

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2020.380>



南黄海盆地中部隆起构造特征及其成因机制

张田^{1,2},朱伟林^{1,2},胡森清³,陈春峰³,高顺莉³,陈忠云³,付晓伟^{1,2},钟锴^{1,2}

1. 同济大学海洋地质国家重点实验室,上海 200092

2. 同济大学海洋资源研究中心,上海 200092

3. 中海石油(中国)有限公司上海分公司,上海 200335

摘要:通过选取南黄海盆地中部隆起内部地震反射清晰、构造特征明显的典型地震剖面,开展精细的构造解释,系统梳理了南黄海盆地中部隆起的构造样式特征,识别出挤压(滑脱、高角度逆冲、对冲/背冲)、走滑(正花状、y字型)、伸展(铲式正断层)等多种构造组合样式。首次提出在中部隆起内部发育2条NW-SE向走滑断层。在此基础上,结合区域应力场特征和深部地球动力学背景,明确了中部隆起构造样式的发育期次、成因机制和构造演化历程。研究结果表明:(1)滑脱构造主要位于中部隆起北部,滑脱面位于志留系底部的泥页岩。滑脱构造应力机制来源于三叠纪末印支运动时期华北板块与下扬子板块之间的碰撞造山作用;(2)高角度逆冲主要位于中部隆起南部,其应力机制来源于早侏罗世燕山运动早期,古太平洋板块初始高速、低角度NW向俯冲;(3)走滑断层主要表现为具有压扭特征的正花状构造,位于中部隆起东南部、中西部,对应于早白垩世时期,古太平洋板块低角度俯冲由NW向转变为NNW向引起的左旋剪切作用,中国东部郯庐断裂在该时期亦表现为左旋剪切特征;(4)伸展正断表现为铲式正断层特征,发育在中部隆起南北边界,即在中部隆起与南黄海盆地南部坳陷、北部坳陷的接触部位,对应于晚白垩世燕山运动晚期,古太平洋板块由低角度俯冲转为高角度俯冲,此时中国东部构造应力体制经历着由挤压向拉张的转换。

关键词:构造演化;成因机制;构造样式;中—古生界;中部隆起;南黄海盆地;构造地质。

中图分类号: P736.1

文章编号: 1000-2383(2021)10-3481-15

收稿日期: 2020-06-09

Structural Characteristic and Its Genetic Mechanism of Central Uplift in South Yellow Sea Basin

Zhang Tian^{1,2}, Zhu Weilin^{1,2}, Hu Senqing³, Chen Chunfeng³, Gao Shunli³, Chen Zhongyun³, Fu Xiaowei^{1,2},
Zhong Kai^{1,2}

1. State Key Laboratory of Marine Geology, Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Center for Marine Resources, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. Shanghai Branch of CNOOC (China) Ltd., Shanghai 200335, China

Abstract: By selecting typical seismic sections with clear internal seismic reflection and obvious structural features to carry out delicate structural interpretation, in this paper it systematically combines the structural style features of the central uplift in the South Yellow Sea basin, and identified the compressional structures (detachment, high angle thrust, opposite/back thrust), strike slip faults (positive flower, y-shaped), extensional normal fault (shovel-like normal fault) in the central uplift of the South Yellow Sea basin and so on. Among them, two NW-SE strike slip faults are proposed for the first time. On this basis, combined with the characteristics of regional stress field and the background of deep geodynamics, the development period, genetic mechanism and

作者简介:张田(1982—),男,高级工程师,在职博士研究生,主要从事构造地质与石油地质综合研究。ORCID: 0000-0003-1545-3785.
E-mail: zhangtian1982@tongji.edu.cn

引用格式:张田,朱伟林,胡森清,等,2021.南黄海盆地中部隆起构造特征及其成因机制.地球科学,46(10):3481—3495.

structural evolution course of the structural style in the central uplift are defined. The results show follows. (1) The detachment structure was mainly located in the north of the central uplift, and the detachment surface was located in the shale at the bottom of the Silurian strata. The tectonic stress mechanism of detachment originated from the collision orogeny between the North China plate and the Lower Yangtze plate at the end of Triassic. (2) The high angle thrust was mainly located in the south of the central uplift. The stress mechanism of the high angle thrust came from the initial high-speed and low angle NW subduction of the ancient Pacific plate during the early Yanshanian movement in Early Jurassic. (3) The strike slip faults were mainly positive flower structures with compression and torsion characteristics, which were located in the southeast and mid-west of the central uplift. The stress mechanism came from the sinistral shear caused by the low angle subduction of the ancient Pacific plate from NW to NNW in Early Cretaceous. The Tan-Lu fault in eastern China also showed sinistral shear characteristics in this period. (4) The extensional normal fault was characterized by shovel-like normal fault, which was developed in the north-south boundary of the central uplift, that was, the contact parts between the central uplift and the southern depression, the northern depression of the South Yellow Sea basin. The stress mechanism was derived from the transition of the paleo Pacific plate from low angle subduction to high angle subduction during the late Yanshanian movement in Late Cretaceous. At this time, the tectonic stress system in eastern China also changed from compression to extension.

Key words: tectonic evolution; genetic mechanism; structural style; Mesozoic-Paleozoic; central uplift; South Yellow Sea basin; structural geology.

0 前言

南黄海盆地处于古亚洲构造域、滨太平洋构造域和特提斯构造域的核心区域(李三忠等,2010),位于下扬子板块东北缘(陈沪生等,1999;郝天珧等,2010),是一个中—新生界陆相沉积叠加于中—古生界海相碳酸盐岩沉积之上的叠合盆地(张训华等,2014;陈建文等,2018),经历了志留纪末加里东运动、晚三叠世印支运动、早侏罗世以来的燕山幕式运动等多期构造运动的叠加改造,表现出极为复杂的构造演化历程(郑求根等,2005;庞玉茂等,2017;雷宝华等,2018)。

尽管经过了近60年的油气勘探历程,但南黄海盆地迄今仍然是中国近海唯一未获得商业性油气发现的沉积盆地(Li *et al.*, 2014;许红等,2015;王明健等,2018;徐建永等,2019).21世纪开始,随着南黄海盆地南部坳陷、北部坳陷新生界油气勘探的接连失利,研究视角逐渐转向中部隆起的中—古生界(朱伟林和王国纯,2000;戴春山等,2003)。

在南黄海盆地中部隆起地震剖面中,新生代地层直接覆盖在下伏中—古生代地层之上,两者之间形成一个强反射界面,造成深部地震反射能量较弱,且缺少钻井约束,增加了南黄海中部隆起中—古生界的识别难度(王建花等,2003;王丰等,2010),进而导致中部隆起构造特征、成因机制及构造演化等研究存在较大的争议和不确定性(李慧君等,2012;杨长清等,2014;陈春峰等,2018)。

近年来,随着地震采集和处理技术的提升,在

南黄海盆地获得了高品质的海相中—古生界地震反射资料(高顺莉等,2014;陈建文等,2019).2016年南黄海盆地中部隆起钻探第一口科学探井(CSDP-2井),直接揭示了第四纪—志留纪地层,并在多个层位见到油浸、油斑等油气显示,预示着南黄海盆地中部隆起中—古生界巨大的勘探潜力(张晓华等,2018;Cai *et al.*, 2019;肖国林等,2019).高品质地震资料的获取以及CSDP-2井的成功钻探,为在中部隆起系统开展构造样式及构造演化研究提供了资料支撑。

研究针对中部隆起内部典型地震剖面,开展精细的构造解释,系统梳理了中部隆起的构造样式特征。在此基础上,结合区域应力场和深部动力学背景,明确了中部隆起构造样式的发育期次、成因机制和构造演化历程,为南黄海盆地中—古生界构造特征研究奠定了坚实基础。

1 区域地质背景

在地理位置上,南黄海位于中国大陆与朝鲜半岛之间,北部以山东半岛成山角—朝鲜半岛白翎岛连线为界与北黄海相连,南部以江苏启东角—朝鲜半岛济州岛连线为界与东海相伴,西至我国山东省和江苏省海岸,东至朝鲜半岛西海岸,面积约 $30 \times 10^4 \text{ km}^2$ (陈建文等,2018)。

在大地构造位置上,南黄海盆地主要位于扬子地台,是下扬子地台沿北东方向的海域延伸部分(雷宝华等,2018)。南黄海盆地的北界以千里岩隆起

北断裂与华北板块相邻,南界以江山—绍兴断裂与华夏板块相接,西界以苏北—滨海断裂与苏北盆地相连,东界为南黄海东缘断裂。需要指出的是,南黄海盆地北部和南部边界为两期碰撞造山(华北—下扬子板块碰撞造山、下扬子—华夏板块汇聚拼合)的产物,表现为复杂的逆冲断裂带特征(Zhang *et al.*, 2007; 韩宗珠等, 2015; Pang *et al.*, 2017; 任纪舜等, 2019);而西部和东部边界受控于晚中生代以来古太平洋板块的多期次俯冲作用,表现为区域性走滑断裂特征(王巍等, 1999; 郝天珧等, 2002)。

