

赵利, 李理. 渤海湾盆地晚中生代以来伸展模式及动力学机制[J]. 中国地质, 2016, 43(2): 470–485.

Zhao Li, Li Li. The extensional pattern and dynamics of Bohai Bay basin in Late Mesozoic–Cenozoic[J]. Geology in China, 2016, 43(2): 470–485 (in Chinese with English abstract).

## 渤海湾盆地晚中生代以来伸展模式及动力学机制

赵 利<sup>1,2,3</sup> 李 理<sup>3</sup>

(1. 同济大学 海洋与地球科学学院, 上海 200092; 2. 中石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214216;  
3. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**通过分析盆地区大陆伸展模型参数、火成岩地球化学特征时空演化、岩石圈分层伸展几何学和运动学、应力场–变形场的匹配和演化, 文章对渤海湾盆地晚中生代以来伸展断陷的动力学过程进行了系统讨论。晚中生代, 盆地北、西部以变质核杂岩模式伸展, 南、东部以宽裂陷模式伸展; 在岩石圈伸展过程中, 地壳变形方式为简单剪切, 岩石圈地幔变形方式为纯剪切; 盆地处于洋壳俯冲背景下弧后伸展区, 盆地及西、北部隆起区岩石圈地幔为 EM1 型, 而南、东部隆起区受扬子板块俯冲改造造成类似 EM2 型; 盆地变形的力源为板块相对运动产生的引张力, 以及郯庐断裂的走滑作用。新生代, 渤海湾盆地以窄裂陷模式伸展, 地壳和岩石圈地幔变形方式均为纯剪, 但岩石圈地幔伸展强度大于地壳; 盆地处于大陆内裂谷环境, 软流圈地幔上涌并改造岩石圈地幔, 且盆地裂陷的力源以软流圈地幔上涌产生的引张力为主。

**关键词:**大陆伸展; 火成岩; 应力场; 晚中生代–新生代; 渤海湾盆地

中图分类号: P542<sup>+</sup>.3; P511.1; P551

文献标志码: A

文章编号: 1000–3657(2016)02–0470–16

### The extensional pattern and dynamics of Bohai Bay basin in Late Mesozoic–Cenozoic

ZHAO Li<sup>1,2,3</sup>, LI Li<sup>3</sup>

(1. School of Ocean & Earth Science, Tongji University, Shanghai 20092, China;

2. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi 214126, Jiangsu, China; 3. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

**Abstract:** Based on analyzing the model parameters of continental extension, the temporal-spatial evolution of igneous rock's geochemical characteristics, the geometry and kinematics of multi-level extension within lithosphere, the match and evolution between stress and deformation fields, this paper focuses on the Bohai Bay basin and its adjacent areas to discuss the dynamic mechanism of rifting in Late Mesozoic–Cenozoic. The continent extended by the way of core complex mode in the north and west of Bohai Bay basin, but by the way of wide rift mode in the south and east in Late Mesozoic. In the process of lithospheric

收稿日期: 2015–04–15; 改回日期: 2015–10–18

基金项目: 国家自然科学基金项目(40772132)资助。

作者简介: 赵利, 男, 1988年生, 博士, 地质学专业; E-mail: orchidy@126.com。

extension, the crust was deformed by simple shear whereas the lithospheric mantle deformed by pure shear. In addition, the geochemical characteristics of igneous rock indicate that the basin was located in a back-arc tensional regime due to the subduction of ocean crust, the lithospheric mantle was of EM1 pattern under the basin and in its north and west, whereas the lithospheric mantle was of the EM2-like pattern in the south and the east of the basin because of the subduction of Yangtze plate. Combined with the stress and deformation fields of the basin, the stress source of rifting should be the tension mainly generated by the relative motion within the plate, and the basin was transformed by the strike slip of Tanlu fault. However, the continent extended by the way of narrow rift mode within Bohai Bay basin in Cenozoic. Additionally, the crust and the lithospheric mantle were deformed exclusively by pure shear, but the latter extended more intensively. On the other hand, the geochemical characteristics of igneous rocks indicate that the basin was involved in the continental rift, and the asthenosphere upwelled and transformed the lithospheric mantle. Apparently, the tension produced by the upwelling of asthenosphere played the crucial role in basin rifting.

**Key words:** continental extension; igneous rock; stress field; Late Mesozoic–Cenozoic; Bohai Bay basin

**About the first author:** ZHAO Li, male, born in 1988, doctor, geology major, E-mail: orchidy@126.com.

**Fund support:** Supported by State Natural Science Foundation Program (No. 40772132).

渤海湾盆地是位于中国东北部以新生代为主的中-新生代叠合断陷盆地,其构造变形和盆地演化与东亚邻区盆地具有明显的相似性,并存在构造迁移现象<sup>[1-3]</sup>。前人从不同角度对盆地性质、形成机制、应力场演化等多方面进行研究,以期解释盆地形成的动力学过程。就盆地伸展断陷的应力来源而言,马杏垣等<sup>[4]</sup>、漆家福等<sup>[5]</sup>认为地幔热作用产生的引张力是盆形成主要因素,盆地属于主动裂陷机制下的陆内裂谷;李思田等<sup>[1]</sup>、Uyeda<sup>[6]</sup>、Honza et al.<sup>[7]</sup>认为洋壳俯冲产生的弧后伸展是盆地伸展的应力来源,盆地属于被动裂陷机制下的沟弧盆体系。就运动学模式而言,主要存在“伸展”、“伸展+走滑”、“伸展+拉分”3种模式的争论;周建勋等<sup>[8]</sup>通过构造物理模拟实验对黄骅坳陷的断层发育进行分析,指出渤海湾盆地形成于SN向伸展;马杏垣等<sup>[4]</sup>、Ren<sup>[9]</sup>学者认为形成于NWW-SEE向伸展;漆家福等<sup>[5]</sup>、Ye et al.<sup>[10]</sup>认为形成于NWW-SEE向伸展NNE向走滑;侯贵廷等<sup>[11]</sup>、Chen et al.<sup>[12]</sup>认为形成于走滑拉分。就大陆伸展模式而言,朱光等<sup>[13]</sup>通过研究华北克拉通东部伸展盆地的发育特征认为,早白垩世存在变质核杂岩和宽裂谷盆地,晚白垩世存在窄裂谷盆地;刘俊来等<sup>[14]</sup>认为华北克拉通上的变质核杂岩形成于晚中生代的岩石圈伸展、减薄;漆家福等认为渤海湾盆地岩石圈以上部简单剪切变形,下部纯剪切变形的模式分层伸展<sup>[5]</sup>;但这些研究未对盆地形成所需的岩石圈结构、地温场、伸展速率做定量分析。

前人对盆地动力学的研究,要么以坳陷为研究

对象,缺乏局部变形和区域构造运动的辩证关系;要么以地质现象做定性分析,缺少有效的定量描述。随着技术手段和研究区数据的增加,本文以渤海湾盆地及邻区的地热场、地球物理场、岩石圈结构、火成岩地球化学特征、区域构造背景等资料为基础,系统分析研究区晚中生代以来大陆伸展模式的地球物理场参数、岩石圈分层伸展的几何学和运动学特征、火成岩地球化学特征、应力来源及叠合后应力场-变形场的演化,以期对研究区晚中生代以来岩石圈减薄、盆地断陷及演化的动力学机制做有益探讨,具有较为重要的理论意义。

## 1 区域地质概况

### 1.1 大地构造位置、地层发育

渤海湾盆地位于华北板块东部,四周被燕山褶皱隆起带、辽东—胶东—苏鲁隆起区、鲁西隆起和太行山隆起所围限,内部包括辽河坳陷、渤中坳陷、昌潍坳陷、济阳坳陷、黄骅坳陷、临清坳陷、冀中坳陷,以及沧县隆起、邢薨隆起、埕宁隆起、内黄隆起共11个一级构造单元(图1)。盆地是在古生代华北克拉通基底之上发育的中、新生代盆地,在印支期和燕山早期构造运动中处于扬子板块俯冲构造域,并发育成近EW向挤压坳陷盆地;在燕山中晚期构造运动中处于古太平洋板块俯冲构造域,并发育成NE向伸展-走滑型断陷盆地;在喜马拉雅构造运动中处于西太平洋板块俯冲和印度板块碰撞远程效应叠合构造域,并发育成NE向伸展断陷盆地<sup>[15]</sup>。

