

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.174>



黄海及邻区晚中生代构造转换与原型盆地构造格局

周瑶琪¹, 张悦^{1,2}, 周腾飞¹, 商跃瀚¹, 李孙义¹, 白冰洋¹, 陈扬¹, 穆宏玉¹

1. 中国石油大学地球科学与技术学院, 山东青岛 266580

2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015

摘要: 古太平洋板块的俯冲、回卷(rollback)及俯冲方向的转变对中国黄海及邻近地区盆地的发育有着重要的影响。综合利用野外剖面、钻井岩心和地震剖面等, 对比分析不同盆地间沉积充填历史, 识别出不同时期应力场方向的变化和主要构造变形样式, 对主要断裂进行界定, 为关键时间节点提供证据, 并恢复了侏罗纪—白垩纪的构造演化过程。结果表明: (1) 在古太平洋板块俯冲作用背景下, 受郯庐断裂带 F1 和朝鲜半岛西部断裂带 F2 两个主控断裂带共同的控制作用, 盆地经历了多期“伸展”和“挤压”的构造应力场的转变, 性质各不相同; (2) 构造演化可划分为 6 个阶段: 莱阳期近南北向拉伸, 发育被动裂谷; 125±1 Ma 阶段, 热隆挤压造成轻微构造反转, 形成隆起区的角度不整合; 青山期近东西向滑脱伸展形成主动裂谷性质的火山弧盆; 87.5±2.5 Ma 挤压阶段, 经历了大规模左旋走滑, 形成区域角度不整合; 王氏期热沉降, 形成带走滑拉分性质的大面积凹陷; 50±5 Ma 挤压阶段, 主要在 F1、F2 断裂经历右旋走滑; (3) 估算了挤压阶段的走滑量, 对伸展阶段的伸展率、沉降率进行了计算。首次恢复了中国黄海及邻近地区晚中生代挤压构造幕演化之前的构造格局和盆地原型, 并解释了古太平洋板块俯冲作用对黄海及邻区构造格局演变的影响。

关键词: 中生代; 莱阳期; 青山期; 王氏期; 裂谷盆地; 古太平洋板块俯冲; 中国黄海; 构造地质学。

中图分类号: P54

文章编号: 1000-2383(2023)04-1461-20

收稿日期: 2022-04-12

Tectonic Transition of the Late-Mesozoic Yellow Sea and Adjacent Region and Its Tectonic Framework of the Proto-Basin

Zhou Yaoqi¹, Zhang Yue^{1,2}, Zhou Tengfei¹, Shang Yuehan¹, Li Sunyi¹, Bai Bingyang¹, Chen Yang¹, Mu Hongyu¹

1. School of Geoscience and Technology, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

2. Exploration and Development Research Institute, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying 257015, China

Abstract: The subduction, rollbacking and the direction of the subduction of the Paleo-Pacific Plate had a significant influence on the development of the basins in the Yellow Sea and its adjacent areas. According to the drilling core data of the field profile and marine seismic profile, the sedimentation between different basins is compared and analyzed, and the changes of the stress field direction and main tectonic deformation framework in different periods are identified. Meanwhile, the main faults are defined, critical time nodes have provided evidence, and the research area's tectonic transition from the Jurassic to the Cretaceous is restored. The results indicate that: (1) Under the background of the subduction of the paleo-pacific plate, the basin has undergone multiple stages of 'extension' and 'compression' structural stress fields and under the joint control of the two main fault zones of

基金项目: 山东省重点研发计划重大创新工程(No. 2017CXGC1608); 国家自然科学基金项目(No. 4177020732); 中国石化科技部独立课题(No. P20028); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(No. 19CX05004A)。

作者简介: 周瑶琪(1963—), 男, 教授, 主要从事地球化学及盆地动力学等方面的研究工作。E-mail: zhouyq@upc.com.cn

引用格式: 周瑶琪, 张悦, 周腾飞, 商跃瀚, 李孙义, 白冰洋, 陈扬, 穆宏玉, 2023. 黄海及邻区晚中生代构造转换与原型盆地构造格局. 地球科学, 48(4): 1461-1480.

Citation: Zhou Yaoqi, Zhang Yue, Zhou Tengfei, Shang Yuehan, Li Sunyi, Bai Bingyang, Chen Yang, Mu Hongyu, 2023. Tectonic Transition of the Late-Mesozoic Yellow Sea and Adjacent Region and Its Tectonic Framework of the Proto-Basin. *Earth Science*, 48(4): 1461-1480.

the Tanlu fault zone F1 and the western Korean Peninsula fault zone F2. (2) During Laiyang period, passive rift was developed due to the stretching from south to north; At 125 ± 1 Ma stage, thermal uplift extrusion caused slight tectonic inversion and formed angular unconformity in the uplift area; The volcanic arc basin with active rift was formed during the Qingshan period; At the extrusion stage of 87.5 ± 2.5 Ma, large-scale sinistral strike-slip occurred and regional angular unconformity was formed; The thermal subsidence in Wang stage formed a large area depression with the nature of take-away slip and pull-apart; At the extrusion stage of 50 ± 5 Ma, dextral strike-slip occurred mainly at F1 and F2 faults. (3) In this paper, the strike-slip amount in the extrusion stage is estimated, and the elongation and settlement rate in the extension stage are calculated. It is the first time to reconstruct the tectonic framework and basin prototype before the evolution of the Late Mesozoic compressive tectonic episode in the Yellow Sea and adjacent areas of China, and to explain the influence of the subduction of the Paleo-Pacific plate on the evolution of the tectonic framework in the Yellow Sea and adjacent areas.

Key words: Mesozoic Era; Layang period; Qingshan period; Wang period; rift basin; Paleo-Pacific Plate subduction; The Chinese Yellow Sea; structural geology.

0 引言

中国东部经历了印支期扬子、华北板块的碰撞造山、华北板块向南东楔入扬子板块(Li *et al.*, 2017), 统一的大陆雏形形成后, 经历了燕山期古太平洋板块俯冲、回卷(rollback)及方向的转变。侏罗纪—白垩纪期间, 中国东部的大地构造活动大都与古太平洋板块的俯冲有关(朱光等, 2018)。板块的俯冲及方向的改变伴随着岩浆活动、裂隙作用及伸展变形, 在此基础上发育了一系列叠合盆地, 并记录了应力场转变。同时古太平洋板块的俯冲造成中国东部高原的形成。张旗等(2007)根据埃达克岩的分布范围及热河生物群的出现对东部高原的北界限进行了限定, 从晚侏罗世至早白垩世高原界限南移; 据埃达克岩形成的时限对高原的起始和消亡时间进行大致限定, 认为其 170 Ma 之前开始出现, 晚侏罗世达到顶峰, 120 Ma 从北缘开始垮塌。Zhang *et al.* (2016) 认为晚白垩世东亚沿海部位存在古山脉, 其形成是由于晚白垩世古太平洋板块中的 Okhotomorsk 块体与欧亚板块东部的碰撞, 通过碳酸盐块状同位素古地温测定的方法可对山脉高度进行估算(Zhang *et al.*, 2016)。夏国清等(2012)通过对晚中生代中国东部高原北缘的气孔状玄武岩定量研究古高程的结果, 认为玄武岩喷发时古高程约 $4\ 700 \pm 750$ m。周瑶琪等(2018)通过山东半岛青山期穿地壳岩浆系统热隆高度的分析, 认为在 125~115 Ma 期间地壳累计隆升约 4 000 m, 考虑同时期的剥蚀速率, 该地区最大古高程约 2 500 m 左右。说明晚中生代中国东部的确存在一个海拔较高的古地貌, 其隆升高度达 2 000~5 000 m。尽管关于晚中生代中国东部高原的认识还有争议, 但争议主要局