南黄海盆地整体具有“三隆夹两坳”的构造格局,从北到南依次为:千里岩隆起、北部坳陷、中部隆起、南部坳陷、勿南沙隆起(李慧君, 2014)。其中,

南部坳陷可以看作是苏北盆地的海上延伸部分;而中部隆起作为一个中—古生界正向构造单元,夹持于北部坳陷、南部坳陷两个新生界负向构造单元之间(图1)。

南黄海盆地发育前南华系刚性结晶基底,具有典型的双层结构:第1套基底为1700 Ma(中条运动)固结的太古界及下元古界稳定结晶基底;第2套基底为800~1000 Ma(晋宁运动)固结的中、上元古界浅变质岩结晶基底(张训华等, 2014)。作为一个典型的中—古生界海相残留盆地和中—新生界陆相断陷盆地的叠加复合盆地,南黄海盆地以晋宁运动(Tg)和印支运动(T8)为界,划分出两套构造层:(1)海相中—古生界构造层:震旦纪—早、中三叠世

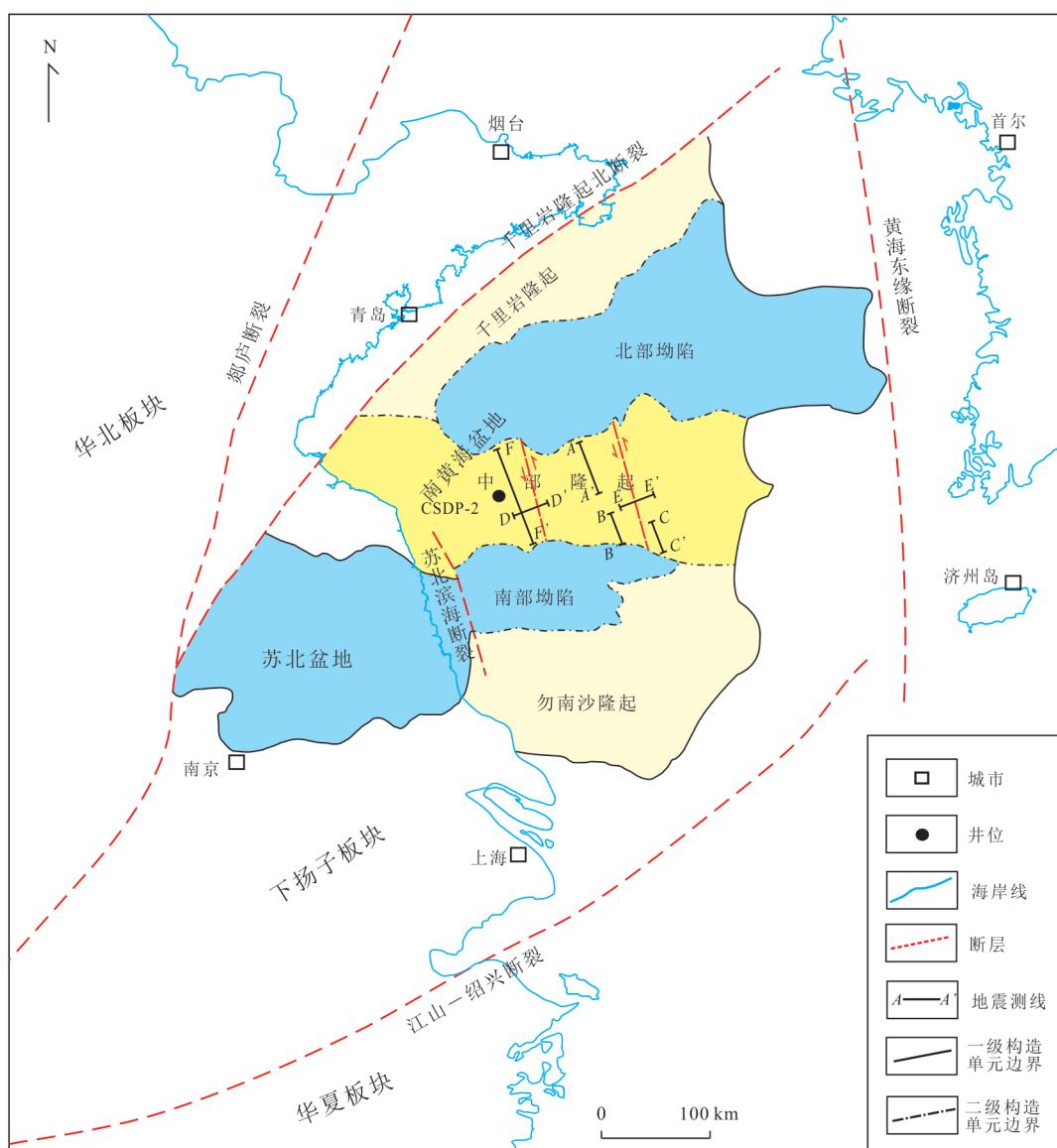


图1 南黄海盆地及邻区构造区划简图(据陈建文等,2019修改)

Fig.1 Structural division of the South Yellow Sea basin and its adjacent areas(after Chen *et al.*, 2019)

海相地层,属于稳定地台型盆地沉积组合;(2)陆相中—新生界构造层:晚侏罗世—第四纪箕状断陷湖盆沉积建造组合、拗陷型盆地河流相以及海陆交互相碎屑沉积建造(陈建文等,2019).其中,南黄海盆地中部隆起主要发育巨厚的海相中—古生界.三叠纪末印支运动导致中部隆起经历剧烈的隆升剥蚀,缺失上三叠统、侏罗统和白垩统,新生界直接覆盖于中三叠统周冲村组地层之上.

2 地震反射特征

根据典型地震剖面的波阻抗反射特征,在南黄海盆地中部隆起中—古生界共识别出9个地震反射界面:T8、T9、T10、T11、T11x、T11s、T12、T13 和

Tg.各地震反射界面特征如下(图2、3):(1)T8反射界面:相当于新生界底部的地震反射,反射界面清晰,振幅强,连续性好,与下伏地层呈角度不整合接触;(2)T9反射界面:相当于下三叠统青龙组底界的地震反射,反射界面清晰,较强振幅,较连续反射;(3)T10反射界面:相当于下二叠统栖霞组顶界的地震反射,反射界面清晰,较强振幅,较连续反射;(4)T11反射界面:相当于下石炭统和州组底界的地震反射,反射界面清晰,较强振幅,较连续反射;(5)T11x反射界面:相当于上泥盆统五通组底界的地震反射,反射界面清晰,较强振幅,较连续反射;(6)T11s反射界面:相当于下志留统高家边组顶界,表现为中—强振幅,较连续—不连续反射;(7)T12反

地层系统				岩性	地震反射特征	地震反射界面
界	系	统	组			
新 生 界						
中生界	三叠系(T)	中统	周冲村组	灰岩夹薄层泥岩	强反射	T8
		下统	青龙组		近似空白反射	
	二叠系(P)	上统	大隆组	泥岩、细砂岩夹煤层	较强反射	T9
			龙潭组		弱反射	
		下统	孤峰组	灰岩,底部泥岩 富含沥青质	较强反射	T10
			栖霞组		近似空白反射	
	石炭系(C)	上统	船山组	灰岩	较强反射	T11
		中统	黄龙组		空白—杂乱反射	
			老虎洞组		较强反射	T11x
		下统	和州组		空白—杂乱反射	
			高骊山组	泥岩	中—强反射	T11s
			金陵组		中强振幅	
古生界	泥盆系(D)	上统	五通组	泥岩,底部含砂砾岩	较强反射	T12
		上统	茅山组		空白—杂乱反射	
		中统	坟头组		中—强反射	
	志留系(S)	下统	高家边组	泥页岩	中强振幅	
		上统	五峰组		较强反射	
			汤头组		空白—杂乱反射	
		中统	宝塔组		弱反射	T13
	奥陶系(O)		大田坝组	泥质灰岩	近似空白反射	
			牯牛潭组		弱反射	Tg
		下统	大湾组			
			红花园组			
			仓山组	白云岩		
	寒武系(C)	上统	观音台组	白云岩、灰岩		
		中统	炮台山组			
		下统	幕府山组	白云质灰岩、页岩		
上元古界	震旦系(Z)	上统	灯影组	白云岩夹硅质岩		
			陡山沱组	泥岩夹灰岩、砂岩		
				基底岩系		