盆地内基底是由太古宇泰山群结晶变质基底

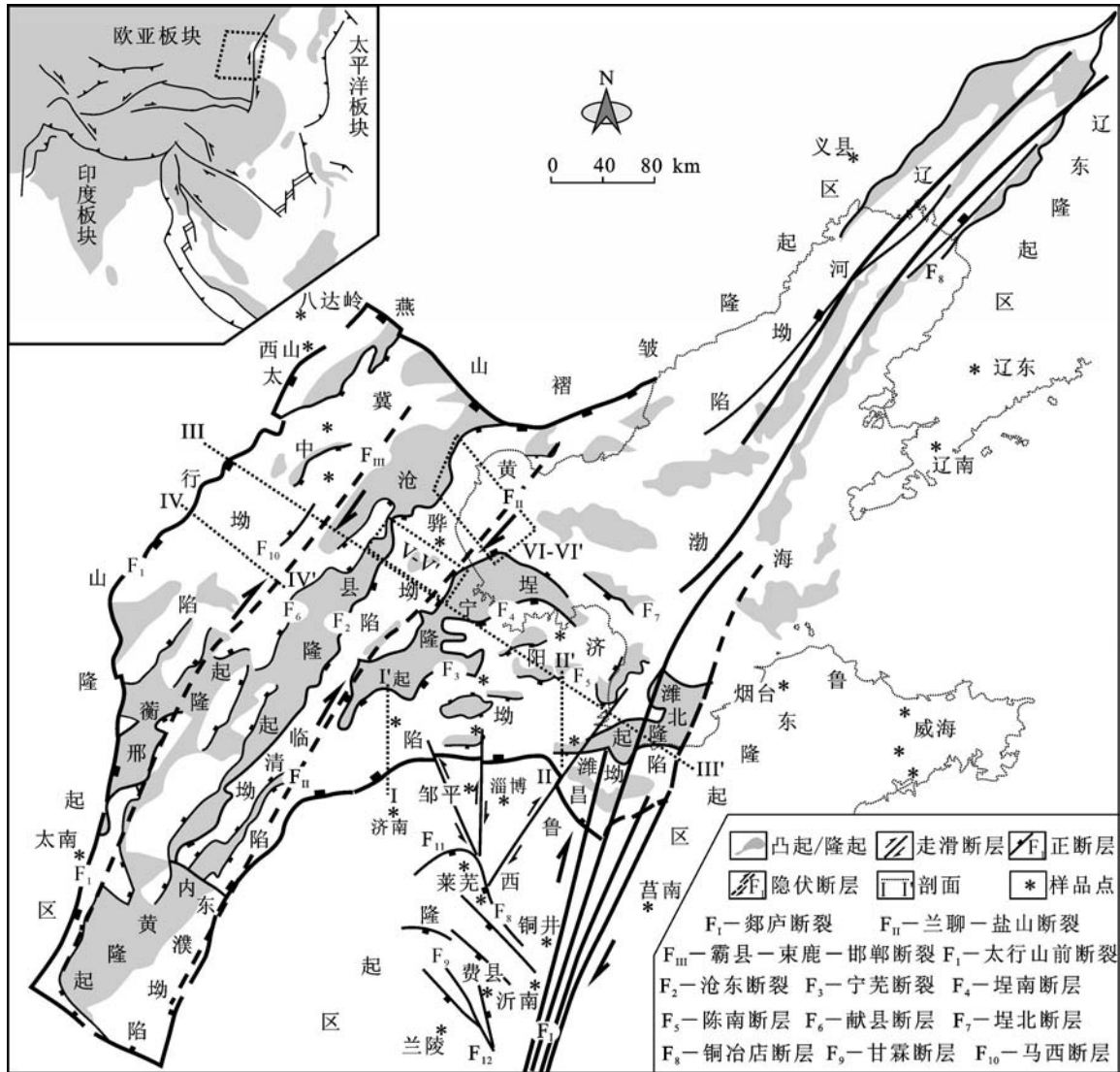


图1 渤海湾盆地构造位置及地质简图

Fig.1 Tectonic location and geological map of the Bohai Bay basin

和古元古代造山花岗岩岩体组成,盖层分别由新元古界、古生界地台沉积和中、新生界褶皱-断陷盆地沉积组成。其中,盆地内地层沉积出现分异始于中生代。中生界三叠系只沉积于盆地西部的冀中坳陷、临清坳陷和黄骅坳陷,中下侏罗统沉积扩展到济阳坳陷,上侏罗一下白垩统在盆地全区都有沉积,上白垩统只沉积于盆地西部<sup>[6]</sup>。新生界以湖相碎屑岩为主,在盆地全区都有沉积,自下而上分别发育孔店组(E<sub>1-2k</sub>, 65~50.5 Ma)、沙河街组(E<sub>2s</sub>, 50.5~34 Ma)、东营组(E<sub>3d</sub>, 34~23 Ma)、馆陶组(N<sub>2g</sub>, 16~5.3 Ma)、明化镇组(N<sub>1m</sub>, 5.3~1.8 Ma)和平原组(Qp, 1.8 Ma~现今),而且地层沉积中心呈现出由盆

地四周向渤海海域迁移的特征。

盆地内断层十分发育,按走向可分为NNE、NE、NW和近EW向4组,按性质可以分为伸展和走滑2种断裂系统(图1)。其中,NNE、NE向断层主要分布在盆地中西部,NW、近EW向断层主要分布在中东部,而伸展断层和走滑断层在每个坳陷都有发育。伸展断层主要是指盆内控凹断层及其次级断层,且控凹断层大多伸展滑脱于10~20 km深处的高导低速带,如太行山前断裂(F<sub>1</sub>)、沧东断裂(F<sub>2</sub>)、宁芜断裂(F<sub>3</sub>)等。走滑断层是盆地内岩石圈断裂,主要有郟庐断裂(F<sub>1</sub>)、兰聊—盐山断裂(F<sub>11</sub>)、霸县—束鹿—邯郸断裂(F<sub>m</sub>)。这些走滑断层或向上延伸至



浅层,控制凹陷沉积,如F<sub>1</sub>的鲁西隆起段;或只延伸至浅层,改造凹陷结构,如F<sub>11</sub>的黄骅拗陷段;或只在盆地基底内活动,控制盖层中断裂发育成张扭断层,如F<sub>11</sub>对应的浅层马西断层。

### 1.2 变形场

一般而言,同一应力场下不同构造部位的断层发育或构造变形往往不同,尤其是存在基底断层或边界大断裂影响的时候。依据晚中生代以来断层发育规律,渤海湾盆地的变形场可以划分成3个区域:郯庐断裂走滑变形区,包括昌潍拗陷、辽河拗陷,该区构造变形直接受控于郯庐断裂;伸展-走滑变形区,包括鲁西隆起、济阳拗陷、渤中凹陷,该区构造变形受控于郯庐断裂的走滑应力场和区域伸展应力场的叠合;走滑-伸展变形区,包括黄骅拗陷、临清拗陷、冀中拗陷,该区构造变形主要受控于区域伸展应力场,而走滑变形受控于兰聊-盐山走滑断裂和霸县-一束鹿-邯郸走滑断裂。这3个区域自东向西走滑构造逐渐减弱,受区域应力场作用逐渐加强。而且,盆地以兰聊-盐山断裂为界,东西两侧构造变形截然不同,下文将分别做论述。当然,基底断裂或先存一级断层对各分区内局部应力

场还会产生不同的影响。

## 2 大陆伸展模式

Buck<sup>[17]</sup>根据地壳结构、热流和岩石圈伸展速率提出了3种大陆伸展模式——核杂岩模式、宽裂陷模式和窄裂陷模式。前人研究表明,华北克拉通从侏罗纪开始全面减薄,早白垩世(125 Ma)达到峰值,渤海湾盆地随之裂陷发育成盆地<sup>[1,18]</sup>。在前人对古岩石圈厚度、古地温恢复的基础上,本文收集研究区大量火成岩地球化学成分数据<sup>[19-23]</sup>,计算了岩石圈伸展速率并以这些参数分析渤海湾盆地晚中生代以来的大陆伸展模式。表1中数据是根据Sugisaki<sup>[24]</sup>的 $SiO_2=45\% \sim 53\%$ 的图解、利用玄武岩 $Na_2O$ 、 $K_2O$ 含量和二氧化硅指数 $\theta[\theta=SiO_2-47(Na_2O+K_2O)/Al_2O_3]$ 计算的渤海湾盆地新生代岩石圈伸展速率。

华北板块东部在中-晚侏罗世期间形成高原,并在早白垩世开始伸展塌陷,而当其伸展减薄时,岩石圈恢复的厚度达150~200 km,故推测盆地地区地壳厚度为50~70 km<sup>[18,25]</sup>。Qiu et al.<sup>[25]</sup>根据热史模拟表明,岩石圈厚度到晚白垩世早期减薄到60 km左右,以岩石圈弹性变形推测其早白垩世伸展速率约

表1 渤海湾盆地新生代岩石圈伸展速率

Table1 Cenozoic extension rate of the lithosphere in Bohai Bay basin

地区	时期 (样品数/个)	元素平均含量 / %					伸展速率/(cm/a) *			
		SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$\theta$	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	$\theta$	平均
济阳	Qp(6)	40.8	4.96	1.97	10.3	9.2	0.10	0.23	-	0.17
拗陷	N <sub>2</sub> g(6)	47.3	2.62	2.17	15.1	32.4	-	0.15	0.65	0.40
	E <sub>2</sub> s <sub>3</sub> (8)	47.2	3.16	1.19	15.2	33.8	0.31	0.33	0.91	0.52
	E <sub>2</sub> s <sub>4</sub> (1)	45.2	2.91	1.67	14.0	29.8	0.56	0.23	0.44	0.41
黄骅	E <sub>2</sub> s <sub>1</sub> (1)	48.0	2.24	0.53	15.1	39.3	-	0.66	-	0.66
	E <sub>2</sub> s <sub>3</sub> (5)	47.8	3.50	1.19	15.2	33.3	0.29	0.33	0.57	0.40
拗陷	E <sub>1-2</sub> k(2)	47.5	6.20	1.14	16.5	26.5	-	0.36	0.42	0.39
	E <sub>3</sub> d(4)	47.5	3.78	1.70	16.1	31.6	0.29	0.23	0.56	0.36
	E <sub>2</sub> s <sub>1</sub> (4)	47.2	3.26	1.12	15.5	33.8	0.29	0.36	0.65	0.43
拗陷	E <sub>2</sub> s <sub>3</sub> (6)	47.2	2.68	1.58	15.5	34.3	-	0.25	1.04	0.65
	E <sub>1-2</sub> k(4)	46.8	2.98	0.89	15.5	34.6	0.41	0.47	1.12	0.67
	E <sub>2</sub> s <sub>2</sub> (1)	45.9	2.21	1.19	15.4	35.5	-	0.34	-	0.34
拗陷	E <sub>2</sub> s <sub>3</sub> (8)	47.6	3.23	1.01	15.4	34.7	0.29	0.40	1.19	0.63
	E <sub>2</sub> s <sub>4</sub> (4)	48.3	3.99	0.96	14.9	32.6	0.28	0.44	0.68	0.47

注:\*据火成岩元素含量估算。

1.1 cm/a(公式1)。

$$\mu = \frac{|\varepsilon_{纵}|}{|\varepsilon_{横}|} = \frac{|H_0 - H|/H_0}{|L_0 - L|/L_0} = \frac{|H_0 - H|/t}{|L_0 - L|/t} = \frac{|v_{纵}|}{|v_{横}|} \Rightarrow$$

$$0.25 = \frac{(180 - 60) \text{ km}}{|v_{横}|} \Rightarrow$$

$$v_{横} = 1.1 \text{ cm/a} \quad (1)$$

式中： $\mu$ 为泊松比， $\varepsilon_{纵}$ 为纵向线应变， $\varepsilon_{横}$ 为横向线应变， $H_0$ 和 $L_0$ 为单位正方形的边长， $H$ 和 $L$ 分别为应变矩形的宽和长， $t$ 为时间， $v_{纵}$ 和 $v_{横}$ 分别为纵向和横向应变速率。

此时，渤海湾盆地区具有较高的热流密度，如济阳拗陷该时期古大地热流密度和平均古地温梯度值分别为84~88 mW/m<sup>2</sup>、4.04~5.25 °C/100 m<sup>[25-26]</sup>。将上述恢复的数据与Buck提供的模型参数对比表明，渤海湾盆地早白垩世的大陆伸展模式可能是核杂岩模式和宽裂陷模式。根据渤海湾盆地内构造变形及周边隆起区地质现象表明，太行山—冀中拗陷区、医巫闾山—阜新盆地区、辽东隆起—本溪/丹东

盆地发育核杂岩模式，伸展方向为NW-SE向，形成年代为120~138 Ma<sup>[27-29]</sup>；东部伸展—走滑变形区发育宽裂陷模式，但受边界郯庐断裂影响显著，其构造变形为一系列SW倾的半地堑，而非宽裂陷模式中的地堑(图2)。

古近纪，渤海湾盆地区地壳厚度减薄到30~38 km<sup>[30]</sup>。根据盆地内玄武岩化学成分计算的岩石圈伸展速率显示，济阳拗陷和冀中拗陷区最大拉伸速率出现在E<sub>2</sub>S<sub>3</sub>时期，分别为0.52 cm/a和0.63 cm/a；黄骅拗陷区最大拉伸速率出现在E<sub>2</sub>S<sub>1</sub>时期，为0.66 cm/a；辽河拗陷区伸速速率逐渐降低，E<sub>1</sub>-k时期最大达0.67 cm/a；4个拗陷古近纪平均拉伸速率为0.48 cm/a(表1)。此时，盆地内地温场要比晚中生代低，如济阳拗陷大地热流密度和古地温梯度值分别为65.8~73.8 mW/m<sup>2</sup>，3.2~5.0 °C/100 m<sup>[25,31]</sup>。将这些数据与模型参数对比表明，渤海湾盆地在古近纪处于窄裂陷模式(图2)。