限在高程的大小程度、高原分布范围及其变化等方面。

中国黄海及邻近地区中生代以来受古太平洋板块俯冲作用影响, 经历了燕山运动、华北克拉通破坏及大规模岩浆作用等重要事件, 然而对这些构造事件的动力学机制一直存在不同的认识。

针对研究区范围内山东东部近海日青威盆地的研究历史, 近十年以来有多种看法:

吕洪波等(2011)认为日青威盆地内灵山岛的形成与挤压作用相关: 在灵山岛碎屑岩中发现远源浊积岩, 认为该套浊积岩在褶皱之前受到了 SE-NW 向的动态挤压, 为扬子板块和华北板块碰撞背景下残余洋盆的产物。部分学者认为山东东部近海日青威盆地是一个形成在碰撞造山运动之后, 发育于苏鲁造山带之上, 受古太平洋板块俯冲作用控制, 并区别于周缘盆地的晚中生代裂隙盆地(Liang *et al.*, 2018; Liu and Zhou, 2019; Liu *et al.*, 2019; Zhang *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2022; 周瑶琪等, 2022)。它的形成与岩石圈地幔拆沉导致的造山带垮塌密切相关。盆地内莱阳群软沉积物变形多样并广泛存在, 认为该地区地震及火山活动频繁(周瑶琪等, 2015), 可将部分软沉积变形归位于震积岩大类(王安东等, 2014); 灵山岛内出现大量地层变形、断块掀斜翘起等构造特征, 是由于多期次挤压作用造成(刘菲菲等, 2016); 周腾飞等(2022)认为苏鲁造山带内部晚侏罗世—早白垩世发生了被动及主动两期裂谷作用, 并建立了灵山岛地区莱阳群—青山群地层序列。

然而这些观点仅限在灵山岛或山东东部小范围尺度的研究, 研究方向以沉积及火山作用为主, 关于研究区的构造和演化历史很少有详细的研究

工作. 为建立黄海及邻近地区的构造及演化历史, 对日青威盆地及周缘盆地进行了大量野外地质考察, 并实施了灵科 1 科学钻探井 (Ma *et al.*, 2022), 开展了磁性地层和年代地层学工作 (Cheng *et al.*, 2022), 对郯庐断裂带以东不同盆地内的中生代地层进行对比, 发现不同盆地间的火成岩具有可对比性, 建立了这一系列盆地晚中生代地层对比和构造层划分模式, 明确几期大的走滑运动对应的不整合面时限, 并对应力场进行分析, 在平面上恢复了不同伸展阶段的原型盆地构造格局, 探讨了中国东部高原分布范围和变化趋势. 明确了古太平洋板块俯冲角度和方向的变化是中国黄海及邻近地区晚中生代构造演化的主要控制因素.

1 区域地质背景

研究区范围包括郯庐断裂带以东的华北克拉通, 山东半岛沿苏鲁造山带延伸至朝鲜半岛所围限的整个黄海海域. 华北克拉通东部在侏罗纪—白垩纪的岩浆活动属于弧后岩浆活动 (Wu, 2005; Kusky *et al.*, 2014; Zhu *et al.*, 2017, 马志杰等, 2022). 苏鲁造山带沿山东半岛可延伸至朝鲜半岛中部, 先后受郯庐断裂带和纵贯朝鲜西海的断裂带的共同作用, 经过 87.5 ± 2.5 Ma 及 50 ± 5 Ma 两期走滑运动以及晚中生代 3 期伸展活动, 控制了研究区范围内盆地的形成和演化而造就现今的构造, 包括北黄海盆地、南黄海盆地、胶莱盆地、日青威盆地及朝鲜半岛平南盆地和庆尚盆地在内的一系列断陷盆地现今的构造格局 (图 1). 朝鲜半岛被近 NE-SW 向