图2 南黄海盆地中部隆起地层与地震反射特征对照

Fig.2 Comparison of strata and seismic reflection characteristics of the central uplift in the South Yellow Sea basin

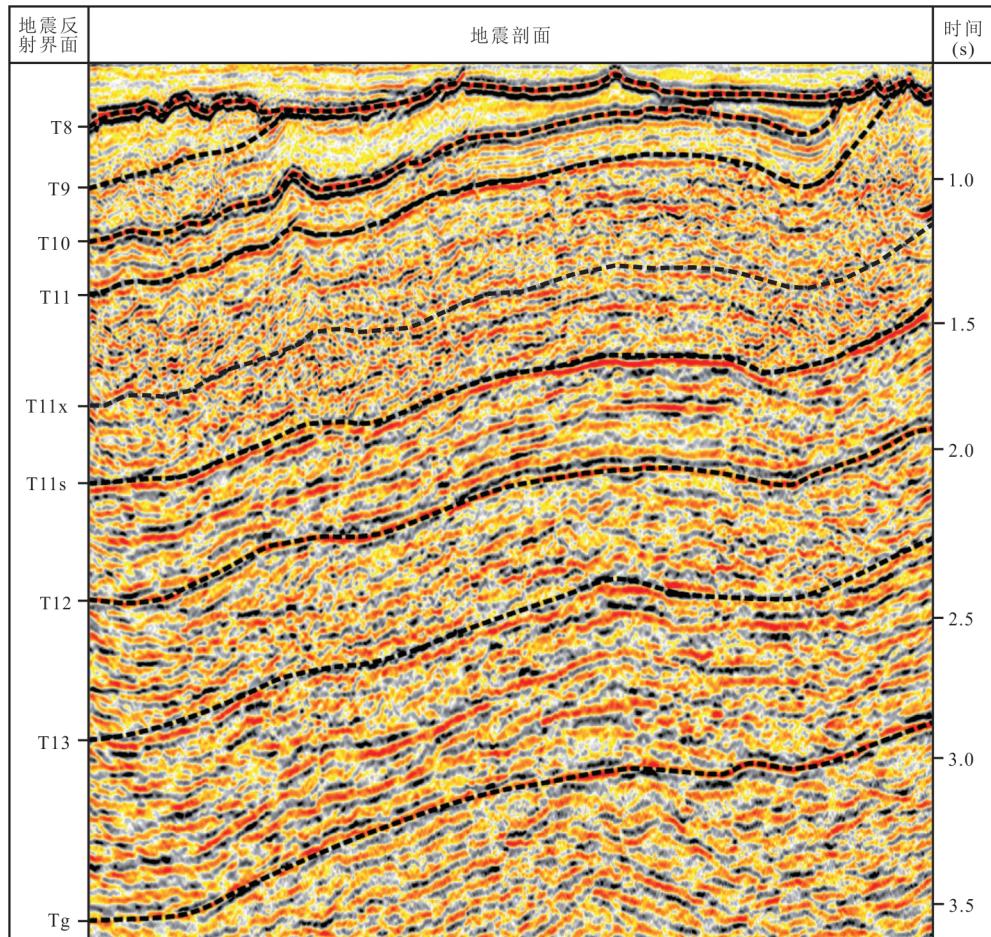


图3 南黄海盆地中部隆起地震反射界面波组特征(据陈建文等,2019修改)

Fig.3 Characteristics of seismic reflection interface wave group in the central uplift, the South Yellow Sea basin(after Chen et al., 2019)

射界面:相当于上奥陶统五峰组底界,表现为中一强振幅,连续性相对较差;(8)T13反射界面:相当于寒武系底界,中一低振幅,连续性差;(9)Tg反射界面:相当于震旦系底界,弱振幅,连续性差。

上述9个地震反射界面,共构成8个地震层序。地震层序I:对应T8—T9,反射能量弱、连续性较差的近似空白反射,钻井证实为下三叠统青龙组和中三叠统周冲村组,为一套灰岩夹薄层泥岩地层。地震层序II:对应T9—T10,中弱振幅、连续一较连续反射,钻井证实为下二叠统孤峰组—上二叠统大隆组,为一套泥岩夹砂岩为主的含煤地层。地震层序III:对应T10—T11,反射能量弱、近似空白反射,钻井证实为下石炭统和州组一下二叠统栖霞组,为一套灰岩为主的地层。地震层序IV:对应T11—T11x,内部反射能量弱,连续性较差,内部结构为空白一杂乱反射,经CSDP-2井证实为上泥盆统五通组一下石炭统高骊山组泥岩。地震层序V:对应

T11x—T11s,反射能量弱,连续性较差的空白一杂乱反射,CSDP-2井证实为中志留统坟头组—上志留统茅山组砂泥岩互层。地震层序VI:对应T11s—T12,中强振幅、连续一较连续反射,CSDP-2井证实为上奥陶统五峰组一下志留统高家边组泥页岩、泥灰岩、硅质页岩。地震层序VII:对应T12—T13层序,内部反射能量较弱,连续性较差,内部结构为亚平行一空白一杂乱反射,相当于寒武系—上奥陶统汤头组,为一套以碳酸盐岩夹泥质白云岩和泥岩的地层。地震层序VIII:对应T13—Tg层序,为一套近似空白反射,其地质属性相当于震旦系(张训华等,2014;杨艳秋等,2015;陈建文等,2019)。

3 构造组合样式

南黄海盆地中部隆起自古生代以来,先后经历了志留纪末加里东运动、三叠纪末印支运动、早侏罗世以来燕山幕式运动等多期构造运动的叠加改

造,形成了丰富多样的构造组合.

3.1 挤压构造

中部隆起内部挤压构造样式繁多、分布广泛,是中部隆起内最主要的构造特征.其中,最为典型的挤压构造是滑脱构造、高角度逆冲和对冲/背冲构造.

(1)滑脱构造:是指构造变形沿着某一滑脱面发生滑动、脱离,滑脱面上下两侧的构造变形相对独立.滑脱面的存在是滑脱构造发育的前提,产生滑脱面的地层往往是低强度和高应变的软弱层,滑脱构造的形成和演化过程中常常伴随逆冲和褶皱作用.滑脱构造也称薄皮构造,是指前陆沉积盖层在主滑脱面(基底)上滑脱变形,形成一套褶皱逆冲构造,而基底没有卷入变形,盖层变形与基底形成显著的不协调关系.中部隆起内部发育的滑脱构

造,滑脱面位于志留系底部的泥页岩(T12界面之上),滑脱面之上地层呈叠瓦状、逆冲推覆特征,“由北向南”递进式展布,滑脱构造向南止步于滑脱终止线位置,滑脱面之下地层平缓,未见挤压作用改造(图4).

这里需要指出的是,在南黄海盆地北部发育完整的前陆盆地系统,包含楔顶带、前渊带和前隆带(张柏林等,2015).其中,千里岩隆起与北部坳陷接触部位的逆冲带,对应于前陆盆地系统的楔顶带,发育基底卷入式逆冲构造;北部坳陷的东北凹和北凹,对应前陆盆地系统的前渊带,发育巨厚的侏罗系(高顺莉和周祖翼,2014);中部隆起大地构造位置,对应前陆盆地系统中的前隆带.在前陆地形形成过程中,由北向南的挤压应力逐渐减弱,因此,在中部隆起内部仅发育滑脱构造这种薄皮构造.