新近纪以后，渤海湾盆地沉积中心、岩浆活动等向渤海海域迁移，盆地内断层活动趋于停止。该阶段，济阳拗陷N<sub>1</sub>g期岩石圈伸展速率仍高达0.40

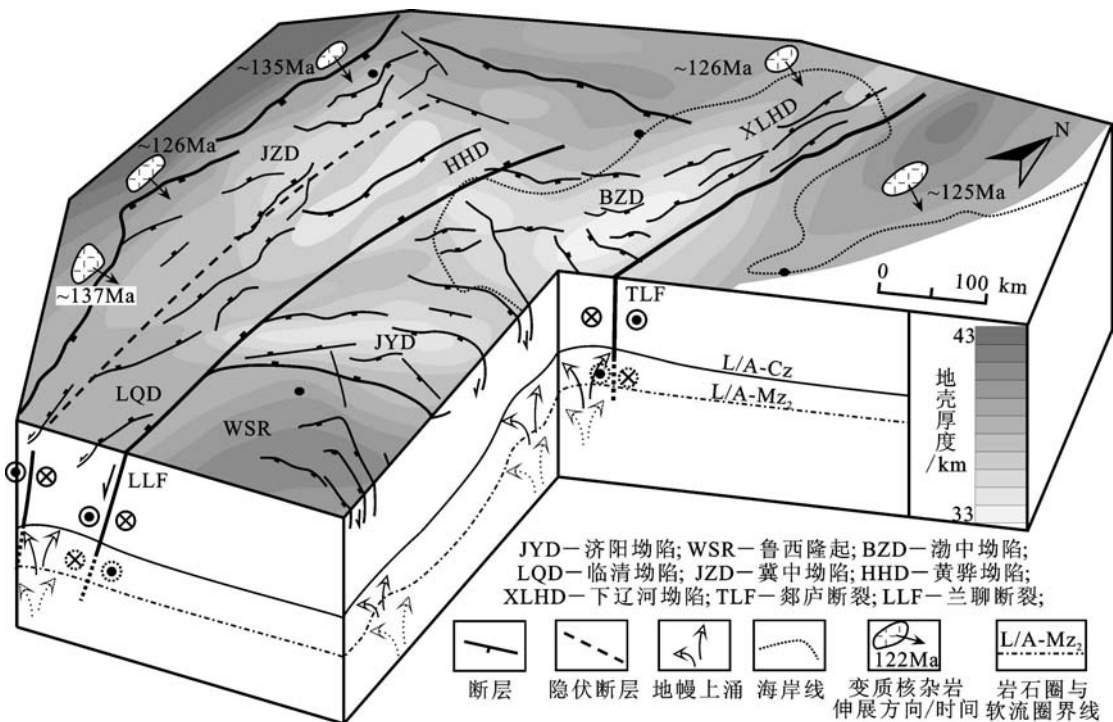


图2 渤海湾盆地区大陆伸展模式  
Fig.2 Continental extension mode of Bohai Bay basin

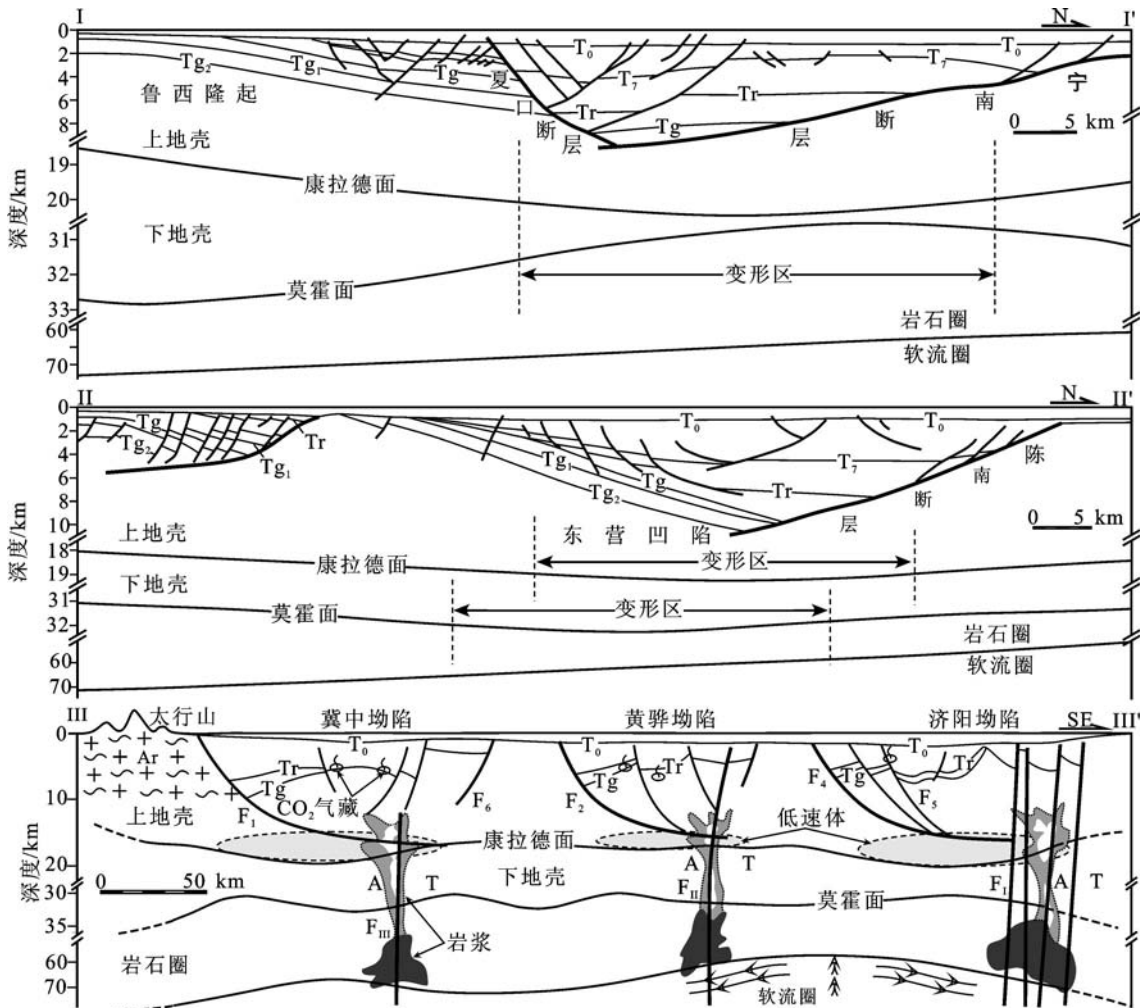
cm/a,但第四纪时迅速降低至0.17~0.18 cm/a<sup>[1,32]</sup>。因此,渤海湾盆地新近纪开始拗陷萎缩,整体进入热沉降阶段。

### 3 浅层构造样式与岩石圈分层伸展

#### 3.1 分层伸展的几何学特征

上述岩石圈伸展模式的设定是地壳或岩石圈伸展在整体上具有协调性,构造变形分析是以盆地内一级构造为单元的。当我们对比拗陷内亚一级构造单元结构时发现,不同拗陷的结构特征和变形方式截然不同。比如,冀中拗陷北部的廊固拗陷、霸县拗陷都是单断式结构,南部的饶阳拗陷和保定拗陷组合成双断式结构;济阳拗陷的东营拗陷、车镇拗陷、沾化拗陷都是单断式结构,而惠民拗陷是

双断式结构。一般而言,单断式结构指示简单剪切模式,双断式结构指示纯剪切模式。因此,上述大陆伸展模式不适用于亚一级构造单元的变形分析,伸展的岩石圈内部结构必然存在变形差异。前人根据岩石圈物质结构和地球物理场特征提出的分层伸展模式可用于解释深部变形与浅层构造样式之间的响应关系<sup>[33]</sup>。分层伸展模式主要特征体现在:其一,岩石圈内部存在多个物理层,在伸展过程中各层分层伸展,且层与层之间可能存在滑脱面;其二,岩石圈不同层次的伸展变形方式可以不同,其三,不同层次的伸展变形区在垂向上不一定叠合在一起。本文以济阳拗陷为例,在垂向上叠合构造剖面与相应位置处康拉德面、莫霍面、岩石圈底面埋深<sup>[30,34]</sup>,以研究各拗陷结构差异与岩石圈内部结



地震反射层 T<sub>0</sub>-明化镇组底, T<sub>7</sub>-沙河街组底, Tr-新生界底, T<sub>g</sub>-中生界底, T<sub>g1</sub>-上古生界底, T<sub>g2</sub>-下古生界底

图3 现今拗陷内构造及其岩石圈结构(位置见图1)

Fig.3 Depression structure and its framework of the lithosphere at present



构的几何学关系(图3)。

在I-I'剖面上,惠民凹陷的控凹断层宁南断层、夏口断层倾向相反,使凹陷呈双断式结构;在凹陷主体发育区下部,康拉德面下凹、莫霍面上凸,使上、下地壳变形区重叠在一起,呈现出细颈化现象;深层岩石圈底面深度由北向南逐渐加大,推测岩石圈地幔变形区发育在北部(图3)。在II-II'剖面上,东营凹陷的控凹断层陈南断层向南倾,使凹陷呈单断式结构;在凹陷主体发育区中层,康拉德面和莫霍面都下凹,但上、下地壳变形区并不重叠在一起;深层岩石圈底面深度同样由北向南逐渐加大。根据以上岩石圈结构和凹陷结构特征分析可以看出,惠民凹陷区地壳变形为纯剪切模式,东营凹陷区地壳变形为简单剪切模式。同时,鉴于济阳拗陷内无切穿岩石圈的大型拆离断层,可以判定区内岩石圈地幔伸展变形为纯剪切模式。

同理,本文取切过渤海湾盆地的NW-SE向构造剖面,并在垂向上叠合相应位置处康拉德面、莫霍面、岩石圈底面埋深(图3)。从III-III'剖面可以看出:

(1)渤海湾盆地新生代为双断式结构,SE倾的太行山前断层(F1)、沧东断层(F2)、埕南断层(F4)拆离滑脱于上地壳高导低速体内,NW倾的马西断层、献县断层、夏口断层等只在新生代正断活动。

(2)中层康拉德面下凹部位对应拗陷陷陷区,莫霍面上凸部位对应凹陷区,上、下地壳变形区基本重叠在一起,呈现出细颈化现象。这表明地壳新生代伸展为纯剪切变形。

(3)深层岩石圈地幔变形区与地壳变形区不重叠,其底面上凸部位分别位于冀中拗陷中部和济阳拗陷北部;同时,区内未发育切穿岩石圈的拆离断层。这表明岩石圈地幔新生代伸展为纯剪切变形。

(4)郟庐断裂(F<sub>I</sub>)、兰聊—盐山断裂(F<sub>II</sub>)和霸县—束鹿—邯鄲断裂(F<sub>III</sub>)属于岩石圈断裂,可以为幔