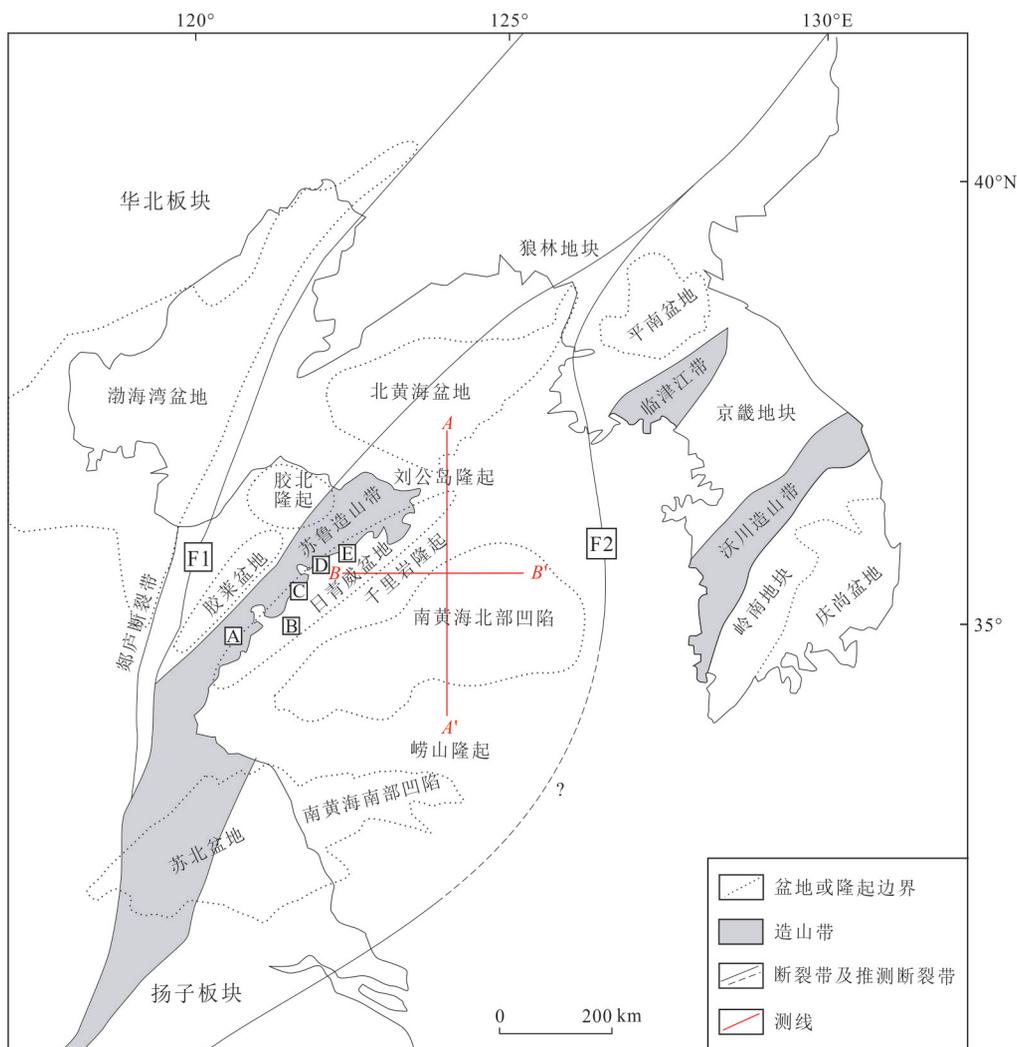


图 1 黄海及邻近地区构造关系简图

Fig. 1 Tectonic relation diagram of Yellow Sea and adjacent area

野外剖面位置: A. 桃林; B. 灵山岛; C. 崂山; D. 周戈庄; E. 丁字湾

的临津江带和沃川造山带切割分为 3 个地块,自北向南分别是狼林地块、京畿地块、岭南地块。

华北克拉通和扬子板块在三叠纪发生陆陆碰撞并拼合在一起,碰撞同时形成大别—苏鲁造山带(Zhang *et al.*, 2003),在这个时期,苏鲁造山带与朝鲜半岛的沃川造山带相连,而沃川造山带以南的岭南地块位置与中国的扬子板块位置相当,形成了很多晚印支期—早燕山期碰撞花岗岩,朝鲜半岛的碰撞花岗岩非常普遍,花岗岩年龄多在 184~167 Ma(李三忠等, 2018),华北克拉通的侏罗纪花岗岩年龄多在 165~145 Ma(张艳斌等, 2016),多发育在中国东北地区。说明印支期朝鲜半岛的碰撞作用早于而且强于中国东部,该时期苏鲁造山带在朝鲜半岛的东延部分由于强烈的碰撞作用形成逆冲构造。李三忠等(2011)对中国东部晚燕山期岩浆岩的时空分布分析发现,它们都是典型的岛弧型岩浆岩,空间上总体平行复原后的古太平洋板块。侏罗纪火山岩在朝鲜半岛局部出露于太白山盆地,酸性火山岩年龄为 186~187 Ma(Han *et al.*, 2006),华北克拉通地区的岩浆岩年龄大都在燕山晚期。燕山期从朝鲜半岛到中国东部,火成岩年龄表现出“自东向西逐渐变年轻,然后再自西向东变年轻”的趋势,表现了古太平洋板块平板俯冲并回卷(rollback)的俯冲历史。

2 地层对比

南黄海盆地下白垩统葛村组一般表现为以暗色陆相碎屑沉积为主,偶尔发育有火山碎屑岩;中白垩统浦口组在整个下扬子地区分布广泛,一般表现为红色或褐色氧化环境下沉积的碎屑岩,少见火山岩;上白垩统泰州组,以上部黑色泥岩、下部褐色与灰色砂泥岩互层为特征,富含孢粉、介形虫化石。

日青威盆地中生代地层以莱阳群和青山群沉积为主。莱阳群以远源浊积岩、硅质岩与粉砂岩互层为特征;青山群以火山碎屑岩、火山熔岩流为特征;王氏群局部缺失,缺失部分是由于隆起区未接受沉积或遭受剥蚀,而坳陷区王氏群岩性以砂岩、含砾砂岩为主,局部夹火成岩。

胶莱盆地的沉积地层自下而上分别是莱阳群、青山群和王氏群,局部地区(平度地区)发育了少量的古近系沉积,断裂作用强烈,与下伏震旦系变质岩基底呈不整合接触关系(张连祥等, 2021)。莱阳群

岩性是以河、湖相沉积为主的碎屑岩,整体体现出一个湖盆发育的全过程,经历了洪积扇、河流相—湖泊相—河流相的完整旋回;青山群为一套岩性复杂的火山岩和火山碎屑岩系,其中夹少量碎屑岩。下部主要是英安质火山角砾岩、安山质集块岩和凝灰岩,中部主要是安山岩、安山质集块角砾岩夹凝灰岩,上部主要是紫灰色、灰黑色的安山岩、橄榄玄武岩以及安山玄武岩;王氏群是一套河流相红色碎屑岩夹滨浅湖相杂色碎屑岩及少量泥灰岩。

北黄海盆地的海上钻井中未钻穿三叠系,三叠系与侏罗系为不整合接触。不整合之上分别是上侏罗统的龙胜组、新义州组和早白垩统的白克忠组,其中新义州组和白克忠组之间以红层和假整合为标志。龙胜组由厚约 200 m 的河流相粉砂岩、页岩及砂岩与薄煤层的互层组成;新义州组厚约 550 m,由河成富含有机质的黑色页岩和砂岩组成,间夹薄灰岩层,底部为砾状砂岩,白克忠组主要由砂岩组成,厚度约 100 m。北黄海盆地由于青山末期的强烈隆升作用,缺失王氏期地层。

日青威盆地与周缘盆地具有不同的沉积环境,项目团队前期诸多研究表明:胶莱盆地、南黄海盆地和北黄海盆地的晚中生代地层为河流相、湖相沉积,而日青威盆地莱阳群发育以深水相的浊积岩和硅质碎屑岩为主,其沉积环境为在还原环境下的咸水或半咸水沉积(Zhang *et al.*, 2020; Ma *et al.*, 2022),反映了日青威盆地的莱阳群为海相或者海陆过渡相的沉积(图 2)。

3 构造及演化特征

3.1 重磁证据

根据前人对该区地球物理场的解释(梁瑞才等, 2001; 杨金玉, 2010),在重力及磁力异常图上可以看出,研究区被多条 NE 向断裂所分割,划分为不同区,与后文构造纲要图中的盆地—隆起相对应。重磁异常区图可划分为几大区,其中, F1 断裂为郯庐断裂带, F1 以西为鲁中隆起, F2 为朝鲜半岛西部的断裂带, F4 到 F6 之间为胶莱盆地所在地, F6 到 F7 之间为胶南隆起, F7 到 F8 之间为日青威残留盆地的位置, F8 到 F9 之间为千里岩隆起, F9 到 F2 之间的区域为南黄海及苏北盆地。4 区两侧为断裂带, F2 和 F36 从朝鲜半岛西部与中国江苏、浙江的苏湖—江绍断裂带基本相连。5 区为朝鲜半岛的南岭地块以南的区域(图 3, 图 4)。将构造纲要图和磁异