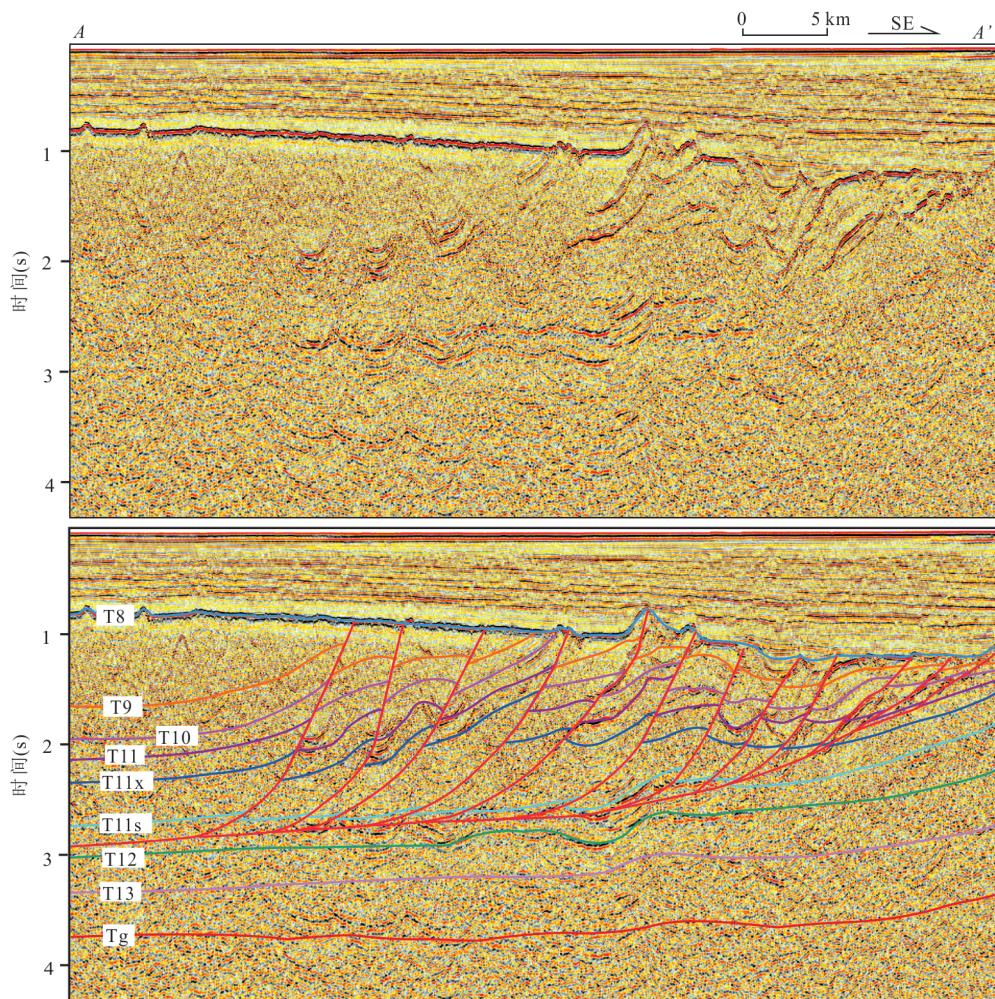


图4 南黄海盆地中部隆起滑脱构造地震剖面特征(剖面位置见图1)

Fig.4 Characteristics of detachment structure in seismic section of the central uplift, the South Yellow Sea basin (see Fig.1 for profile location)

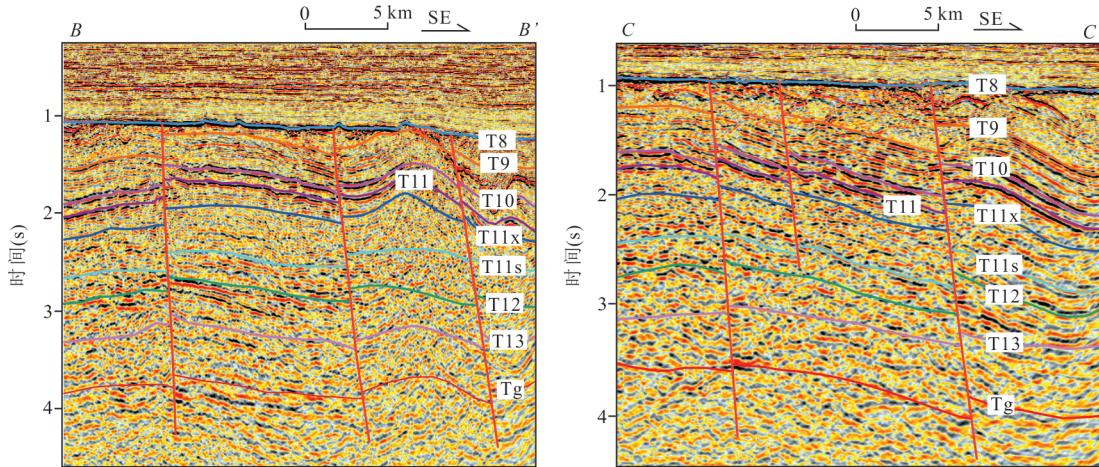


图5 南黄海盆地中部隆起高角度逆冲构造地震剖面特征(剖面位置见图1)

Fig.5 Characteristics of high angle thrust in seismic section of the central uplift, the South Yellow Sea basin (see Fig.1 for profile location)

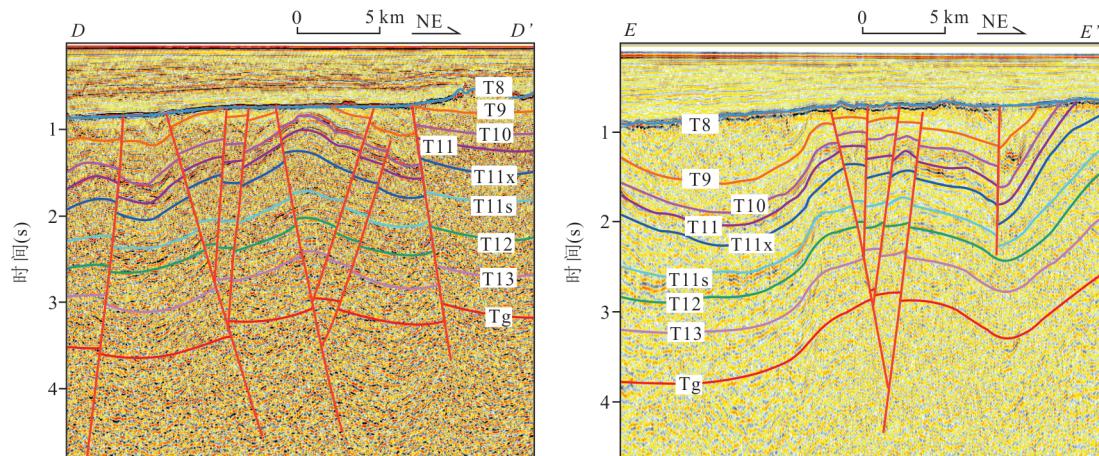


图6 南黄海盆地中部隆起走滑构造地震剖面特征(剖面位置见图1)

Fig.6 Characteristics of strike slip structure in seismic section of the central uplift, the South Yellow Sea basin (see Fig.1 for profile location)

(2)高角度逆冲:是指断穿结晶基底的大型逆冲构造.相对表层的各种逆冲断层而言,基底卷入逆冲构造规模更大,角度更陡,延伸距离更长.中部隆起南部发育基底卷入式逆冲构造,断裂大多断至Tg面,剖面上以叠瓦状逆冲为主(图5),断裂位移较大,甚至将基底及下古生界逆冲至浅部地层,在平面上呈雁列式展布特征.

(3)对冲构造与背冲构造:两条逆断层倾向相背,挤压位移将它们各自的上盘断块逆冲到它们公共的下盘断块之上,使它们中间的公共下盘断块相对向下陷落,这种构造称为对冲构造;两条断层倾向相对,其位移会使它们中间的公共上盘断块相对向上抬升,这种构造样式称之为背冲构造.中部隆起的滑脱构造与基底高角度逆冲构造的交汇处,发

育大量对冲构造和背冲构造,断裂互相交切,使构造组合样式变得复杂多样.

3.2 走滑构造

中部隆起发育的走滑构造主要为正花状构造、y字型构造.

(1)正花状构造样式:主干走滑断层与伴生的分支断层构成的上宽下窄、似“花朵”状的破裂带称为花状构造.其中,正花状构造是在压扭作用下产生的,其大多数断层具逆断距,个别断层表现为正断距组成的地层背斜特征,断层间为地垒断片.正花状构造表明断层在走滑同时局部受到挤压,或者是在斜向聚敛走滑作用下形成的.中部隆起内发育的正花状构造,由一条陡立走滑断层和伴生逆断层组成的背冲构造,被切断地层呈背形(图6),具有左

旋剪切性质。这里值得指出的是,本次研究识别的两条 NW-SE 向走滑断层,位于中部隆起的东南部、中西部(平面分布位置见图 1),整体表现为左旋剪切特征,推测上述走滑断层与苏北盆地、南黄海盆地南部坳陷之间的 NW-SE 向边界走滑断层(苏北—滨海断裂)具有相似的形成机制,需要更为深入的对比研究。

(2)y字型构造:由主干断层与分支断层组成的 y 字型构造样式,构造变形主要发育在主干断层的上盘。根据主干断层与分支断层的组合特征,进一步可以划分为正 y 字型和反 y 字型构造样式。y 字型构造样式具有一定的走滑性质,因此可以看作是简化版的正花状构造,起到局部重力或应力调节作用。

3.3 伸展构造

中部隆起内的伸展作用比较微弱,伸展构造主要作为中部隆起与北部坳陷、南部坳陷的边界断层,表现出上陡下缓的铲式正断层特征,标志着南黄海盆地北部坳陷、南部坳陷在此时开始形成、接受沉积。同时,在中部隆起局部发育的残余次洼,也可见少量伸展构造组合。