源物质上涌提供通道——新生代火成岩具有亏损地幔混染特征,下文将做论述;盆地内聚集多个幔源二氧化碳气藏,如济阳拗陷的阳信、高青—平方王地区,黄骅拗陷的港西断裂带附近,冀中拗陷的留西—大王庄潜山带。

晚中生代,渤海湾盆地内拗陷结构与新生代完全不同,根据其内断层发育和地层分布可以推测出——走滑-伸展变形区的控凹断层只发育一系列SE倾的太行山山前断层、沧东断层等,凹陷为西断东超的单断式结构;伸展-走滑变形区的控凹断层只发育一系列SW倾的甘霖断层、铜冶店断层、陈南断层、埕北断层等,凹陷为东断西超的单断式结构。据此推断,渤海湾盆地区晚中生代地壳伸展为简单剪切变形,形成前述变质核杂岩。

### 3.2 分层伸展的运动学特征

如前所述,当岩石圈在伸展过程中分层伸展时,岩石圈内各层的伸展强度必然会不同;同时,伸展方式的不同也会使不同层次上的主构造变形产生差异。一般而言,下部岩石圈地幔以韧性纯剪切为主,伸展量比较大,且变形比较均匀;上部地壳以脆性伸展为主,伸展量小,伸展变形主要集中在滑脱断层带或控盘断层上,且断层发育容易受先存断层影响<sup>[5]</sup>。

为分析岩石圈分层伸展强度的不同,本文以平衡剖面获得的拗陷伸展速率作为上地壳伸展速率,对比前节计算的岩石圈伸展速率,如表2所示。表中冀中拗陷采用的是IV-IV'剖面(位置见图1),数据来自陆诗阔等<sup>[35]</sup>;黄骅拗陷采用的是V-V'、VI-VI'剖面组,数据来自董敏等<sup>[36]</sup>;济阳拗陷采用的是III-III'剖面。从表中数据可以看出,上地壳伸展速率只有岩石圈伸展速率的1/6~1/8;伸展速率最大时期为E<sub>2</sub>S<sub>2-3</sub>,但伸展量最大的时期是E<sub>2</sub>S<sub>4</sub>—E<sub>1-2</sub>k,这与岩石圈伸展过程一致。此外,渤海湾盆地剖面上全测点的全频率电性主轴研究发现,1~2.68 km深电性

表2 渤海湾盆地区上地壳伸展速率和伸展量

Table 2 The extensional amount and velocity of the upper crust in Bohai Bay basin

地区	伸展量/km					伸展速率/(10 <sup>-2</sup> cm/a)				
	N-Q	E <sub>2</sub> S <sub>1</sub> -E <sub>3</sub> d	E <sub>2</sub> S <sub>2-3</sub>	E <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	E <sub>1-2</sub> k	N-Q	E <sub>2</sub> S <sub>1</sub> -E <sub>3</sub> d	E <sub>2</sub> S <sub>2-3</sub>	E <sub>2</sub> S <sub>4</sub>	E <sub>1-2</sub> k
济阳拗陷	2.80	3.56	8.20	5.79	12.5	1.75	2.73	11.7	7.72	8.34
黄骅拗陷	2.88	6.07	4.87	—	7.56	1.80	4.05	9.94	—	5.04
冀中拗陷	3.04	4.14	7.16	10.11	—	1.90	3.19	10.2	—	8.09

主轴方位为NE10°,这是E<sub>2S3</sub>—E<sub>3d</sub>时期NE向断层展布方向;10 km深电性主轴方位为NW350°,这大致是J<sub>3</sub>—K<sub>1</sub>时期NW向断层展布方向;49 km深电性主轴方位为NE45°,这与岩石圈地幔伸展方向大致垂直<sup>[34]</sup>。Jiang et al.<sup>[30]</sup>通过多尺度小波变换布格重力数据,显示岩石圈不同层次的主构造走向也有相似变化。上述运动学数据表明,岩石圈在伸展过程中具有分层伸展特征,并且各层伸展强度和变形特征不同。

#### 4 深部火成岩地球化学特征

晚中生代以来,研究区岩石圈强烈减薄并伴随强烈的岩浆活动。其中,晚中生代火成岩以早白垩世为主,且主要分布于盆地东部。走滑变形区火成岩主要沿郯庐断裂带展布,伸展—走滑变形区火成岩则沿NW向断层展布,而走滑—伸展变形区则主要分布在黄骅拗陷中、南部。新生代,火成岩在各拗陷均有分布,但整体表现为东多西少、北多南少的特征,即主要分布在走滑变形区和伸展—走滑变形区<sup>[37]</sup>。盆地内火成岩的分布主要沿郯庐断裂、兰聊—盐山断裂、霸县—束鹿—邯郸断裂这3条深大断裂分布,而局部则受控于NE向次级断层。因此,推测3条断层可能是新生代岩浆输送至地表的通道。赋存于盆地内的这些大量的火成岩可以为渤海湾盆地的构造演化、大地构造背景和岩石圈深部动力学过程提供岩石学依据。本文收集渤海湾盆地内及其周边隆起区火成岩地球化学数据<sup>[19-20,22,27-29,38-52]</sup>,以分析晚中生代以来该区深部岩浆活动机制。

依据火山岩全碱—二氧化硅(TAS)图解可以看出,渤海湾盆地内晚中生代火成岩主要为玄武安山岩、玄武粗面安山岩、粗面安山岩、安山岩和流纹岩,SiO<sub>2</sub>含量为48%~75%,全碱含量为4%~11%;新生代火成岩主要为玄武岩、粗面玄武岩,少量碧玄岩、玄武粗安岩、玄武安山岩,SiO<sub>2</sub>含量为41%~56%,全碱含量为3%~7%(图4-a,b)。这两者岩性反映的构造环境有较大不同,前者接近岛弧环境下钙碱性系列,后者接近大陆裂谷环境下的拉板玄武岩系列。然而,准确的构造环境还需要结合微量元素化学特征加以定位。从Th/La—Ta/La图解可以看出,晚中生代火成岩被俯冲带流体混染明显,新生代火成岩接近洋岛玄武岩(OIB)和富化的洋脊玄武岩(E—MORB)(图4-c)。从各时期ε<sub>Nd</sub>分布来看,晚

中生代火成岩具有极低的负异常值(-14~-20),E<sub>k</sub>—E<sub>S3</sub>时期具有正负变化的值(-5~0/0~5),E<sub>S2</sub>—Q时期具正值(0~6)(图4-d)。据此推测,晚中生代火成岩受富集地幔混染,而新生代火成岩受软流圈地幔混染,两者转换发生在E<sub>1-k</sub>—E<sub>2S3</sub>时期。郭华等<sup>[42]</sup>在研究济阳拗陷阳信地区的火成岩中发现,始新世火成岩仍具有富集地幔混染的特征,渐新世则转变为软流圈地幔混染特征。从<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr—ε<sub>Nd</sub>分布来看,晚中生代火成岩源自EM1型富集地幔,数据点落入A区;新生代火成岩处于DMM、EM1、EM2三型端元组分之间,数据点落入C区(图4-e)。此外,其他微量元素表明晚中生代火成岩稀土元素分异明显且轻稀土元素富集,Sr、Rb、Ba等大离子亲石元素富集,Y、Ta、U—Th等高场强元素亏损;新生代火成岩轻稀土元素富集减弱,大离子亲石元素弱富集,Zr、Ta、Y等高场强元素轻度亏损,无Eu异常<sup>[19,42]</sup>。根据以上火成岩地球化学特征认为,渤海湾盆地晚中生代处于古太平洋板块向西俯冲形成的岛弧环境,新生代处于软流圈地幔上涌背景下的大陆裂谷环境。

对比渤海湾盆地及周边隆起区晚中生代<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr—ε<sub>Nd</sub>分布可以看出,鲁西隆起的火成岩<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值在空间上由北向南逐渐增大,即数据点由红色(济南/邹平、淄博/莱芜)变为粉色(铜井、费县)再变为绿色(沂南、兰陵);鲁西隆起南部和鲁东隆起区火成岩(绿色数据点)比盆地区及太行山隆起、燕山造山带区(紫色及蓝色数据点)具有更高的<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值(图4-e)。这指示岩石圈地幔由A区EM1型过渡到B区EM2型;郯庐断裂东侧的苏鲁造山带、胶东隆起和辽东隆起区火成岩<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr值处于EM1与EM2过渡区,指示岩石圈地幔属于类似EM2型(图5)。一般而言,EM1、EM2型富集岩石圈地幔是由板块俯冲而导致HIMU地幔分别与俯冲大洋沉积物、陆壳沉积物相混合的结果<sup>[54]</sup>。该区域属于扬子板块与华北板块陆陆碰撞带一线,推测华北板块东、南部岩石圈地幔可能受扬子板块俯冲的改造,影响范围如图5所示。Lan et al.<sup>[46-47]</sup>和Zhang et al.<sup>[55]</sup>研究认为:220~130 Ma,扬子板块的陆壳俯冲将华北板块东、南部岩石圈地幔改造成富集地幔;130~110 Ma,古太平洋板块的俯冲再次改造岩石圈地幔,最终形成类似EM2型地幔。杨承海等<sup>[44]</sup>和裴福萍等<sup>[45]</sup>通过对鲁西高镁闪长岩中橄榄岩包体和捕掳