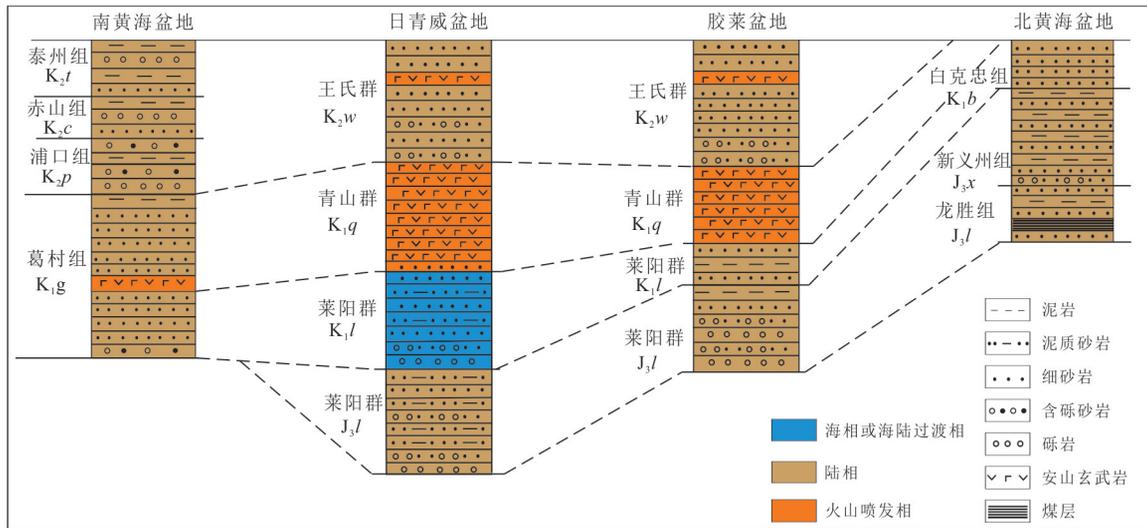


图 2 中国黄海及邻近地区沉积环境和地层对比图(据刘菲菲, 2019 修改)

Fig. 2 Sedimentary environment and stratigraphic contrast map of Yellow Sea and adjacent areas in China (modified from Liu, 2019)

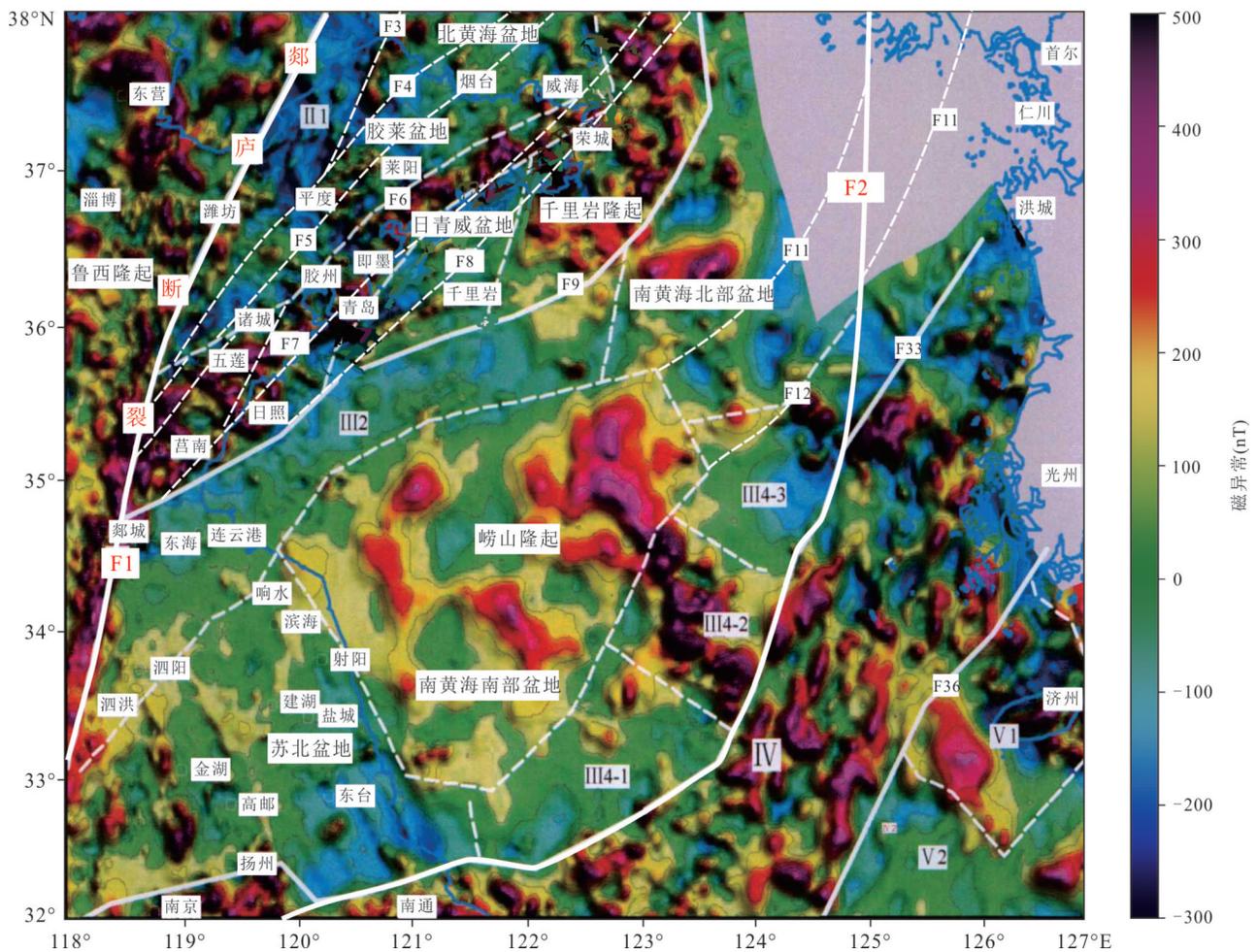


图 3 航磁 ΔT 化极异常分区(据杨金玉, 2010 修改)

Fig. 3 Anomaly zoning of aeromagnetic ΔT pole (modified from Yang, 2010)