4 构造单元划分

本文划分中部隆起的次级构造单元,主要依据滑脱构造终止部位(即滑脱终止线)和 NW-SE 向走滑断层的展布特征。其中,滑脱构造由北向南推进,在中部隆起形成一条近东、西走向的滑脱构造终止线,将中部隆起分隔为南、北两部分;两条 NW-SE

向展布的走滑断层,又将中部隆起分为西、中、东 3 块。因此,在中部隆起可划分出 6 个次级构造单元:西北部滑脱揉皱区、中北部滑脱推覆区、东北部弱滑脱区、西南部前锋冲断带、中南部弱变形区和东南部稳定区(图 7)。

各次级构造单元分别具有相对独立的构造组合样式(图 7、8)。(1)西北部滑脱揉皱区:主要经历晚三叠世印支运动华北板块与下扬子板块碰撞造山引起的挤压作用。由于该区比其他次级构造单元更为靠近苏鲁造山带,因此是中部隆起内滑脱作用最强烈的区域,滑脱构造常常伴随地层的揉皱。(2)西南部前锋冲断带:主要经历早侏罗世古太平洋板块相对欧亚板块俯冲引起的挤压作用,形成对冲、背冲、正花状构造、正 y 字型构造、反 y 字型构造、高角度逆冲等多种挤压构造样式。(3)中北部滑脱推覆区:以滑脱推覆构造为主,但挤压作用整体小于东北部滑脱揉皱区。(4)中南部弱变形区:与西南部前锋冲断带类似,主要发育对冲、背冲、正花状构造和高角度逆冲等构造样式。(5)东北部弱滑脱区:仍以发育滑脱构造为主,但滑脱构造的范围和强度明显小于西北部滑脱揉皱区和中北部滑脱推覆区。(6)东南部稳定区:地层未见明显的构造作用改造,仅局部发育对冲、背冲、高角度逆冲等构造样式。

从中部隆起内部各次级构造单元的构造样式特征中可以看出:挤压作用强度“由北至南”、“由西至东”呈现逐渐减弱的趋势,其中“西北部滑脱揉皱区”挤压作用最强,以发育滑脱揉皱构造为代表;“东南部稳定区”挤压改造作用最弱,仅局部发育对

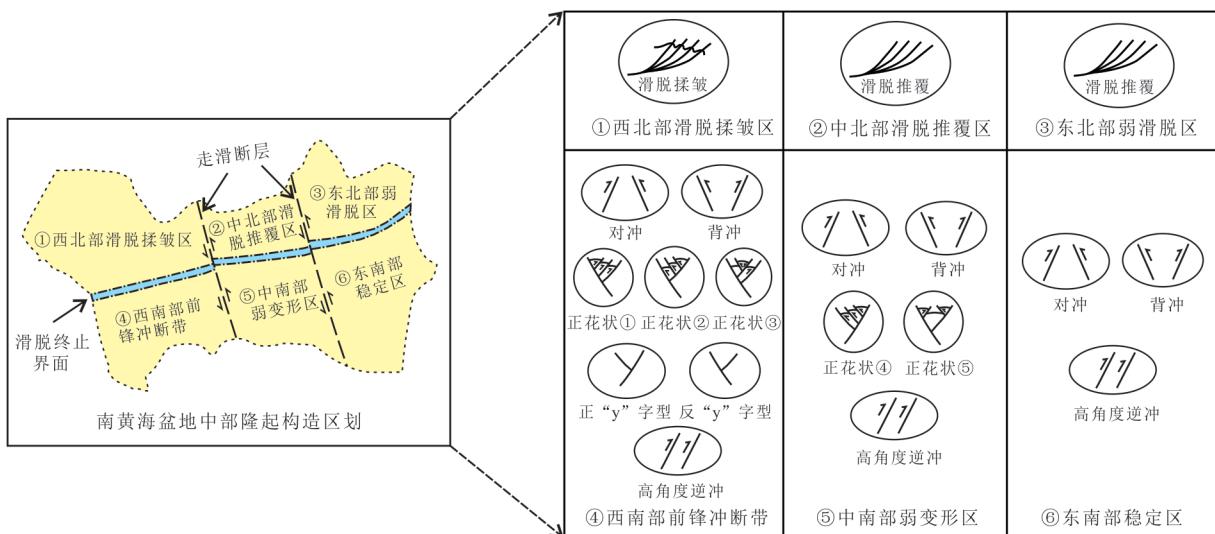


图 7 南黄海盆地中部隆起构造单元划分及典型构造样式

Fig.7 Division of structural units and typical structural styles of the central uplift in the South Yellow Sea basin

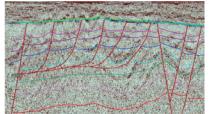
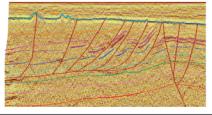
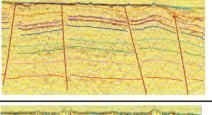
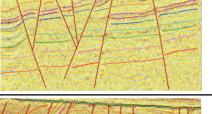
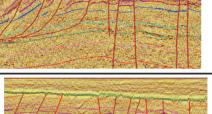
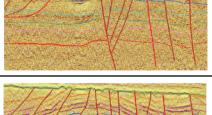
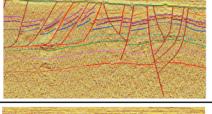
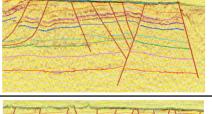
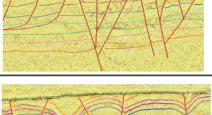
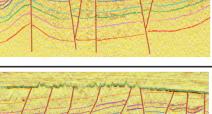
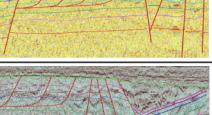
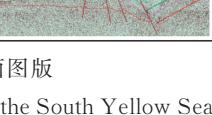
构造样式类型		发育特征	分布位置	典型地震剖面
逆冲构造样式	滑脱揉皱		西北部揉皱推覆区	
	滑脱推覆		中北部滑脱推覆区、东北部弱滑脱区	
	高角度逆冲		西南部前峰冲断带、中南部弱变形区、东南部稳定区	
	对冲		西南部前峰冲断带、中南部弱变形区、东南部稳定区	
	背冲		西南部前峰冲断带、中南部弱变形区、东南部稳定区	
走滑构造样式	正花状①		位于西南部前峰冲断带,且靠近中南部弱变形区	
	正花状②		位于西南部前峰冲断带,且靠近中南部弱变形区	
	正花状③		位于西南部前峰冲断带,且靠近中南部弱变形区	
	正花状④		位于中南部弱变形区,且靠近东南部稳定区	
	正花状⑤		位于中南部弱变形区,且靠近东南部稳定区	
	正“y”字型		西南部前峰冲断带	
	反“y”字型		西南部前峰冲断带	
伸展构造样式	正断(北倾)		位于研究区北部,作为中部隆起与北部坳陷的边界断裂	
	正断(南倾)		位于研究区南部,作为中部隆起与南部坳陷的边界断裂	

图8 南黄海盆地中部隆起典型构造样式及地震剖面图版

Fig.8 Atlas of typical structural styles and seismic profiles in central uplift, the South Yellow Sea basin

冲、背冲、高角度逆冲等构造样式。在东西走向上,由“西北部滑脱揉皱区”到“中北部滑脱推覆区”,再到“东北部弱滑脱区”,标志着挤压引起的滑脱特征“由西向东”逐渐减弱;而在南北走向上,滑脱构造“由北向南”呈递进式展布,逐渐消失于滑脱终止界面。

5 成因机制探讨

南黄海盆地中部隆起位于下扬子板块东北缘,且处于古亚洲构造域、滨太平洋构造域和特提斯构造域的核心区域(李三忠等,2010),自古生代以来,先后经历了:(1)志留纪末加里东运动下扬子板块与华夏板块的碰撞贴合;(2)三叠纪末印支运动下扬子与华北板块的碰撞造山;(3)早侏罗世以来伴随古太平洋板块俯冲方向和俯冲角度的变化引起的燕山幕式运动等多期构造运动的叠加改造。构造运动与南黄海中部隆起构造样式的时空展布、发育期次和成因机制之间,表现出良好的耦合关系。尤其是三叠纪末印支运动下扬子与华北板块之间的碰撞造山作用,彻底改变了中部隆起中—古生代海相地层的构造形态,既代表着中部隆起中—古生代构造演化阶段的落幕,也拉开了中部隆起新生代以