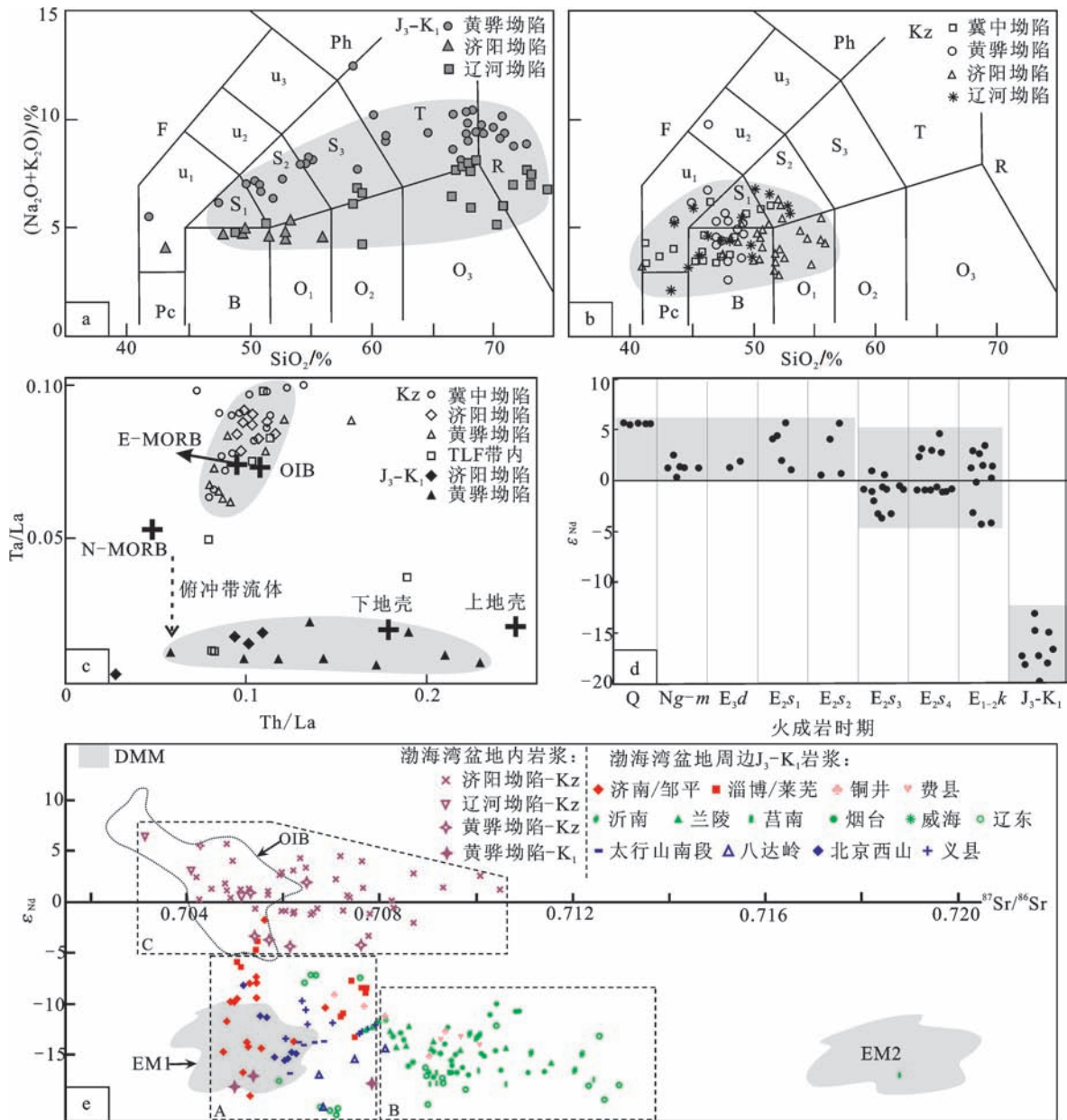


图4 渤海湾盆地及周边火成岩地球化学特征(数据引自文献[19-20,22,27-29,38-52])  
 a—盆地内中生代火成岩 TAS图;b—盆地内新生代火成岩 TAS图;c—盆地内火成岩 Th/La-Ta/La图;  
 d—盆地内火成岩εNd分布;e—盆地内及周边隆起区εNd-<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr图(样品点位置见图1);

DMM、EM1、EM2、OIB据文献[53]

Fig. 4 Geochemical characteristics of igneous rocks in Bohai Bay basin and its adjacent areas

a-TAS diagram for the Mesozoic igneous rocks in the basin; b-TAS diagram for the Cenozoic igneous rocks in the basin; c-Th/La-Ta/La diagram for the igneous rocks in the basin; d-εNd values for the igneous rocks in the basin; e-εNd-<sup>87</sup>Sr/<sup>86</sup>Sr diagram for the igneous rocks in the basin and its adjacent areas (for sample location see Fig. 1);

DMM, EM1, EM2, OIB after references[53]

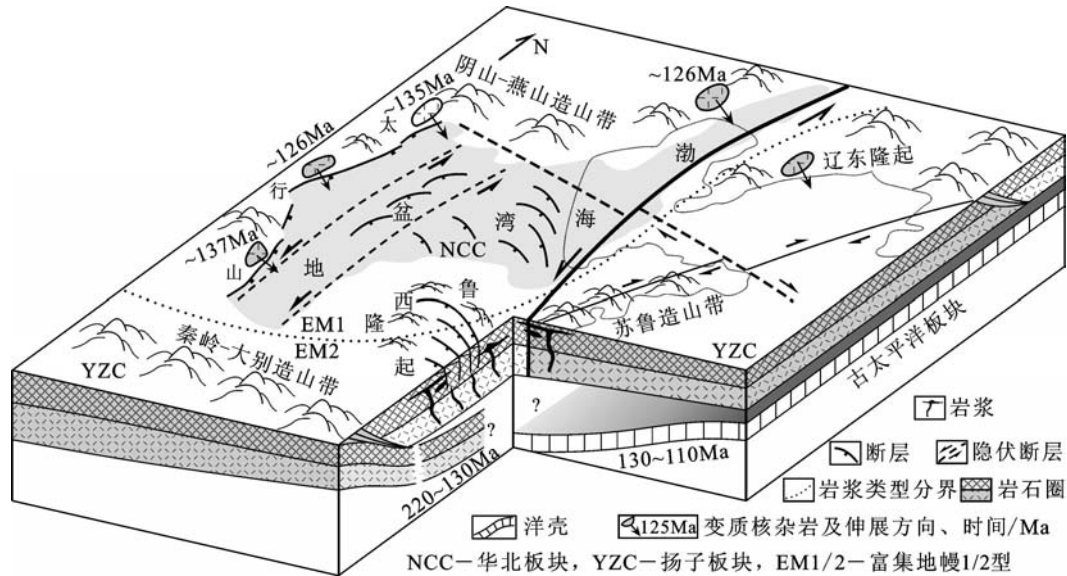


图5 渤海湾盆地及其周边晚中生代岩浆动力学模型

Fig. 5 Late Mesozoic dynamic model of the magma in Bohai Bay basin and its adjacent areas

晶的研究表明,异常高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值和 $\epsilon_{\text{Nd}}$ 低值是由扬子板块俯冲造成少量陆壳物质与华北板块岩石圈地幔混染的形成的。

## 5 区域应力场与变形场

### 5.1 伸展应力来源及演化

渤海湾盆地晚中生代以来伸展的力源主要有3种:板块相对运动产生的引张力,这主要是指西太平洋板块俯冲在东亚形成的弧后伸展;深部热物质对流产生的引张力,这主要是指软流圈热地幔上涌后侧流对上覆岩石圈产生的;郯庐断裂走滑活动产生的伸展,这主要是指块体运动后缘产生的引张和主走滑带产生的多种破裂<sup>[56-57]</sup>。下文将对这3种力源的表现形式和演化进行分析:

板块相对运动产生的引张力用于解释单个的渤海湾盆地裂陷会有所偏差。因为前者是区域应力场,后者是相对为局部的构造变形,两者构造等级不对等。所以,这需要结合盆地周边相似盆地组合成盆地群进行研究。盆地群是指时间上同期、空间上处于同一块构造背景下,具有相同或相似成因机制的一组盆地,能够反映板块相对运动对盆地构造特征的影响<sup>[58]</sup>。从晚侏罗世开始,中国东部地区的华北板块、扬子板块、西伯利亚板块完成拼接,之间并无大的相对运动。之后,中国东部块体的相

对运动主要是由太平洋板块俯冲造成的,并形成了自东向西变化的沟弧盆体系。其主要表现为中国东部伸展盆地群由NW向SE的构造迁移,且迁移方向与太平洋板块俯冲方向的演化一致。因此,根据渤海湾盆地及邻区盆地群的构造演化特征,本文划分了3个盆地群区域(图6),以示板块相对运动产生的引张力对盆地形成的作用。I区位于西太平洋岛弧西侧的陆表海区,属于边缘海盆地,包括日本海盆地、东海盆地等;区内盆地主要断陷期为新近纪,如日本海和冲绳海槽的大规模伸展始于17 Ma左右<sup>[59]</sup>。II区位于郯庐断裂中段的沂沭断裂两侧,属于以新生代为主的中新生代叠合盆地,包括渤海湾盆地、苏北盆地、北黄海盆地等;区内盆地主要断陷期为古近纪,新近纪开始进入坳陷期。该区盆地受郯庐断裂走滑活动影响显著,并发育大量伸展-走滑断层,具有走滑和伸展2种应力场机制。III区位于兴蒙造山带区,属于以白垩纪为主的中新生代叠合盆地,包括松辽盆地、二连盆地、海拉尔盆地等。因此推断,中国东部盆地群主断陷期的迁移顺序为IIIa(K<sub>1</sub>)、IIIb(K)、II(K<sub>1</sub>)→II(E)→I(N),空间迁移方向为NW→SE→E。

前述渤海湾盆地及周边火成岩地球化学特征表明,晚中生代以来研究区深部不同源区的岩浆开始上涌,其侧向对流对岩石圈产生不同程度的引张



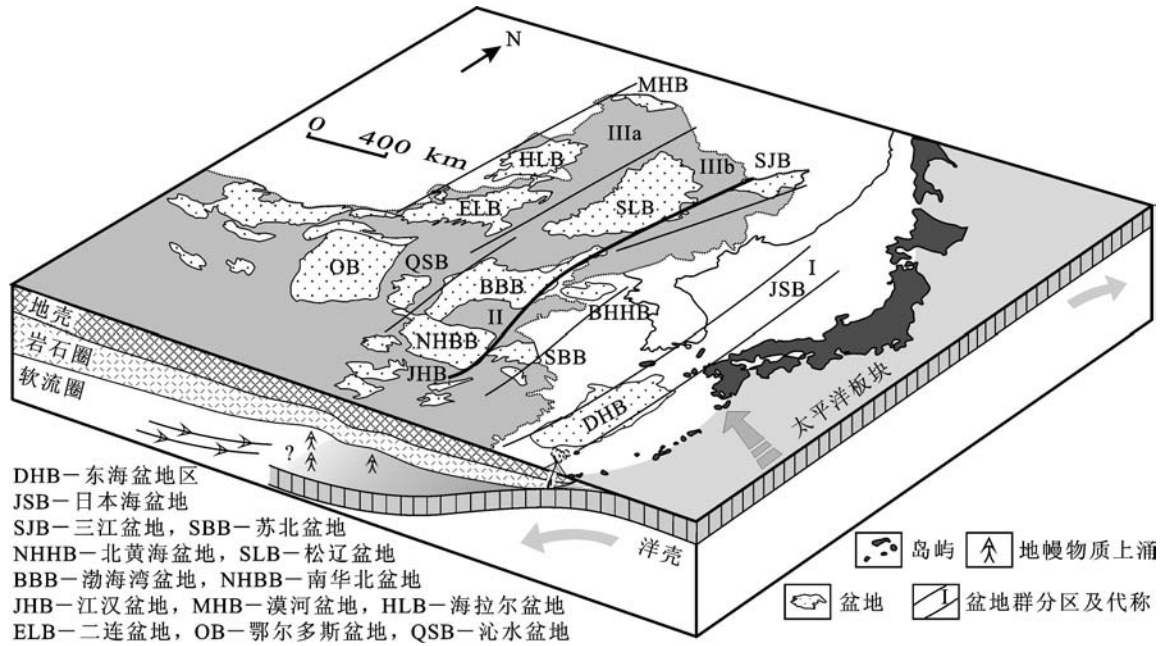


图6 中国东北部及邻区盆地群  
 Fig. 6 Basin groups and their distribution in northeastern China and adjacent areas