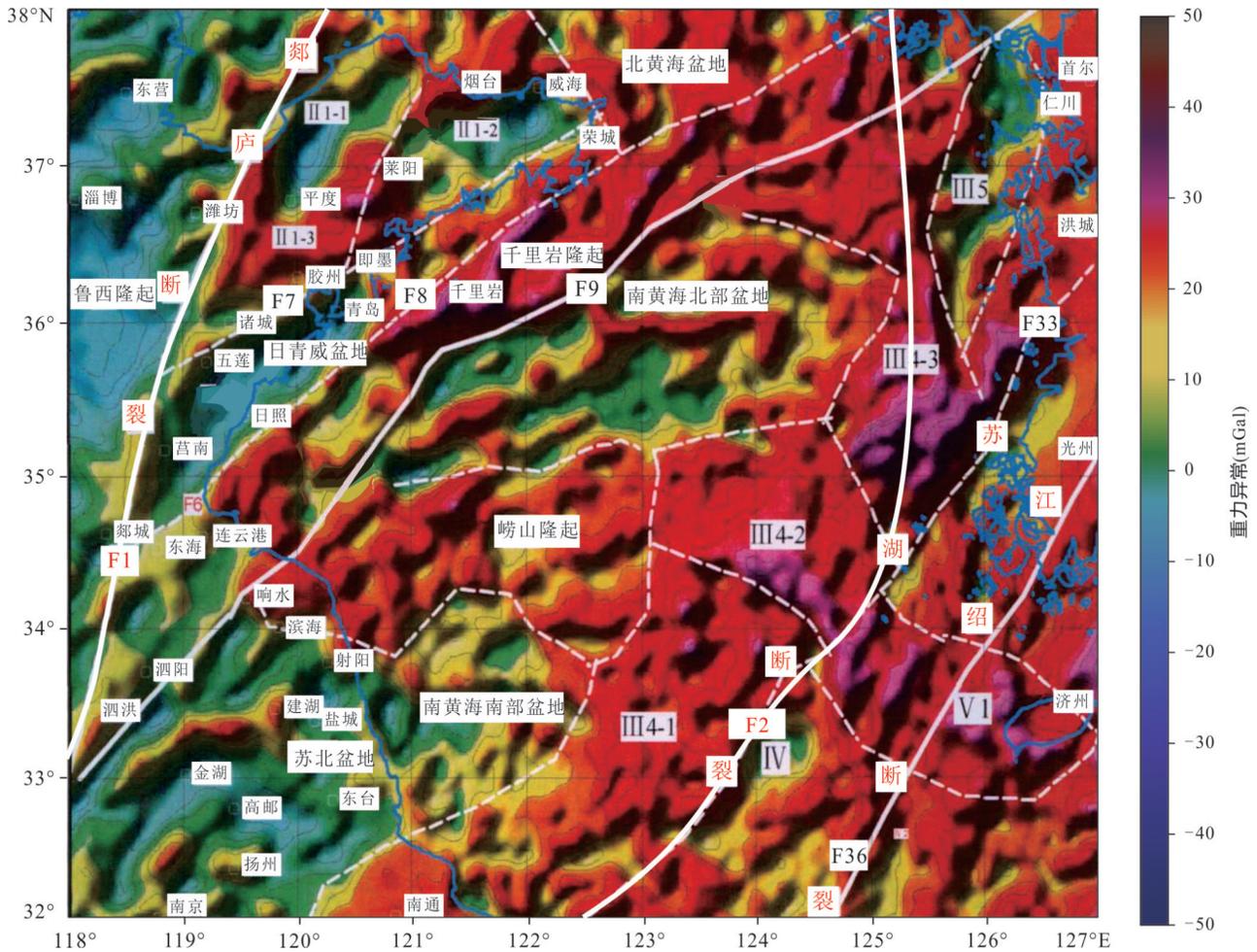


图 4 布格重力异常分区(据杨金玉,2010修改)

Fig.4 Aeromagnetic anomaly zone (modified from Yang, 2010)

常及重力异常图叠合后,磁异常及重力异常图的断裂边界和纲要图上的断裂边界基本相吻合。

3.2 古应力场分析

黄海及邻近地区在侏罗纪—白垩纪主要经历了3次伸展作用及3次挤压作用(张岳桥等,2004;周瑶琪等,2015,2018,2019,2022)(图5)。

应力场变化如下:(1)晚侏罗世—早白垩世早期(150~125 Ma),即莱阳期,受古太平洋板块向陆方向俯冲而造成岩石圈地幔拆沉作用的影响,使得板块内区域应力场呈NS向拉张作用为主,造成盆地开裂,断裂方向主要以EW向为主,形成大陆裂谷盆地。(2)莱阳期到青山期之间(125±1 Ma),由于莱阳末期开始的岩浆活动和热隆作用,造成古应力场由伸展转换到挤压,主要呈近EW方向,该区域发生的短暂的构造反转在热隆带及附近的盆地中形成角度不整合(图6c-3)。(3)早白垩世晚期(125.0~87.5 Ma),即青山期,盆地受大规模的地幔热隆抬升

作用,在海相裂陷盆地的基础上发育一系列陆相沉积,形成具伸展性质的主动裂谷盆地,并伴随有大量中酸性火山岩充填。(4)到了青山期和王氏期的转换期(87.5±2.5 Ma),由于古太平洋板块俯冲方向发生改变,由先前的NWW向俯冲变为NNW向俯冲,发生了大约5 Ma的挤压构造事件。区域构造应力场由青山期的伸展变为以NW-SE方向为主的挤压作用,发生强烈的构造反转,并伴随左旋走滑事件,先前的伸展盆地停止发育,早先形成的隆起与伸展滑脱盆地在这个时期受郯庐断裂带(F1)及其派生的系列NE向帚状走滑断裂所切割。(5)随后在晚白垩世晚期—古近纪(87.5~50.0 Ma),即王氏期,古太平洋板块整体继续NNW向运动,但是速度降低,区域构造应力场是以近SN向为主的弱拉张环境。青山期的热隆事件致使该时期岩石圈具有高的热异常,随后岩石圈不断冷却、密度加大并下沉,进入热沉降阶段,在早期形成的“盆—山”格局基础

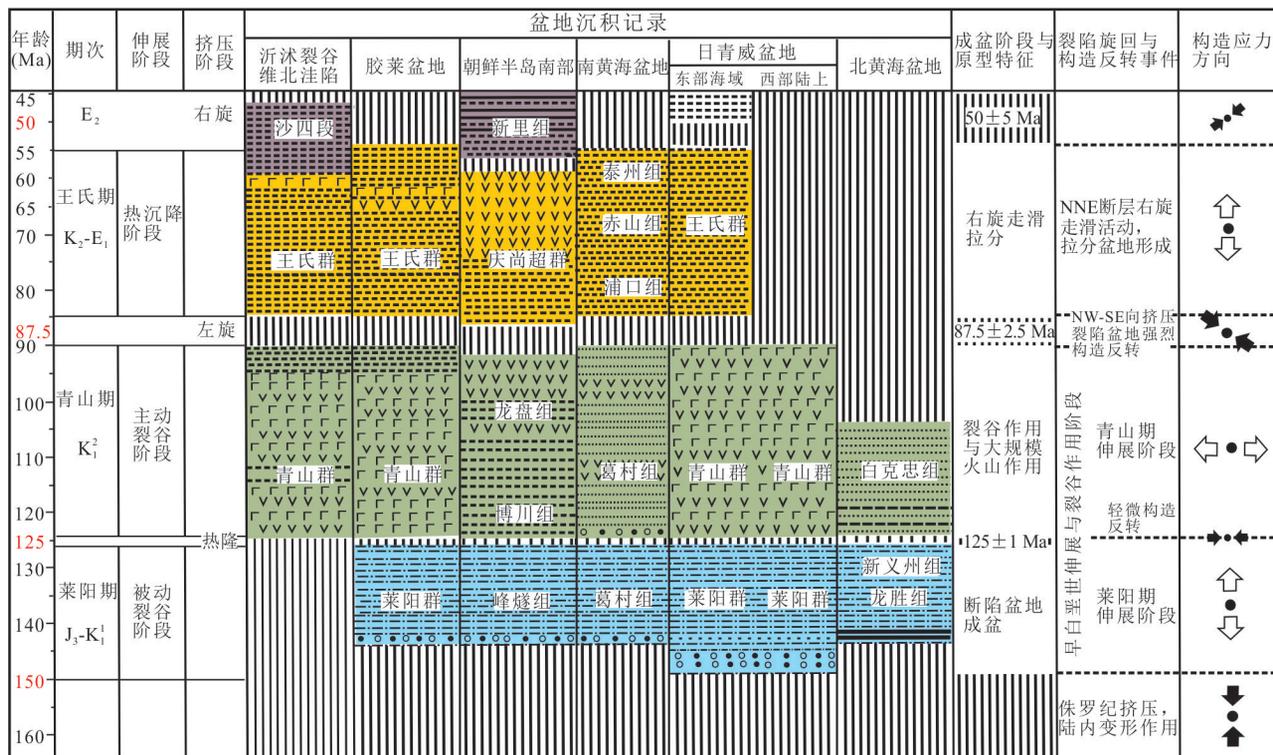


图 5 中国黄海及邻近地区构造层划分及应力场方向(据张岳桥等, 2004 修改)

