆冲断裂系统是整个新生代北部伸展盆地呈北东东向构造

走向的主要原因,亦是盆地北断南超的根本原因。

5.2 南黄海北部新生代盆地的成因机制与地球动力学背景

晚白垩世以来,南黄海进入伸展盆地发育阶段,最显著的特征是受先期断裂和局部差异应力控制。南黄海北部盆地与受地幔上拱岩石圈减薄产生的伸展盆地在地球动力学背景上存在明显差异,不可能归属为裂谷盆地,更为重要的是深部莫霍面非镜像与居里等温面同相性等地球物理资料^[6]也为此提供直接证据。虽盆地的构造位置邻近郯庐断裂,但从地震资料可以判读,盆内未见花状构造和雁列状断层分布,盆地的拉张沉降与走滑断裂活动不存在直接联系,而且控盆主断裂为拉张的正断裂,而非北东东走向的陡倾高角度平移走滑断层,可见将北部盆地的形成归因于郯庐断裂带的右行走滑活动,盆地类型归属于拉分盆地,不能合理地解释盆内的构造特征。同样,根据苏北盆地古近系与新近系地层中碱性玄武岩和辉绿岩的岩体出露而提出的纯剪切拉张模型,或基于野外地质考察的认识提出的伸展拆离构造模型^[4],两者的重要特征是存在巨型的拆离断层,但北部盆地从构造上来看并不具备此类特征的背景。造山作用后的岩石圈垮塌伸展发生时间相对较短,应变不显著,不具有区域上的构造意义,垮塌机制^[10]在北部盆地的成因上不是一个合理的解释。

北部盆地是下扬子新生代伸展型盆地的一个重要构造单元。关于其新生代的动力学过程,众多学者进行了深入的讨论,通常将其归因为西太平洋板块的俯冲作用或印度-欧亚板块碰撞的远程效应,或两者的联合作用^[21],然而由于南黄海北部断陷盆地的初始伸展明显早于欧亚板块侧向挤出构造的形成时代,故北部盆地的形成难以用印度-欧亚碰撞的远程效应进行有效解释,因此太平洋-欧亚板块俯冲汇聚作用是伸展盆地形成的主要动力来源,故而提出了区域地幔热隆起^[2,9,21],弧后扩张作用,郯庐断裂带的右行走滑活动等动力学成因,但提出的各种机制不能很好的解释莫霍面与盆地的非镜像关系^[9]、P波速度异常与各向异性^[22]、深达35km的居里等温面^[6]、岩石圈高Te值(60~70 km)^[23]、微弱裂后热沉降等构造特征,表明北部地区上地幔顶部可能不存在大范围的地幔扰动与隆起,热隆伸展不是北部盆地形成的直接原因,这也是下扬子断陷盆地形成动力学背景的特殊之处。强调北部盆地形成的西太平洋板块俯冲驱动,且其对南黄海新生代盆地的形成具有多大的驱动作用,是一个值得讨论与商榷的问题。通过下扬子区域伸展数值模拟工作,可以推测南黄海北部盆地的形成机理,存在一个合

理的解释是下扬子地区新生代上地壳伸展构造变形,受控于太平洋板块俯冲挤压,块体差异性滑移,在下扬子块体形成侧向伸展构造应力场,诱发先存基底断裂复活,进而形成北部断陷盆地,一种可能的推论是北部盆地形成于西太平洋板块俯冲驱动的陆内块体侧向扩展构造。

6 结论

1) 晚白垩世以来南黄海北部盆地是一个主体受伸展变形控制、“北断南超”、NEE向发育的地堑式或半地堑式的凹陷群。盆地受北侧控盆边界大断裂控制,晚白垩世-古近纪盆地内NEE向基底断层复活,在区域拉张应力背景下发生伸展拉张,断块翘倾,沉积物在箕状断陷内充填。在结构特征上,呈现为“断陷+拗陷”的组合模式。

2) 南黄海北部盆地内主要有7条NEE向基底断裂,随后断裂继承性活动,且具有明显的阶段性,其中晚白垩世-古新世是盆地断裂活动的高峰期,也是盆地沉降的关键时期。盆地晚白垩世以来构造变形特征主要表现为伸展变形,继承自前白垩纪挤压变形形成的海相内幕断裂。南黄海盆地海相内幕先存断裂带在新生代的伸展应力状态下再次活动,主导着盆内断层的活动范围、展布方向、活动方式和沉积格局,进而控制了断陷盆地的发育与分布,其展布与海相内幕先存断裂带的横向分布密切相关,基底断裂是南黄海晚白垩世以来凹陷群形成的关键因素,反映了“深层约束浅层”的关系。