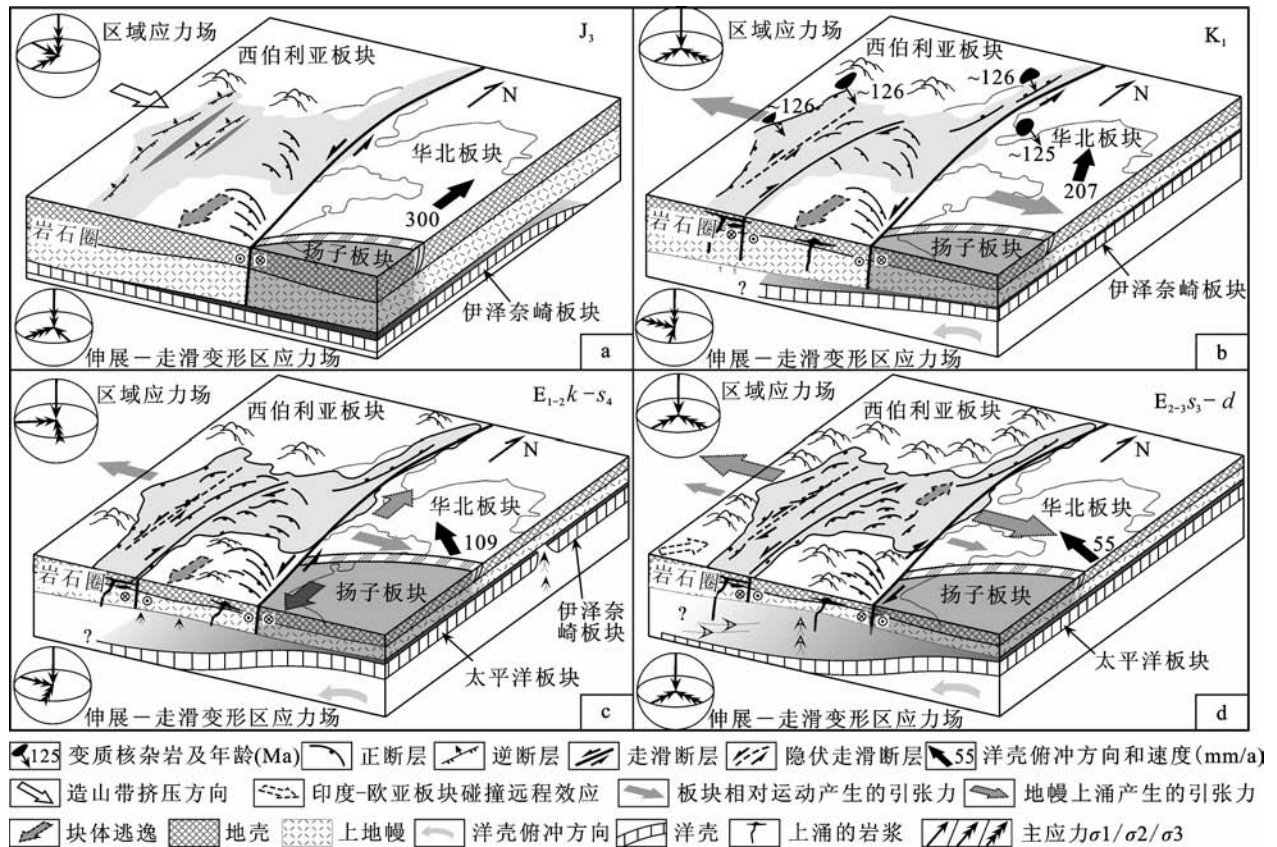


图7 渤海湾盆地晚中生代—新生代区域构造演化  
 Fig. 7 Tectonic evolution of Bohai Bay basin in Late Mesozoic–Cenozoic



力:早白垩世,岩浆的源区为岩石圈地幔,所产生的引张力比较小;进入新生代,岩浆的源区为软流圈地幔,其大规模的对流、上涌及侧流对岩石圈产生的引张力在渤海湾盆地形成了强烈的伸展作用。

郯庐断裂作为渤海湾盆地的边界深大断裂,对盆地区域应力场和构造演化有着明显的改造和控制作用。虽然郯庐断裂的成因机制存在诸多争论,但关于它的构造活动规律具有较统一的观点:T—J为左旋压扭,K—E<sub>1</sub>为左旋张扭,E<sub>2</sub>—现今为右旋张扭;构造变形逐步从特提斯构造域转变为滨太平洋构造域,再到太平洋板块俯冲和印度板块远程效应叠合构造域。在这演化过程中,郯庐断裂带走滑位移量逐渐降低,对区域应力场的改造、影响程度也逐渐降低。从盆地内构造变形分析,郯庐断裂的构造域分布在走滑变形场和伸展—走滑变形场两区,向西止于兰聊—盐山走滑断裂带。

## 5.2 应力场和变形场的演化

晚侏罗世(J<sub>3</sub>),渤海湾盆地地区继承燕山期主幕的NWW向挤压构造应力场<sup>[60]</sup>。在黄骅拗陷、冀中拗陷等西部地区发育规模巨大的NNE向展布的冲断褶皱构造(图7-a),如太行山逆冲断层、沧东逆冲断层,并且逆冲断层下盘或向斜部位沉积少量上侏罗统红色磨拉石建造<sup>[16]</sup>。而在鲁西隆起、济阳拗陷等东部地区,由于郯庐断裂受伊泽奈崎板块近SN向俯冲开始强烈左旋走滑,该区应力场被改造成以走滑为主的压扭环境,并发育大量NW向张扭断层。根据压扭性一般剪切原则,这些NW向断层是作为郯庐断裂的R破裂产生的,且与主走滑带的夹角要大于15°。此时,研究区深部地幔物质上涌产生的引张力(E<sub>M</sub>)小,渤海湾盆地内的岩浆源为岩石圈内部,故该E<sub>M</sub>对渤海湾盆地区的应力场基本没有贡献。

早白垩世(K<sub>1</sub>),伊泽奈崎板块以20.7 cm/a速度NNW向俯冲于欧亚板块之下,研究区发育成弧后伸展环境<sup>[61]</sup>。华北板块上弧后伸展产生的引张力(E<sub>P</sub>)使得区域应力场由挤压转变为NW—SE向伸展。在盆地西部的冀中拗陷和东北部的辽河拗陷地区发育NW—SE向伸展的大型拆离滑脱和变质核杂岩构造,应力场为右行扭张(图7-b)。在盆地东部地区,应力场由区域应力场和郯庐断裂产生的伸展(E<sub>TL</sub>)叠合为左行张扭,NW向断层强烈伸展并控

制沉积了一套下白垩统火山岩和碎屑岩建造。此时,研究区岩石圈地幔物质上涌产生的引张力增强,渤海湾盆地及周边岩浆活动非常强烈,这为渤海湾盆地提供了一定的NW—SE向伸展。整体而言,该时期的盆地变形的力源以板块相对运动产生的引张力为主,同时接受郯庐断裂的改造。

晚白垩世(K<sub>2</sub>),西太平洋板块NNW向俯冲,区域应力场变为近东西向挤压。此时,渤海湾盆地整体隆升,只在冀中拗陷、黄骅拗陷等地区局部有一些红层沉积,而盆地周边的太行山、燕山、鲁西隆起等开始隆升<sup>[16]</sup>。

古新世—早始新世孔店—沙四期(65~43 Ma),西太平洋板块NW向俯冲,速度降低至10.9 cm/a<sup>[61]</sup>,由此产生的引张力方向为NW—SE向;太平洋板块与伊泽奈崎板块之间的洋中脊俯冲于欧亚板块之下形成“板片窗”,软流圈地幔由此上涌并对岩石圈产生SN向引张力<sup>[62]</sup>;郯庐断裂左旋张扭,但走滑量比J<sub>3</sub>—K<sub>1</sub>明显降低。因此,该阶段E<sub>P</sub>、E<sub>TL</sub>相比于早白垩世减弱,E<sub>M</sub>加强并逐渐占据主导地位(图7-c)。此时,郯庐断裂走滑变形区受控于郯庐断裂的张扭作用形成走滑拉分盆地;伸展—走滑变形区应力场由E<sub>P</sub>、E<sub>M</sub>、E<sub>TL</sub>叠合而成左行扭张,伸展方向为近SN向,且断层发育从J<sub>3</sub>—K<sub>1</sub>的NW走向转为近东西走向;走滑—伸展变形区应力场由E<sub>P</sub>、E<sub>M</sub>叠合而成右行扭张,伸展方向为NNW—SSE向。

早始新世—渐新世沙三—东营期(43~23 Ma),西太平洋板块俯冲方向转为NWW向,速度降低至5.5 cm/a,由此产生的引张力方向为NWW—SEE向<sup>[61]</sup>,而此时E<sub>P</sub>产生的盆地伸展开始向东迁移;软流圈物质上涌机制发生改变,东部洋壳俯冲产生的地幔楔吸引作用和西部陆陆碰撞形成的“压泵效应”使得软流圈向SE流动、上涌<sup>[63]</sup>,对岩石圈产生的引张力为NW—SE向;郯庐断裂受太平洋板块俯冲作用以及印度板块俯冲的远程效应影响转变为右旋张扭,且断裂带走滑量再次降低(图7-d)。因此,研究区E<sub>P</sub>、E<sub>TL</sub>相比于上一阶段再次减弱,E<sub>M</sub>占据主导地位。此时,郯庐断裂走滑变仍然是走滑拉分盆地发育;伸展—走滑变形区和走滑—伸展变形区应力场都由E<sub>P</sub>、E<sub>M</sub>叠合而成右旋扭张,伸展方向为NWW—SEE向。

中新世馆陶期至今(23 Ma—现今),西太平洋

板块俯冲方向转为NWW向,速度增加至9.4 cm/a,由此产生的引张力方向为NWW-SEE向<sup>[61]</sup>。此时,  $E_p$ 产生的盆地伸展向东迁移至日本海—东海—南海一线,  $E_{TL}$ 、 $E_M$ 再次减弱。渤海湾盆地进入热沉降阶段,断裂活动逐渐停止,整体覆盖1000 m左右的新近纪—第四纪地层。整体而言,新生代的盆地伸展力源软流圈地幔上涌产生的引张力为主,  $E_{TL}$ 、 $E_p$ 逐渐减弱。

## 6 结 论

(1)渤海湾盆地晚中生代的岩石圈具有高地温场和高伸展速率,北、西部以变质核杂岩模式伸展,东部以宽裂陷模式伸展;新生代岩石圈地温场和伸展速率较小,以窄裂陷模式伸展。

(2)渤海湾盆地岩石圈伸展具有分层伸展特征。几何学分析表明,晚中生代地壳伸展为简单剪切变形,新生代为纯剪切变形,而岩石圈地幔始终为纯剪切变形;运动学特征表明,地壳、岩石圈地幔伸展强度和构造变形不同。

(3)渤海湾盆地晚中生代处于洋壳俯冲背景下弧后伸展盆地,新生代处于软流圈上涌背景下的大陆内裂谷环境。晚中生代,盆地及北、西部地区岩石圈地幔受古太平洋板块形成EM1型,南、东部地区岩石圈地幔受扬子板块前期俯冲而改造成类似EM2型;新生代,盆地及周边火成岩具有DMM、EM1、EM2三型混源特征。

(4)渤海湾盆地晚中生代以来伸展断陷的力源包括板块相对运动产生的引张力、深部热物质对流产生的引张力、郯庐断裂走滑活动产生的伸展。其中,盆地晚中生代变形的力源以板块相对运动产生的引张力为主,同时接受郯庐断裂的改造;盆地新生代伸展的力源以软流圈地幔上涌产生的引张力为主。

### 参考文献(References):

- [1] 李思田. 中国东部及邻区中、新生代盆地演化及地球动力学背景[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997: 1-238.  
Li Sitian. Evolution of Mesozoic and Cenozoic Basins in Eastern China and Their Geodynamic Background[M]. Wuhan: China University of Geoscience Press, 1997: 1-238 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张岳桥, 赵越, 董树文, 等. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段[J]. 地学前缘, 2004, 11(3): 123-133.