Fig. 5 Stress direction and structural layer division in the Yellow Sea and adjacent areas of China (modified from Zhang et al., 2004)

上, 发育了拗陷沉积, 这段时期仅有微弱的火山活动(周瑶琪等, 2015). (6)到了王氏末期 (50 ± 5 Ma), 由于印度板块向欧亚板块挤压的远程效应及古太平洋板块向西挤压共同的作用下, 大断裂 F1 和 F2 发生较大规模右旋走滑作用. 本文重在讨论这 3 期 (125 ± 1 Ma, 87.5 ± 2.5 Ma, 50 ± 5 Ma) 的挤压作用.

3.3 构造转换时间节点的确定

为寻找莱阳—青山—王氏期之间的构造转换时间节点, 笔者做了大量的野外考察工作, 共测量了 5 个剖面, 自南到北分别为诸城桃林、青岛灵山岛、青岛崂山、即墨周戈庄及海阳丁字湾地区(图 1).

其中桃林剖面自下而上发育冲积扇相—侵入岩相—深水沉积岩相—浊积扇相—扇三角洲相—火山溢流相, 水体环境整体表现出由浅水到深水再到浅水的规律. 桃林剖面下部地层沉积时代为莱阳期, 锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 的年龄为 125.0 ± 1.9 Ma, 上部地层锆石测年年龄为 120.2 ± 2.3 Ma(周瑶琪等, 2015), 沉积地层为青山群.

灵山岛剖面自下而上发育(半深海—深海)滑塌浊积岩相—微生物岩相—浊积岩相—火山溢流相—扇三角洲相—火山爆发/溢流相, 反映出水体

变浅的过程, 整个演化序列表明灵山岛所在盆地由沉积盆地逐步演化为火山盆地. 通过对灵山岛中部的灰白色流纹岩样品测年, 获得的锆石 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 119.2 ± 2.2 Ma(周瑶琪等, 2015), 属于青山期.

崂山剖面垭口—八仙墩地区地层, 发育一套浅变质海相浊积岩, 主要为青灰色泥岩与灰绿色砂岩互层, 粒度粗细变化交替出现, 反映出水体深浅交替变化. 整体厚度较小, 地层产状为 SW 和 SE 向. 从垭口到八仙墩剖面发育一系列 NE 走向的走滑断裂, 图 7 中 F7 与后文构造格局图中的 F7 为同一断裂, F7 断裂为 87.5 ± 2.5 Ma 形成的左旋走滑断裂, 与周围的派生断裂形成花状构造, 成为日青威残留盆地的边界断裂. 崂山垭口地区出露有变质沉积岩夹杂有火山岩碎屑, 以及出露的凝灰岩与硅质岩薄互层, 而凝灰岩的发现则证明沉积过程中伴随火山活动. 对凝灰岩夹层取样, 进行锆石的 U-Pb 测年, 获得 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄 118.9 ± 3.3 Ma(周瑶琪等, 2015), 与灵山岛剖面中青山群下部的流纹岩年代相当. 对垭口中部的正长花岗岩侵入体进行的锆石 U-Pb 测年, 结果显示为 120.2 ± 1.0 Ma(Wang et al., 2016), 为青山期.