3) 对南黄海北部盆地晚白垩世以来的构造变形和盆地成因的探讨对明确该时期成盆背景、沉积演化、地层充填等基础地质认识起重要作用,可为南黄海北部盆地晚白垩世以来构造样式、成烃演化及生储盖组合等油气地质研究提供基础。

致谢:在成文中,无锡石油地质研究所的徐旭辉教授在下扬子区域认识上提供了大量指导和建设性意见,在此谨致衷心谢意。

参 考 文 献

- [1] 郝天珧, Suh Mancheol, 王谦身, 等. 根据重力数据研究黄海周边断裂带在海区的延伸[J]. 地球物理学报, 2002, 45(3): 385-397.
Hao Tianyao, Suh M, Wang Qianshen, et al. A study on the extension of fault zones in Yellow Sea and its adjacent areas based on gravity data[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2002, 45(3): 385-397.
- [2] 郑求根, 蔡立国, 丁文龙, 等. 黄海海域盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(05): 647-654.
Zheng Qiugen, Cai Ligu, Ding Wenlong, et al. Development and evo-

- lution of basins in Yellow Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26 (05): 647–654.
- [3] 叶舟, 马力, 梁兴, 等. 下扬子独立地块与中生代改造型残留盆地[J]. *地质科学*, 2006, 41(1): 81–101.
Ye Zhou, Ma Li, Liang Xing, et al. The independent Lower Yangtze Block and Mesozoic reformed residual basins [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2006, 41(1): 81–101.
- [4] 丁道桂, 潘文蕾, 彭金宁, 等. 扬子板块中、古生代盆地的改造变形[J]. *石油与天然气地质*. 2008, 29(5): 597–606.
Ding D, Pan W, Peng J, et al. Transformation and deformation of the Meso-Paleozoic basins in the Yangtze Plate [J]. *Oil & Gas Geology*. 2008, 29(5): 597–606.
- [5] 陈安定. 苏北盆地构造特征及箕状断陷形成机理[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(2): 140–150.
Chen Anding. Tectonic features of the Subei Basin and the forming mechanism of its dustpan-shaped fault depression [J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(2): 140–150.
- [6] Li C, Wang J, Zhou Z, et al. 3D geophysical characterization of the Sulu-Dabie orogen and its environs [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2012, 192: 35–53.
- [7] 徐旭辉, 周小进, 彭金宁. 从扬子地区海相盆地演化改造与成藏浅析南黄海勘探方向[J]. *石油实验地质*, 2014, 0(5): 523–531.
Xu Xuhui, Zhou Xiaojin, Peng Jinning. Exploration targets in southern Yellow Sea through analysis of tectono-depositional evolution and hydrocarbon accumulation of marine basin in Yangtze area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2014, 0(5): 523–531.
- [8] 张渝昌. 苏北—南黄海盆地的构造演化[M]. 北京: 石油工业出版社, 1990, 111–128.
Zhang Yuchang. Cenozoic-Mesozoic sedimentary basin of China [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990, 111–128.
- [9] 马力, 钱基, 穆曰孔, 等. 苏北—南黄海盆地的构造演化和烃类形成[J]. *南京大学学报(地球科学版)*, 1993, 5(2): 148–163.
Ma Li, Qian Ji, Mu Yuekong, et al. Tectonic evolution and generating hydrocarbons of Subei-Southern Yellow Sea Basin [J]. *Journal of Nanjing University (Earth Science Edition)*, 1993, 5(2): 148–163.
- [10] Hong T, Choi H. Seismological constraints on the collision belt between the North and South China blocks in the Yellow Sea [J]. *Tectonophysics*, 2012, 570: 102–113.
- [11] 朱光, 姜芹芹, 朴学峰, 等. 基底断层在断陷盆地断层系统发育中的作用——以苏北盆地南部高邮凹陷为例[J]. *地质学报*, 2013, 87(04): 441–452.
Zhu Guang, Jiang Qinin, Pu Xuefeng, et al. Role of basement faults in faulting system development of a rift basin: a example from the Gaoyou Sag in Southern Subei Basin [J]. *Acta geological sinica*, 2013, 87(04): 441–452.
- [12] 陈沪生. 下扬子地区 HQ-13 线的综合地球物理调查及其地质意义[J]. *石油与天然气地质*, 1988, 9(03): 211–222.