- Zhang Yueqiao, Zhao Yue, Dong Shuwen, et al. Tectonic evolution stages of the Early Cretaceous rift basins in Eastern China and adjacent areas and their geodynamic background[J]. Earth Science Frontiers, 2004, 11(3): 123-133 (in Chinese with English abstract).
- [3] 索艳慧, 李三忠, 戴黎明, 等. 东亚及其大陆边缘新生代构造迁移与盆地演化[J]. 岩石学报, 2012, 28(8): 2602-2618.  
Suo Yanhui, Li Sanzhong, Dai Liming, et al. Cenozoic tectonic migration and basin evolution in East Asia and its continental margins[J]. Acta Petrologica Sinica, 2012, 28(8): 2602-2618 (in Chinese with English abstract).
- [4] 马杏垣, 刘和甫, 王维襄, 等. 中国东部中、新生代裂陷作用和伸展构造[J]. 地质学报, 1983, 57(1): 22-32.  
Ma Xingyuan, Liu Hefu, Wang Weixiang, et al. Meso-Cenozoic taphrogeny and extensional tectonics in Eastern China[J]. Acta Geologica Sinica, 1983, 57(1): 22-32 (in Chinese with English abstract).
- [5] 漆家福, 张一伟, 陆克政, 等. 渤海湾新生代裂陷盆地的伸展模式[J]. 石油实验地质, 1995, 17(4): 316-323.  
Qi Jiafu, Zhang Yiwei, Lu Kezheng, et al. Extensional pattern and dynamic process of the Cenozoic rift basin in the Bohai Bay[J]. Experimental Petroleum Geology, 1995, 17(4): 316-323 (in Chinese with English abstract).
- [6] Uyeda S. Subduction zones: An introduction to comparative subductology[J]. Tectonophysics, 1981, 81: 133-159.
- [7] Honza E, Fujioka K. Formation of arcs and back-arc basins inferred from the tectonic evolution of Southeast Asia since the Late Cretaceous[J]. Tectonophysics, 2004, 384: 23-53.
- [8] 周建勋, 周建生. 渤海湾新生代构造变形机制: 物理模拟和讨论[J]. 中国科学(D辑), 2006, 36(6): 507-519.  
Zhou Jianxun, Zhou Jiansheng. The mechanism of Cenozoic structure deformation in Bohai Bay: Physical experiment and discuss[J]. Science in China (Ser. D), 2006, 36(6): 507-519 (in Chinese).
- [9] Ren J Y, Tamaki K, Li S T, et al. Late Mesozoic and Cenozoic rifting and its dynamic setting in Eastern China and adjacent areas[J]. Tectonophysics, 2002, 344(3/4): 175-205.
- [10] Ye H, Shedlock K M, Hellinger S J, et al. The North China basin: an example of a Cenozoic rifted intraplate basin[J]. Tectonics, 1985, 4(2): 153-169.
- [11] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 37(6): 845-851.  
Hou Guiting, Qian Xianglin, Cai Dongsheng. The Tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2001, 37(6): 845-851 (in Chinese with English abstract).
- [12] Chen W P, Nábelek J. Seismic strike-slip faulting and the development of the North China basin[J]. Tectonics, 1988, 7(5): 975-989.
- [13] 朱光, 胡召齐, 陈印, 等. 华北克拉通东部早白垩世伸展盆地的

- 发育过程及其对克拉通破坏的指示[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1594–1604.
- Zhu Guang, Hu Zhaoqi, Chen Yin, et al. Evolution of Early Cretaceous extensional basins in the eastern North China craton and its implication for the craton destruction[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10): 1594–1604 (in Chinese with English abstract).
- [14] 刘俊来, 关会梅, 纪沫, 等. 华北晚中生代变质核杂岩构造及其对岩石圈减薄机制的约束[J]. 自然科学进展, 2006, 16(1): 21–26.
- Liu Junlai, Guan Huimei, Ji Mo, et al. The Late Mesozoic metamorphic core complex and its constraints to the lithospheric thinning in North China[J]. Natural Science Progress, 2006, 16(1): 21–26 (in Chinese).
- [15] 任建业, 于建国, 张俊霞. 济阳拗陷深层构造及其对中生代盆地发育的控制作用[J]. 地学前缘, 2009, 16(4): 117–137.
- Ren Jianye, Yu Jianguo, Zhang Junxia. Structures of deep bed in Jiyang Sag and their control over the development of Mesozoic and Cenozoic basins[J]. Earth Science Frontiers, 2009, 16(4): 117–137 (in Chinese with English abstract).
- [16] 李伟. 渤海湾盆地中生代盆地演化与前第三系油气勘探[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2007: 8–15.
- Li Wei. Mesozoic Basin Evolution and the Exploration of the Pre-Tertiary Petroleum in the Area of Bohai Bay Basin[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2007: 8–15 (in Chinese with English abstract).
- [17] Buck W R. Models of continental lithospheric extension[J]. Journal of Geophysical Research, 1991, 96 (B12): 20161–20178.
- [18] 朱日祥, 徐义刚, 朱光, 等. 华北克拉通破坏[J]. 中国科学(D辑), 2012, 42(8): 1135–1159.
- Zhu Rixiang, Xu Yigang, Zhu Guang, et al. Destruction of the North China Craton[J]. Science in China (Ser. D), 2012, 42(8): 1135–1159 (in Chinese).
- [19] 张超, 马昌前, 廖群安, 等. 渤海湾黄啤盆地晚中生代–新生代火山岩地球化学岩石成因及构造体制转换[J]. 岩石学报, 2009, 25(5): 1159–1177.
- Zhang Chao, Ma Changqian, Liao Qunan, et al. Geochemistry of Late Mesozoic–Cenozoic volcanic rocks in the Huanghua depression, Bohai Bay: Petrogenesis and implications for tectonic transition[J]. Acta Petrologica Sinica, 2009, 25(5): 1159–1177 (in Chinese with English abstract).
- [20] 王盘喜, 杨霄, 卞孝东. 冀中拗陷火成岩岩石学及地球化学特征[J]. 地质科技情报, 2012, 31(4): 1–10.
- Wang Panxi, Yang Xiao, Bian Xiaodong. Petrologic and geochemical characteristics of igneous rock in Jizhong depression[J]. Geological Science and Technology Information, 2012, 31(4): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- [21] Li H Y, Huang X L, Guo H. Geochemistry of Cenozoic basalts from the Bohai Bay Basin: implications for a heterogeneous mantle source and lithospheric evolution beneath the eastern North China Craton[J]. Lithos, 2014, 196/197: 54–66.
- [22] 赵国连. 济阳凹陷火山岩的岩石学与地球化学[J]. 矿物学报, 2006, 26(3): 335–345.
- Zhao Guolian. Petrology and geochemistry of igneous rocks in Jiyang depression[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(3): 335–345 (in Chinese with English abstract).
- [23] 古团, 陈淑凤, 苑丽, 等. 辽河盆地新生代火山岩地球化学特征及其与油气成藏的关系[J]. 矿物学报, 2006, 26(3): 325–334.
- Gu Tuan, Chen Shufeng, Yuan Li, et al. Geochemical characteristics of Cenozoic volcanic rocks and their correlations with hydrocarbon accumulation in Liaohe basin[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2006, 26(3): 325–334 (in Chinese with English abstract).
- [24] Sugisaki R. Chemical characteristics of volcanic rocks: Relation to plate movements[J]. Lithos, 1976, 9: 17–30.
- [25] Qiu N S, Zuo Y H, Chang J, et al. Geothermal evidence of Mesozoic–Cenozoic lithosphere thinning in the Jiyang sub-basin, Bohai Bay Basin, eastern North China Craton[J]. Gondwana Research, 2014, 26(3–4): 1079–1092.
- [26] 杨绪充. 济阳拗陷中生代古地温分析[J]. 石油大学学报, 1988, 12(3): 23–33.
- Yang Xuchong. Paleogeothermal analyses of the Mesozoic and the Cenozoic in Jiyang depression[J]. Journal of the China University of Petroleum, 1988, 12(3): 23–33 (in Chinese with English abstract).
- [27] 钱青, 钟孙霖, 李通艺, 等. 八达岭基性岩和高Ba–Sr花岗岩地球化学特征及成因探讨: 华北和大别–苏鲁造山带中生代岩浆岩的对比[J]. 岩石学报, 2002, 18(3): 275–292.
- Qian Qing, Zhong Sunlin, Li Tongyi, et al. Geochemical characteristics and petrogenesis of the Badaling high Ba–Sr granitoids: a comparison of igneous rocks from North China and the Dabie–Sulu Orogen[J]. Acta Petrologica Sinica, 2002, 18(3): 275–292 (in Chinese with English abstract).
- [28] 董建华, 陈斌, 周凌. 太行山南段符山岩体的成因: 岩石学和地球化学证据[J]. 自然科学进展, 2003, 13(7): 767–774.
- Dong Jianhua, Chen Bin, Zhou Ling. The origin of Fushan rock mass in south of Taihang mountain: evidence from petrology and geochemistry[J]. Natural Science Process, 2003, 13(7): 767–774 (in Chinese).
- [29] 杨蔚. 辽西中生代火山岩年代学及地球化学研究: 对华北克拉通岩石圈减薄机制的制约[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- Yang Wei. Geochronology and geochemistry of the Mesozoic volcanic rocks in Western Liaoning: constraints on mechanism for the lithospheric thinning in the North China Craton[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [30] Jiang W L, Wang X, Tian T, et al. Detailed crustal structure of the North China and its implication for seismicity[J]. Journal of Asian