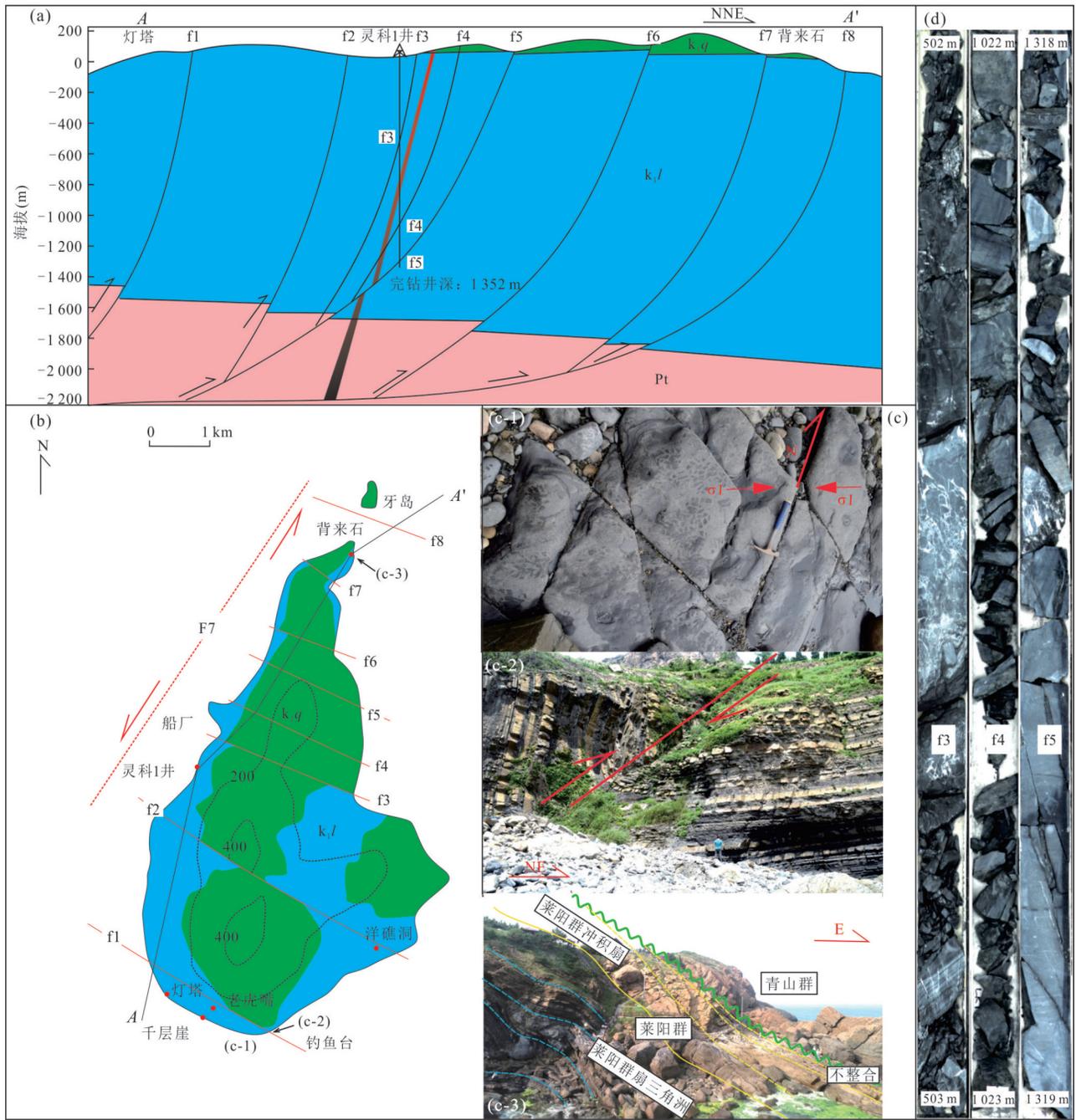


图 6 过灵科 1 井—背来石构造剖面及灵山岛野外照片

Fig. 6 The geological section from Well Lingke 1 to Beilaishi and Field photos of Lingshan Island

a. 灵山岛地区过灵科 1 井青山期—莱阳期近南北向地层剖面图; b. 灵山岛地质简图(修改自周瑶琪等, 2017); c. 为灵山岛地区野外照片; c-1. 为 125 ± 1 Ma 时期形成的节理照片, 地质锤把手所指方向为 N, 最大主应力方向为近东西近 E-W, 与 125 ± 1 Ma 时期应力方向为近东西向相吻合; c-2. 为 87.5 ± 2.5 Ma 时期形成的北西向逆冲断裂 (f1), 此断层是 87.5 ± 2.5 Ma 时期形成北东向走滑断层 F7 的派生断层; c-3. 青山群和莱阳群的界限, 不整合界面上下地层角度相差大约 10° . 青山期岩性为火成岩; 莱阳群为砂岩, 其中扇三角洲沉积相中的褶皱反映出 125 ± 1 Ma 时期近 E-W 向挤压应力场; d. 灵科 1 井的岩心, 分别过灵科 1 井的 3 条断裂破碎带 f3 (上下厚度约 5 m)、f4 (上下厚度约 10 m)、f5 (上下厚度约 5 m)

崂山剖面中的青山湾和垭口下部的地层岩性特征与灵山岛钻探井底部地层相似. 该套地层与灵山岛南部老虎嘴剖面的地层产状一样, 同样发育朝东南方向倾斜的青山期地层, 同时发育一系列左旋

走滑断裂(图 7).

周戈庄剖面中发育莱阳群和青山群, 岩性以粉砂岩、砂岩为主, 夹杂火山岩侵入体. 对周戈庄剖面地层中部的凝灰岩取样进行锆石 U-Pb 测年, 获得

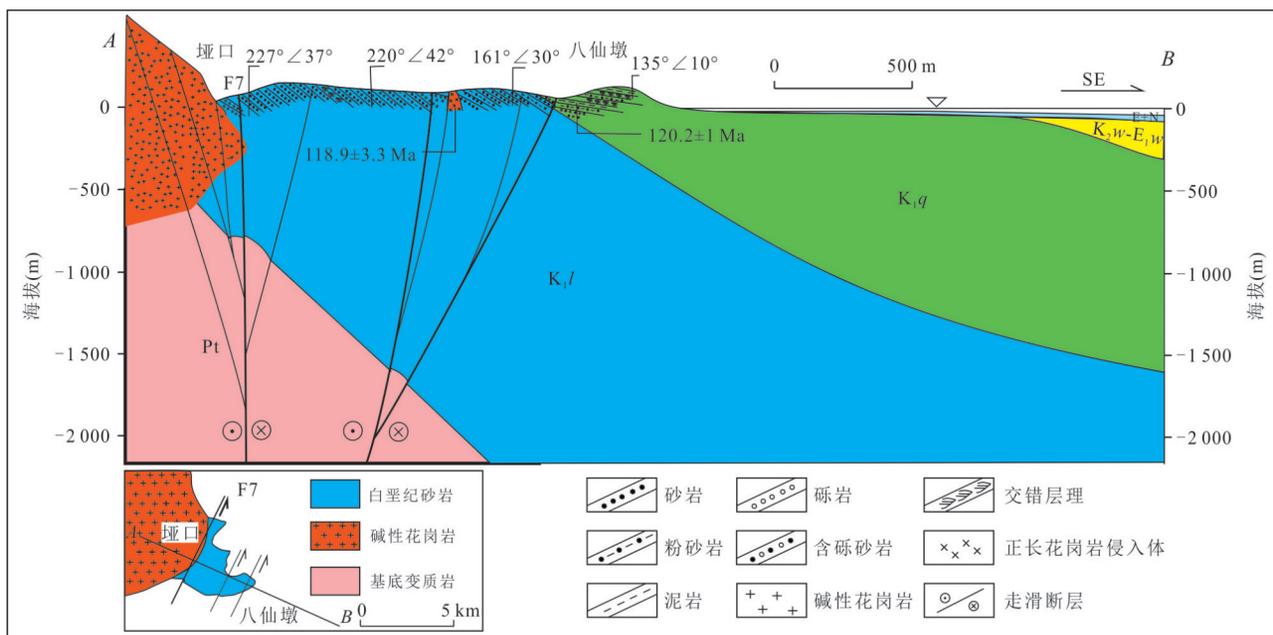


图 7 崂山地区垭口—八仙墩一部分海域地层剖面图(露头剖面部分据 Wang *et al.*, 2016 修改)

Fig. 7 Stratigraphic section of Laoshan Mountain to Yakou-Baxiandun area-apart of sea (Outcrop profile section is modified from Wang *et al.*, 2016)

的 $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ 加权平均年龄为 $118.3 \pm 2.0 \text{ Ma}$ (内部资料), 属于青山群. 周戈庄剖面青山群沉积相为扇三角洲相夹火山岩相, 莱阳群为深水沉积相, 从下至上地层的岩性特征基本反映了水体沉积环境由深到浅的变化.

丁字湾剖面表现为海相深水沉积岩相. 下部样品测年加权平均值为 $123.6 \pm 4.4 \text{ Ma}$, 上部样品锆石年龄加权平均值为 $116.0 \pm 3.1 \text{ Ma}$. 此外, 侵位于丁字湾下部的煌斑岩中加权平均年龄为 $116.6 \pm 4.4 \text{ Ma}$ (内部资料), 分析认为该剖面属青山群.

由于野外剖面的局限性, 在日青威盆地内部没有一口探井可以完整地揭示莱阳群的情况, 为建立这套地层完整的地层序列并准确地界定莱阳群的底界, 项目组在日青威盆地内部署了灵科 1 科学探井. 灵科 1 井位于灵山岛船厂附近, 钻深 1 352 m, 全井段取心. 岩心主要岩性为黑色泥岩、砂岩等碎屑岩和少量的喷发岩和侵入岩, 整个井段的岩性显示出深水重力流特征, 体现出由莱阳期被动裂谷向青山期主动裂谷转变的沉积充填记录(图 8).