来构造演化的序幕。

本文在南黄海盆地中部隆起构造样式研究的基础上,结合区域应力场和深部地球动力学背景,明确了中部隆起构造样式的发育期次、成因机制(图9),系统梳理了南黄海盆地中部隆起的构造演化历程(图10)。

(1)志留纪末:加里东运动。早古生代期间,华夏板块向扬子板块俯冲,华南洋呈脉冲式收缩,引发志留纪末加里东运动,华南洋消失后下扬子板块和华夏板块碰撞拼合(姚永坚等,2008)。加里东运动使下扬子地区长期隆升剥蚀,南黄海盆地中部隆起内部缺失上志留统和中、下泥盆统。

(2)三叠纪末:印支运动。三叠纪末印支运动是中国东部大地构造格局的重要转折期,自此,中国东部由古亚洲构造域转向滨太平洋构造域。随着早三叠世晚期秦岭洋的闭合,扬子板块快速北移,并于三叠纪末与华北板块发生碰撞,形成秦岭—大别—苏鲁造山带(万天丰和朱鸿,2002; Li et al., 2017)。印支运动彻底改变了中国东部古生代盆地的发展趋势,使早期的盆地原型经受了翻天覆地的改造。

受三叠纪末印支运动下扬子与华北板块之间碰撞造山作用的影响,在南黄海盆地北部形成完整

早	序号	构造样式	构造特征	发育部位	形成时间	成因机制	应力方向
	1	滑脱构造	叠瓦状逆冲推覆特征,由北向南推进式展布	位于中部隆起北部,滑脱面位于志留系底部的泥页岩,滑脱面之下地层平缓	三叠纪末印支运动	华北板块与下扬子板块碰撞造山作用,引起的近N-S向挤压	
	2	高角度逆冲	逆冲断层延伸至基底,剖面呈叠瓦状、平面呈雁列式	位于中部隆起南部	早侏罗世、早燕山运动	古太平洋板块初始高速、低角度NW向俯冲,引起的NW-SE向挤压	
	3	正花状构造	左旋走滑剪切引起的正花状构造	位于中部隆起东南部和中西部	早白垩世	古太平洋板块低角度俯冲由NW向转为NNW向,导致中国东部左旋剪切	
晚	4	伸展正断	铲式正断层	位于中部隆起南北边界,南黄海盆地南部坳陷、北部坳陷开始形成,接受沉积	晚白垩世、晚燕山运动	古太平洋板块由低角度俯冲转为高角度俯冲,引起NNW-SSE向拉张	

图9 中部隆起构造特征及成因机制

Fig.9 Structural characteristic and its genetic mechanism of the central uplift

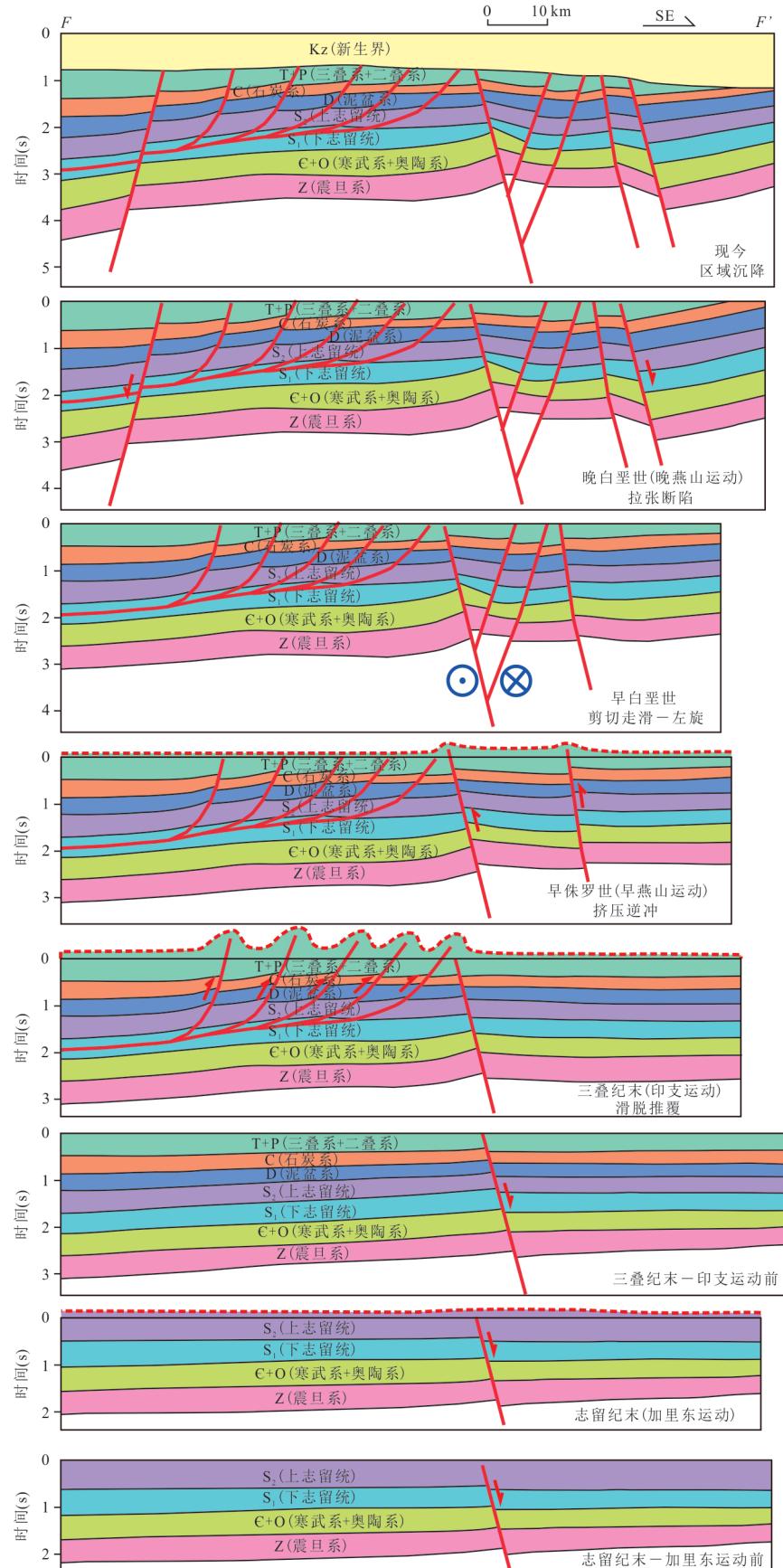


图10 南黄海盆地中部隆起构造演化剖面(剖面位置见图1)

Fig.10 Structural evolution section of the central uplift, the South Yellow Sea basin(see Fig.1 for profile location)

的前陆盆地系统(千里岩隆起的楔顶带、北部坳陷的前渊带、中部隆起的前隆带),挤压作用强度由北向南逐步递减,仅在中部隆起北部发育一系列由北向南递进式展布的滑脱构造(薄皮构造)。

(3)早侏罗世:早燕山运动。进入早侏罗世,中国东部深部地球动力学背景和区域应力场又发生了巨大的转变,古太平洋板块开始以 NW 向高速、低角度向相对欧亚板块俯冲(朱光等,2018),标志着中国东部以挤压增厚为主的早燕山运动的开始(赵越等,2004)。南黄海盆地此时,经历 NW-SE 向的挤压应力作用,在中部隆起南部发育基底卷入式逆冲构造,剖面上呈叠瓦状、平面上呈雁列式展布。

(4)早白垩世。在早白垩世时期,古太平洋板块的低角度俯冲方向由 NW 向转变为 NNW 向,使得中国东部经历强烈的左旋剪切作用改造,郯庐断裂带即在此时发生强烈的左行平移(朱光等,2018)。在南黄海盆地中部隆起内部,可识别出 2 条同期发育的 NW-SE 向走滑断层,位于中部隆起东南部、中西部,在地震剖面上表现为由主干走滑断层与伴生的分支断层组成的正花状构造和 y 字型构造。中部隆起内部发育的 NW-SE 向走滑断层,推测与苏北盆地、南黄海盆地南部坳陷之间的 NW-SE 向边界走滑断层(苏北—滨海断裂)具有相似的形成机制。

(5)晚白垩世:晚燕山运动。晚白垩世,古太平洋板块俯冲角度逐渐变陡,导致地幔上涌、板片后撤,中国东部构造应力体制发生了根本性的转折,由挤压应力环境转换为区域性拉张应力环境,标志着中国东部开始了以伸展减薄为主的晚燕山运动(赵越等,2004)。在南黄海盆地中部隆起南北边界,发育上陡下缓的铲式正断层。南黄海盆地北部坳陷、南部坳陷从此形成、开始接受沉积,也标志着南黄海盆地新生代演化的开启。