- Earth Sciences, 2014, 81: 53–64.
- [31] 龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等. 济阳拗陷大地热流分布特征[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(4): 384–391.  
Gong Yuling, Wang Liangshu, Liu Shaowen, et al. The geothermal distributions in Jiyang depression[J]. Science in China (Ser. D), 2003, 33(4): 384–391 (in Chinese).
- [32] 万天丰. 山东省构造演化与应力场研究[J]. 山东地质, 1992, 8(2): 70–101.  
Wan Tianfeng. Tectonic evolution and stress fields of Shandong province[J]. Shandong Geology, 1992, 8(2): 70–101 (in Chinese with English abstract).
- [33] Lister G S, Etheridge M A, Symonds P A. Detachment models for the formation of passive continental margins[J]. Tectonics, 1991, 10(5): 1038–1064.
- [34] 魏文博, 叶高峰, 金胜, 等. 华北地区东部岩石圈导电性结构研究—减薄的华北岩石圈特点[J]. 地学前缘, 2008, 15(4): 204–216.  
Wei Wenbo, Ye Gaofeng, Jin Sheng, et al. Geoelectric structure of lithosphere beneath eastern North China: Features of thinned lithosphere from magnetotelluric soundings[J]. Earth Science Frontiers, 2008, 15(4): 204–216 (in Chinese with English abstract).
- [35] 陆诗阔, 李继岩, 吴孔友, 等. 冀中拗陷潜山构造演化特征及其石油地质意义[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(11): 35–40.  
Lu Shikuo, Li Jiyan, Wu Kongyou, et al. Tectonic evolution of buried hill in Jizhong depression and the petroleum geological significance[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(11): 35–40 (in Chinese with English abstract).
- [36] 董敏, 漆家福, 杨桥, 等. 渤海湾盆地黄骅拗陷新生代伸展量的时空分布特征[J]. 古地理学报, 2013, 15(3): 327–338.  
Dong Min, Qi Jiafu, Yang Qiao, et al. Characteristics of extension amounts and their temporal and spatial distribution of the Cenozoic of Huanghua depression in Bohai Bay Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 15(3): 327–338 (in Chinese with English abstract).
- [37] 金春爽, 乔德武, 淡伟宁. 渤海湾盆地中、新生代火山岩分布及油气藏特征[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 19–36.  
Jin Chunshuang, Qiao Dewu, Dan Weining. Meso–Cenozoic volcanic rock distribution and reservoir characteristics in the Bohai Bay Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 19–36 (in Chinese with English abstract).
- [38] 孔凡仙. 东营凹陷中生代火山岩地球化学初步研究[J]. 矿物学报, 2000, 20(3): 293–297.  
Kong Fanxian. Geochemical characteristics of Mesozoic volcanic rocks and their tectonic setting in the Dongying depression[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2000, 20(3): 293–297 (in Chinese with English abstract).
- [39] 赫英, 王定一, 廖永胜. 胜利油田火山岩类、盆地演化及其CO<sub>2</sub>–Au成藏成矿效应[J]. 地质科学, 2001, 36(4): 454–464.  
He Ying, Wang Dingyi, Liao Yongsheng. Volcanic rocks, basin evolution and related CO<sub>2</sub>–Au mineralization in Shengli oilfield, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2001, 36(4): 454–464 (in Chinese with English abstract).
- [40] 陈全茂, 李中飞. 辽河盆地东部凹陷构造及其含油气性分析[M]. 北京: 地质出版社, 1998: 55–98.  
Chen Quanmao, Li Zhongfei. The Eastern Sags' Structure and Its Oil–Gas Potential Analysis in Liaohe Basin[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1998: 55–98 (in Chinese).
- [41] 沈渭洲, 赵连泽, 赵明, 等. 山东济阳拗陷第三纪玄武岩的铅同位素研究[J]. 地质学报, 2002, 76(1): 33–38.  
Shen Weizhou, Zhao Lianze, Zhao Ming, et al. Study on the lead isotopic compositions of Tertiary basalts in the Jiyang depression basin, Shandong province[J]. Acta Geologica Sinica, 2002, 76(1): 33–38 (in Chinese with English abstract).
- [42] 郭华, 夏斌, 王润红, 等. 渤海湾盆地阳信地区古近纪玄武岩地球化学特征及其地质意义[J]. 地球化学, 2006, 35(3): 227–239.  
Guo Hua, Xia Bin, Wang Runhong, et al. Geochemistry and geotectonic significance of Eocene basalts in Yangxin area, Bohai bay basin[J]. Geochimica, 2006, 35(3): 227–239 (in Chinese with English abstract).
- [43] 宁培松, 龙群, 程婷, 等. 鲁西地块晚中生代中–基性岩地球化学和Sr–Nd–Pb同位素组成特征[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(4): 62–76.  
Ning Peisong, Long Qun, Cheng Ting, et al. Geochemistry and Sr–Nd–Pb isotopic composition of Late Mesozoic intermediate–basic rock in Western Shandong Block[J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(4): 62–76 (in Chinese with English abstract).
- [44] 杨承海, 许文良, 杨德彬, 等. 鲁西上峪辉长–闪长岩的成因: 年代学与岩石地球化学证据[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(1): 44–55.  
Yang Chenghai, Xu Wenliang, Yang Debin, et al. The origin of Gabbro diorite in Shangyu, Western Shandong: Evidence from chronology and petro–geochemistry[J]. Science in China(Ser. D), 2008, 38(1): 44–55 (in Chinese).
- [45] 裴福萍, 许文良, 王清海, 等. 鲁西费县中生代玄武岩及幔源捕虏晶的矿物化学: 对岩石圈地幔性质的制约[J]. 高校地质学报, 2004, 10(1): 88–97.  
Pei Fuping, Xu Wenliang, Wang Haiqing, et al. Mesozoic basalt and mineral chemistry of the mantle–derived xenocrysts in Feixian, Western Shandong, China: constraints on nature of Mesozoic lithospheric mantle[J]. Geological Journal of China Universities, 2004, 10(1): 88–97 (in Chinese with English abstract).
- [46] Lan T G, Fan H R, Hu F F, et al. Multiple crust–mantle interactions for the destruction of the North China Craton: Geochemical and Sr–Nd–Pb–Hf isotopic evidence from the Longbaoshan alkaline complex[J]. Lithos, 2011, 122: 87–106.
- [47] Lan T G, Fan H R, Santosh M, et al. Geochemistry and Sr–Nd–

- Pb–Hf isotopes of the Mesozoic Dadian alkaline Intrusive complex in the Sulu orogenic belt, eastern China: implications for crust–mantle interaction[J]. *Chemical Geology*, 2011, 285: 97–114.
- [48] 王永, 范宏瑞, 胡芳芳, 等. 鲁西沂南铜井闪长质岩体锆石U–Pb年龄、元素及同位素地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2011, 30(4): 553–566.
- Wang Yong, Fan Hongrui, Hu Fangfang, et al. Zircon U–Pb ages and geochemistry of elements and isotopes of the diorite from Tongjing, Yinan, western Shandong province[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2011, 30(4): 553–566 (in Chinese with English abstract).
- [49] Yang J H, Chung S L, Zhai M G, et al. Geochemical and Sr–Nd–Pb isotopic compositions of mafic dikes from the Jiaodong Peninsula, China: evidence for vein–plus–peridotite melting in the lithospheric mantle[J]. *Lithos*, 2004, 73: 145–160.
- [50] Yang J H, Wu F Y, Chuang S L, et al. Multiple sources for the origin of granites: Geochemical and Nd/Sr isotopic evidence from the Gudaoling granite and its mafic enclaves, northeast China[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2004, 68(21): 4469–4483.
- [51] 李伍平, 路凤香, 李献华, 等. 北京西山髻髻山组火山岩的地球化学特征与岩浆起源[J]. *岩石矿物学杂志*, 2001, 20(2): 123–133.
- Li Wuping, Lu Fengxiang, Li Xianhua, et al. Geochemical features and origin of volcanic rocks of Tiaojishan formation in Western Hills of Beijing[J]. *Acta Petrologica et mineralogica*, 2001, 20(2): 123–133 (in Chinese with English abstract).
- [52] 魏喜, 宋柏荣, 李学万, 等. 辽河断陷盆地火山岩储层岩石学及地球化学特征[J]. *特种油气藏*, 2003, 10(1): 13–17.
- Wei Xi, Song Bairong, Li Xuewan, et al. Petrology and geochemistry characteristics of volcanic reservoirs in Liaohe basin[J]. *Special Oil and Gas Reservoirs*, 2003, 10(1): 13–17 (in Chinese with English abstract).
- [53] Zindler A, Hart S. Chemical geodynamics[J]. *Annual Reviews Earth Planet Science*, 1986, 14: 493–571.
- [54] Wilson M. Magmatism and the geodynamics of basin formation[J]. *Sedimentary Geology*, 1993, 86(1–2): 5–29.
- [55] Zhang H F, Sun M, Zhou X H, et al. Geochemical constraints on the origin of Mesozoic alkaline intrusive complexes from the North China Craton and tectonic implications[J]. *Lithos*, 2005, 81: 297–317.
- [56] 漆家福, 周心怀, 王谦身. 渤海海域中庐深断裂带的结构模型及新生代运动学[J]. *中国地质*, 2010, 37(5): 1231–1242.
- Qi Jiafu, Zhou Xinhui, Wang Qianshen. Structural model and Cenozoic kinematics of Tan–Lu deep fracture zone in Bohai Sea area[J]. *Geology in China*, 2010, 37(5): 1231–1242 (in Chinese with English abstract).
- [57] 肖庆辉, 刘勇, 冯艳芳, 等. 中国东部中生代岩石圈演化与太平洋板块俯冲消减关系的讨论[J]. *中国地质*, 2010, 37(4): 1092–1101.
- Xiao Qinghui, Liu Yong, Feng Yanfang, et al. A preliminary study of the relationship between Mesozoic lithosphere evolution in eastern China and the subduction of the Pacific plate[J]. *Geology in China*, 2010, 37(4): 1092–1101 (in Chinese with English abstract).
- [58] 李三忠, 索艳慧, 刘鑫, 等. 南海的盆地群与盆地动力学[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2012, 32(6): 55–78.
- Li Sanzhong, Suo Huiyan, Liu Xin, et al. Basin dynamics and basin groups of the South China Sea[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2012, 32(6): 55–78 (in Chinese with English abstract).
- [59] 朱炳泉, 王慧芬, 陈毓蔚, 等. 新生代华夏岩石圈减薄与东亚边缘海盆构造演化的年代学与地球化学制约研究[J]. *地球化学*, 2002, 31(3): 213–221.
- Zhu Bingquan, Wang Huifen, Chen Yuwei, et al. Geochronological and geochemical constraint on the Cenozoic extension of Cathaysian lithosphere and tectonic evolution of the border sea basins in East Asia[J]. *Geochimica*, 2002, 31(3): 213–221 (in Chinese with English abstract).
- [60] 葛肖虹, 刘俊来, 任收麦, 等. 中国东部中—新生代大陆构造的形成与演化[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 19–38.
- Ge Xiaohong, Liu Junlai, Ren Shoumai, et al. The formation and evolution of the Mesozoic–Cenozoic continental tectonics in eastern China[J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 19–38 (in Chinese with English abstract).
- [61] Maruyama S, Isozaki Y, Kimura G, et al. Paleogeographic maps of the Japanese Islands: Plate tectonic synthesis from 750 Ma to the present[J]. *The Island Arc*, 1997, 6: 121–142.
- [62] Thorkelson D. Subduction of diverging plates and the principles of slap window formation[J]. *Tectonophysics*, 1996, 255(1–2): 47–63.
- [63] 钟大赉, 丁林, 季建清, 等. 中国西部新生代岩石圈汇聚和东部岩石圈离散的耦合关系与古环境格局演变的探讨[J]. *第四纪研究*, 2001, 21(4): 303–312.
- Zhong Dalai, Ding Lin, Ji Jianqing, et al. Coupling of the lithospheric convergence of west China and dispersion of east China in Cenozoic: Link with paleoenvironmental changes[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(4): 303–312 (in Chinese with English abstract).