Chen Husheng. Comprehensive geophysical survey of HQ-13 line in the Lower Yangzi reaches and its geological significance [J]. *Oil & Gas Geology*, 1988, 9(03): 211–222.
- [13] 姚蓉, 罗开平, 杨长清. 南黄海北部地区逆冲推覆构造特征[J]. *石油实验地质*. 2011, 33(03): 282–284.
Yao R, Luo K, Yang C. Features of thrust nappe structure in northern South Yellow Sea [J]. *Petroleum Geology & Experiment*. 2011, 33(03): 282–284.
- [14] 蔡乾忠. 横贯黄海的北朝造山带与北、南黄海成盆成烃关系[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(2): 185–192.
Cai Qianzhong. Relationship between Sino-Korean orogenic belt traversing Yellow Sea and basin evolution and hydrocarbon generation in North and South Yellow Sea basins [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(2): 185–192.
- [15] 舒良树, 王博, 王良书, 等. 苏北盆地晚白垩世—新近纪原型盆地分析[J]. *高校地质学报*, 2005, 11(04): 534–543.
Shu Liangshu, Wang Bo, Wang Liangshu, et al. Analysis of northern Jiangsu prototype basin of late Cretaceous to Neogene [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2005, 11(04): 534–543.
- [16] 能源, 杨桥, 张克鑫, 等. 苏北盆地高邮凹陷晚白垩世—新生代构造沉降史分析与构造演化[J]. *沉积与特提斯地质*, 2009, 29(2): 25–32.
Neng Yuan, Yang Qiao, Zhang Kexin, et al. Tectonic subsidence and evolution of the Gaoyou depression in northern Jiangsu Basin during the Late Cretaceous to the Cenozoic [J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2009, 29(2): 25–32.
- [17] 郑仰帝, 蔡进功. 南黄海盆地碳酸盐岩碳氧同位素特征及意义[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(3): 307–313.
Zheng Yangdi, Cai Jingong. Characteristics of carbon and oxygen isotopes of carbonate rocks in South Yellow Sea Basin and their implication. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(3): 307–313.
- [18] 胡红雷, 朱光. 苏北地区前陆变形特征与形成机制[J]. *大地构造与成矿学*, 2013, 37(3): 366–376.
Hu Honglei, Zhu Guang. Characteristics and formation mechanism of the foreland deformation in the Subei Region [J]. *Geotectonica et Met-allogenia*, 2013, 37(3): 366–376.
- [19] 童亨茂, 聂金英, 孟令箭, 等. 基底先存构造对裂陷盆地断层形成和演化的控制作用规律[J]. *地学前缘*, 2009, 16(04): 97–104.
Tong Hengmao, Nie Jinying, Meng Lingjian, et al. The law of basement pre-existing fabric controlling fault formation and evolution in rift basin [J]. *Earth Science frontie*, 2009, 16(04): 97–104.
- [20] 姚蓉, 罗开平, 杨长清. 南黄海北部地区逆冲推覆构造特征[J]. *石油实验地质*, 2011, 33(3): 282–284.
Yao Rong, Luo Kaiping, Yang Changqing. Features of thrust nappe structure in northern South Yellow Sea [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2011, 33(3): 282–284.
- [21] Ren J, Tamaki K, Li S, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas [J]. *Tectonophysics*, 2002, 344(3): 175–205.
- [22] 胥颐, 李志伟, 刘劲松, 等. 黄海及其邻近地区的 Pn 波速度与各向异性[J]. *地球物理学报*, 2008, 51(05): 1444–1450.
Xu Yi, Li Zhiwei, Liu Jinsong, et al. Pn wave velocity and anisotropy in the Yellow Sea and adjacent region [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2008, 51(05): 1444–1450.
- [23] Chen B, Chen C, Kaban M K, et al. Variations of the effective elastic thickness over China and surroundings and their relation to the lithosphere dynamics [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2013, 363: 61–72.