6 结论

(1)南黄海盆地中部隆起发育挤压(滑脱推覆、高角度逆冲、对冲/背冲)、走滑(正花状、y 字型)、伸展(铲式正断层)等多种构造组合样式。其中,走滑断层属于在中部隆起首次提出,并明确了走滑断层的走向和分布。

(2)构造样式时空展布特征:①滑脱构造主要位于中部隆起北部,呈叠瓦状逆冲推覆特征,“由北向南”递进式展布,滑脱面位于志留系底部的泥页岩,滑脱面之下地层平缓;②高角度逆冲位于中部

隆起南部,逆冲断层一直延伸到基底,剖面上呈叠瓦状、平面上呈雁列式展布;③NW-SE 向走滑断层主要表现为左旋剪切引起的正花状构造,位于中部隆起东南部、中西部;④伸展正断表现为铲式正断层特征,发育在中部隆起南北边界,即在中部隆起与南黄海盆地南部坳陷、北部坳陷的接触部位。

(3)依据滑脱构造终止线和中部隆起内部 2 条走滑断层的展布,可将中部隆起进一步划分为 6 个次级构造单元:西北部滑脱揉皱区、中北部滑脱推覆区、东北部弱滑脱区、西南部前锋冲断带、中南部弱变形区和东南部稳定区。各次级构造单元具有不同的构造组合样式。

(4)构造样式的成因机制:①滑脱构造应力机制来源于三叠纪末印支运动时期华北板块与下扬子板块之间的碰撞造山作用;②高角度逆冲的应力机制来源于早侏罗世早燕山运动时期,古太平洋板块相对于欧亚板块的初始高速、低角度 NW 向俯冲;③走滑断层对应于早白垩世,古太平洋板块低角度俯冲由 NW 向转变为 NNW 向引起的左旋剪切作用,中国东部郯庐断裂在该时期也表现为左旋剪切特征;④伸展正断对应于晚白垩世晚燕山运动时期,古太平洋板块由低角度俯冲转为高角度俯冲,此时中国东部构造应力体制经历着由挤压向拉张的转换。

References

- Cai, L. X., Xiao, G. L., Guo, X. W., et al., 2019. Assessment of Mesozoic and Upper Paleozoic Source Rocks in the South Yellow Sea Basin Based on the Continuous Borehole CSDP-2. *Marine and Petroleum Geology*, 101: 30–42. <https://doi.org/10.1016/j.marpgeo.2018.11.028>
- Chen, C. F., Shi, J., Xu, D. H., et al., 2018. Formation and Tectonic Evolution of Laoshan Uplift of South Yellow Sea Basin and Its Effect on Hydrocarbon Accumulation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(3): 55–65 (in Chinese with English abstract).
- Chen, H. S., Zhang, Y. H., Xu, S. W., et al., 1999. The Lithosphere Structures and Oil and Gas Resources Evaluation in Lower Yangtze and Adjacent Area. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Chen, J. W., Lei, B. H., Liang, J., et al., 2018. New Progress of Petroleum Resources Survey in South Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(3): 1–23 (in Chinese with English abstract).

- Chen, J.W., Yuan, Y., Shi, J., et al., 2019. "High, Rich, and Strong" Seismic Technologies for Deeper Layers in Offshore China and Discoveries in Marine Strata of South Yellow Sea Basin. *Natural Gas Exploration and Development*, 42(3): 46—57(in Chinese with English abstract).
- Dai, C.S., Li, G., Cai, F., et al., 2003. The Pretertiary and Its Hydrocarbon Exploration Targets in Yellow Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 17(4): 225—231 (in Chinese with English abstract).
- Gao, S.L., Zhang, M.Q., Chen, H., 2014. A Large-Scale Seismic Source, Deep Gun and Cable Sinking and Long Cable Penth Application in Mesozoic-Paleozoic Basin in the South Huanghai Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 34(1): 95—101(in Chinese with English abstract).
- Gao, S.L., Zhou, Z.Y., 2014. Discovery of the Jurassic Stra-ta in the North-East Sag of South Yellow Sea. *Geological Journal of China Universities*, 20(2): 286—293(in Chinese with English abstract).
- Han, Z.Z., Liu, H., Xu, H., et al., 2015. Geological Evolution and Basin-Range Coupling Relationship of the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 31(4): 55—62(in Chinese with English abstract).
- Hao, T.Y., Huang, S., Xu, Y., et al., 2010. Geophysical Understandings on Deep Structure in Yellow Sea. *Chinese Journal of Geophysics*, 53(6): 1315—1326(in Chinese with English abstract).
- Hao, T.Y., Mancheol, S., Wang, Q.S., et al., 2002. A Study on the Extension of Fault Zones in Yellow Sea and Its Adjacent Areas Based on Gravity Data. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(3): 385—397(in Chinese with English abstract).
- Lei, B.H., Chen, J.W., Liang, J., et al., 2018. Tectonic Deformation and Evolution of the South Yellow Sea Basin since Indosian Movement. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(3): 45—54(in Chinese with English abstract).
- Li, H.J., 2014. The Tectonic Division of the Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 30(10): 8—13(in Chinese with English abstract).
- Li, H.J., Lin, N.T., Jin, X., et al., 2012. The Fracturing Characteristics of Mesozoic and Paleozoic Eras in Laoshan Uplift of South Yellow Sea Basin. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 31(6): 69—75(in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Jahn, B.M., Zhao, S.J., et al., 2017. Triassic Southeastward Subduction of North China Block to South China Block: Insights from New Geological, Geo-physical and Geochemical Data. *Earth-Science Reviews*, 166: 270—285. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.01.009>
- Li, S.Z., Suo, Y.H., Dai, L.M., et al., 2010. Development of the Bohai Bay Basin and Destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers*, 17(4): 64—89(in Chinese with English abstract).
- Li, W.Y., Liu, Y.X., Xu, J.C., 2014. Onshore-Offshore Structure and Hydrocarbon Potential of the South Yellow Sea. *Journal of Asian Earth Sciences*, 90: 127—136. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2014.04.024>
- Pang, Y.M., Zhang, X.H., Guo, X.W., et al., 2017. Basin Modeling in the Initial Stage of Exploration: A Case Study from the North Subbasin of the South Yellow Sea Basin. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(9): 65—78. <https://doi.org/10.1007/s13131-017-1112-1>
- Pang, Y.M., Zhang, X.H., Guo, X.W., et al., 2017. Mesozoic and Cenozoic Tectono-Thermal Evolution Modeling in the Northern South Yellow Sea Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 60(8): 3177—3190(in Chinese with English abstract).
- Ren, J.S., Zhu, J.B., Li, C., et al., 2019. Is the Qinling Orogen an Indosian Collisional Orogenic Belt? *Earth Science*, 44(5): 1476—1486 (in Chinese with English abstract)
- Wan, T.F., Zhu, H., 2002. Tectonics and Environment Change of Meso-Cenozoic in China Continent and Its Adjacent Areas. *Geoscience*, 16(2): 107—120(in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Li, H.J., Zhang, Y.G., 2010. Stratigraphic Geologic Attribute and Hydrocarbon Geology in Laoshan Uplift of South Yellow Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(2): 95—102(in Chinese with English abstract).
- Wang, J.H., Li, Q.Z., Qiu, R., 2003. Energy Shielding Action of Shallow Strong Reflector. *Oil Geophysical Prospecting*, 38(6): 589—596, 602(in Chinese with English abstract).
- Wang, M.J., Chen, X., Lei, B.H., et al., 2018. Current Status and Problems of Oil and Gas Exploration in South Yellow Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 34(11): 20—25(in Chinese with English abstract).
- Wang, W., Chen, G., Wang, J.L., et al., 1999. Analysis for Regional Structural Characteristics of North Jiangsu-South Yellow Sea Basin. *Journal of Seismology*, (1):

- 49—57(in Chinese with English abstract).
- Xiao, G.L., Cai, L.X., Guo, X.W., et al., 2019. Mesozoic-Paleozoic Petroleum Geological Characteristics Revealed by CSDP-2 Well in the South Yellow Sea of the "Continental Shelf Drilling Program". *Marine Geology Frontiers*, 35(8): 73—76(in Chinese with English abstract).
- Xu, H., Zhang, H.Y., Zhang, B.L., et al., 2015. Characteristics of the 26 Wells from the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 31(4): 1—6(in Chinese with English abstract).
- Xu, J.Y., Zhu, X.F., Song, Y., et al., 2019. Geochemical Characteristics and Oil-Source Correlation of Paleogene Source Rocks in the South Yellow Sea Basin. *Earth Science*, 44(3):848—858(in Chinese with English abstract).
- Yang, C.Q., Dong, H.P., Li, G., 2014. Formation and Tectonic Evolution of the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology Frontiers*, 30(7): 17—21, 33(in Chinese with English abstract).
- Yang, Y.Q., Yi, C.Y., Li, G., 2015. Sequence Stratigraphic Identification and Geologic Age Inference of Seismic Profiles in Central Uplift, South Yellow Sea. *Marine Origin Petroleum Geology*, 20(4): 49—56(in Chinese with English abstract).
- Yao, Y.J., Feng, Z.Q., Hao, T.Y., et al., 2008. A New Understanding of the Structural Layers in the South Yellow Sea Basin and Their Hydrocarbon-Bearing Characteristics. *Earth Science Frontiers*, 15(6): 232—240(in Chinese with English abstract).
- Zhang, B.L., Xu, H., Lu, Y.C., et al., 2015. Preliminary Analysis of the South Yellow Sea Foreland Basin System and Its structural-Depositional Characteristics. *Marine Geology Frontiers*, 31(4): 35—41(in Chinese with English abstract).
- Zhang, M. H., Xu, D. S., Chen, J. W., 2007. Geological Structure of the Yellow Sea Area from Regional Gravity and Magnetic Interpretation. *Applied Geophysics*, 4(2): 75—83. <https://doi.org/10.1007/s11770-007-0011-1>
- Zhang, X.H., Yang, J.Y., Li, G., et al., 2014. Basement Structure and Distribution of Mesozoic-Paleozoic Marine Strata in the South Yellow Sea Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 57(12): 4041—4051(in Chinese with English abstract).
- Zhang, X.H., Zhang, X.H., Wu, Z.Q., et al., 2018. New Understanding of Mesozoic-Paleozoic Strata in the Central Uplift of the South Yellow Sea Basin from the Drilling of well CSDP-02 of the "Continental Shelf Drilling Program". *Chinese Journal of Geophysics*, 61(6):2369—2379(in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y., Xu, G., Zhang, S.H., et al., 2004. Yanshanian Movement and Conversion of Tectonic Regimes in East Asia. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 319—328(in Chinese with English abstract).
- Zheng, Q.G., Cai, L.G., Ding, W.L., et al., 2005. Development and Evolution of Basins in Yellow Sea. *Oil & Gas Geology*, 26(5): 647—654(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Liu, C., Gu, C.C., et al., 2018. Oceanic Plate Subduction History in the Western Pacific Ocean: Constraint from Late Mesozoic Evolution of the Tan-Lu Fault Zone. *Scientia Sinica (Terra)*, 48(4): 415—435(in Chinese).
- Zhu, W.L., Wang, G.C., 2000. New Venture of Exploration of Pre-Cenozoic Oil and Gas in Chinese Offshore Areas. *Earth Science Frontiers*, 7(3): 215—226(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈春峰, 施剑, 徐东浩, 等, 2018. 南黄海崂山隆起形成演化及对油气成藏的影响. *海洋地质与第四纪地质*, 38(3): 55—65.
- 陈沪生, 张永鸿, 徐师文, 等, 1999. 下杨子及邻区岩石圈结构构造特征与油气资源评价. 北京: 地质出版社.
- 陈建文, 雷宝华, 梁杰, 等, 2018. 南黄海盆地油气资源调查新进展. *海洋地质与第四纪地质*, 38(3): 1—23.
- 陈建文, 袁勇, 施剑, 等, 2019. 中国海域深部“高富强”地震探测技术与南黄海盆地海相地层的发现. 天然气勘探与开发, 42(3): 46—57.
- 戴春山, 李刚, 蔡峰, 等, 2003. 黄海前第三系及油气勘探方向. *中国海上油气(地质)*, 17(4): 225—231.
- 高顺莉, 张敏强, 陈华, 2014. 大震源长缆深沉积地震采集技术在南黄海中古生代盆地的应用. *海洋地质与第四纪地质*, 34(1): 95—101.
- 高顺莉, 周祖翼, 2014. 南黄海盆地东北凹侏罗纪地层的发现及其分布特征. *高校地质学报*, 20(2): 286—293.
- 韩宗珠, 刘涵, 许红, 等, 2015. 南黄海盆地盆山耦合作用与地质演化. *海洋地质前沿*, 31(4): 55—62.
- 郝天珧, 黄松, 徐亚, 等, 2010. 关于黄海深部构造的地球物理认识. *地球物理学报*, 53(6): 1315—1326.
- 郝天珧, Mancheol, S., 王谦身, 等, 2002. 根据重力数据研究黄海周边断裂带在海区的延伸. *地球物理学报*, 45(3): 385—397.
- 雷宝华, 陈建文, 梁杰, 等, 2018. 印支运动以来南黄海盆地的构造变形与演化. *海洋地质与第四纪地质*, 38(3): 45—54.
- 李慧君, 2014. 南黄海盆地海相中—古生界构造区划. 海洋

- 地质前沿, 30(10): 8—13.
- 李慧君, 林年添, 金兴, 等, 2012. 南黄海盆地崂山隆起中、古生界断裂特征. 山东科技大学学报(自然科学版), 31(6): 69—75.
- 李三忠, 索艳慧, 戴黎明, 等, 2010. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地学前缘, 17(4): 64—89.
- 庞玉茂, 张训华, 郭兴伟, 等, 2017. 南黄海北部盆地中、新生代构造热演化史模拟研究. 地球物理学报, 60(8): 3177—3190.
- 任纪舜, 朱俊宾, 李崇, 等, 2019. 秦岭造山带是印支碰撞造山带吗? 地球科学, 44(5): 1476—1486.
- 万天丰, 朱鸿, 2002. 中国大陆及邻区中生代—新生代大地构造与环境变迁. 现代地质, 16(2): 107—120.
- 王丰, 李慧君, 张银国, 2010. 南黄海崂山隆起地层属性及油气地质. 海洋地质与第四纪地质, 30(2): 95—102.
- 王建花, 李庆忠, 邱睿, 2003. 浅层强反射界面的能量屏蔽作用. 石油地球物理勘探, 38(6): 589—596, 602.
- 王明健, 陈晞, 雷宝华, 等, 2018. 南黄海盆地油气勘探现状及存在问题. 海洋地质前沿, 34(11): 20—25.
- 王巍, 陈高, 王家林, 等, 1999. 苏北南黄海盆地区域构造特征分析. 地震学刊, (1): 49—57.
- 肖国林, 蔡来星, 郭兴伟, 等, 2019. 大陆架科学钻探CSDP-2井揭示的南黄海中—古生界油气地质特征. 海洋地质前沿, 35(8): 73—76.
- 徐建永, 朱祥峰, 宋宇, 等, 2019. 南黄海盆地古近系烃源岩地球化学特征及油源对比. 地球科学, 44(3): 848—858.
- 许红, 张海洋, 张柏林, 等, 2015. 南黄海盆地26口钻井特征. 海洋地质前沿, 31(4): 1—6.
- 杨艳秋, 易春燕, 李刚, 2015. 南黄海中部隆起地震层序地层的识别及其地质时代探讨. 海相油气地质, 20(4): 49—56.
- 杨长清, 董贺平, 李刚, 2014. 南黄海盆地中部隆起的形成与演化. 海洋地质前沿, 30(7): 17—21, 33.
- 姚永坚, 冯志强, 郝天珧, 等, 2008. 对南黄海盆地构造层特征及含油气性的新认识. 地学前缘, 15(6): 232—240.
- 张柏林, 许红, 陆永潮, 等, 2015. 南黄海前陆盆地系统及沉积—构造特征. 海洋地质前沿, 31(4): 35—41.
- 张晓华, 张训华, 吴志强, 等, 2018. 南黄海中部隆起中—古生代地层发育新认识——基于大陆架科学钻探CSDP-02井钻探成果. 地球物理学报, 61(6): 2369—2379.
- 张训华, 杨金玉, 李刚, 等, 2014. 南黄海盆地基底及海相中、古生界地层分布特征. 地球物理学报, 57(12): 4041—4051.
- 赵越, 徐刚, 张拴宏, 等, 2004. 燕山运动与东亚构造体制的转变. 地学前缘, 11(3): 319—328.
- 郑求根, 蔡立国, 丁文龙, 等, 2005. 黄海海域盆地的形成与演化. 石油与天然气地质, 26(5): 647—654.
- 朱光, 刘程, 顾承串, 等, 2018. 郊庐断裂带晚中生代演化对西太平洋俯冲历史的指示. 中国科学(地球科学), 48(4): 415—435.
- 朱伟林, 王国纯, 2000. 中国近海前新生代油气勘探新领域探索. 地学前缘, 7(3): 215—226.