被动裂谷主要动力源为区域应力场, 倾向于板块间的相互作用, 首先岩石圈的张应力引发破裂, 裂谷形成, 地幔物质热隆引发火山活动; 主动裂谷的主要动力源来自于软流圈热隆驱动岩石圈产生张应力, 是驱动岩石圈发生裂陷伸展的主要动力源.

主动裂谷机制中, 地幔热异常出现于裂谷盆地形成之前, 软流圈物质主动上涌, 使得岩石圈变薄, 热隆产生的张应力引发岩石圈开裂(解习农等, 2012). 出现“热隆—火山活动—裂陷盆地形成—热沉降”等事件序列(任建业和解习农, 1996; 任建业等, 2015). 日青威盆地内莱阳群自下至上为深水沉积—火山堆积—陆相沉积, 构成了被动裂谷盆地的沉积充填序列; 灵山岛青山群自下而上分别是火山碎屑岩—流纹岩—沉积岩的主动裂谷盆地的沉积充填序列. 从莱阳期到青山期日青威盆地是在被动裂谷作用基础上叠加了主动裂谷作用.

造山带的垮塌, 导致研究区晚中生代初始裂陷, 变质岩基底之上形成不整合面, 不整合面之上洪积相或与之伴生的同沉积火山灰年龄, 代表了裂谷作用新一轮沉积旋回的起点年龄, 底砾岩为盆地开裂时期的标志. 桃林最下部的底砾岩与古元古界变质岩呈不整合接触, 和崂山垭口下部底砾岩地层及灵山岛莱阳群下部巨厚砾岩层之下的底砾岩沉积, 均符合盆地形成初期的沉积特征, 记录了日青威裂谷盆地成盆的启动时间. 灵科 1 井井底岩心古地磁年龄为 147 Ma (程燕君等, 2022), 即盆地开裂时间早于 147 Ma , 由于井底未发现底砾岩沉积, 因此结合邻区盆地深度, 推测日青威盆地开裂时间为 150 Ma .

通过对日青威盆地内部野外露头的地层进行对比,进一步明确了盆地的演化过程:莱阳群以深水重力沉积为主,底部以底砾岩为代表,代表着盆地开裂即形成阶段;中段反映出半深海—深海的深水沉积,为被动裂谷盆地的发展阶段;顶部为低位域水道、扇三角洲、冲积扇相,是裂谷盆地的消亡阶段。青山群以浅水陆源碎屑岩沉积和巨厚的火成岩发育为特征。总体上莱阳群到青山群的沉积自下而上呈现出海进—海退的过程。两个单元的界线存在一个沉积间断,为角度不整合,这几个剖面基本都涉及到这个不整合面。

近期,最新的研究结果更加准确地限定了莱阳、青山期之间的时间间断。本项目组在灵山岛上进行了大量野外踏勘工作,其中灵山岛东北角的背来石剖面中火山角砾岩与陆源碎屑岩的角度不整合是莱阳群与青山群的分界。对背来石剖面中青山群底部的沉凝灰岩样品进行锆石定年,结果为124.8 Ma(周腾飞等,2022)。因此,莱阳群与青山群之间的准确时间界限在 125 ± 1 Ma。

青山末期,古太平洋板块俯冲于东亚大陆边缘,并且运动速率骤增,使得区域应力场变为近NW-SE向的挤压应力。 87.5 ± 2.5 Ma左右,该构造反转事件造成了东亚大陆普遍的隆升,形成岩浆活动间隙期。郯庐断裂带及其派生的即墨—牟平断裂带等发生了左旋走滑作用,因此该事件改造了山东东部地区及邻区青山期盆地的构造格局,即“盆—山”格局,被青山—王氏期不整合面清晰记录(周瑶琪等,2018)。由于白垩纪古太平洋板块(由太平洋板块上热点海隆年龄标定)自NWW向NNW快速位移,推测古太平洋板块在90~85 Ma之间俯冲方向由NWW转为NNW方向,到85 Ma后再次向NNW俯冲(图9)。所以该不整合的时限大体推测为 87.5 ± 2.5 Ma。

另一个不整合面是王氏群与上覆地层的不整合面。王氏初期,古太平洋板块俯冲以及运动速率的骤减,中国东部进入以S-N向应力为主的弱伸展阶段。由于青山期岩石圈伸展减薄时软流圈热液流体上涌引起了较高的热异常值,伸展减薄后岩石圈不断冷却且密度加大而导致了山东东部地区进入了王氏期的热沉降阶段,并发育了坳陷沉积。日青威盆地与周缘盆地的原型盆地在该时期发生了差异沉降,隆升地区未沉积或遭受剥蚀,断陷地区继续沉积。此界面受剥蚀程度较高,在本文涉及的野

外露头剖面均未见。王氏末期,古太平洋板块低角度俯冲,加上印度板块碰撞形成的挤压作用,使得中国东部整体为挤压环境,研究区岩石圈呈右旋走滑状态,印度板块与欧亚大陆碰撞的时间在 50 ± 5 Ma(丁林等,2017),推测此时限为右旋走滑强烈活动时限,即王氏群与上覆地层不整合面的形成时限。图5列出了黄海及邻区晚中生代构造转换的关键时间节点及盆地演化阶段。

3.4 现今构造格局和残留盆地分布

本文使用了部分南黄海海域地震资料(图10),地震剖面中、新生代地层具有较强的反射振幅、且连续性较好,可以进行可靠的追踪对比和解释。

选取了其中两条测线,基本覆盖了研究区多个盆地和隆起单元,可反映出各盆地的构造演化和沉积充填过程。在国际亚洲地质图(任纪舜等,2013)的基础上,本文参考了黄海地区重磁异常及地震资料,结合构造分析,获得研究区现今构造纲要图(图11a)。F1为郯庐断裂带,是中国东部规模最大的巨型走滑断裂带,总体呈NNE向,在中国境内长达2400 km;F2为朝鲜半岛西部断裂,现今日青威残留盆地在山东东部位置的东西边界分别为F7、F8断裂,南北向边界断裂为F7和F8之间加持的F13和F14,其中南北边界形成时间较老,为150 Ma时期原型盆地的南北边界断裂,F7和F8断裂的形成时间相对较新,在 87.5 ± 2.5 Ma左旋走滑时期形成。南黄海盆地东侧千里岩隆起东部断裂F9为其边界断层(李志强等,2021),内部F16、F17、F18等东西向断裂,同日青威南北边界一样,其形成时间至少在莱阳期,这些东西向的断裂先形成,后被北东向的断裂所切割。

3.5 不同时期构造重建

3.5.1 时间节点 50 ± 5 Ma右旋走滑构造恢复 图11b为王氏末期右旋走滑前的构造格局图,北东向断裂为青山期形成的一系列左旋走滑断裂。 50 ± 5 Ma阶段的右旋走滑主要发生在边界断裂F1和F2两侧,而内部的断裂走滑量较小,仅有小幅度的调整,相对主干断裂F1和F2,其他北东向走滑断裂F3—F12的走滑量可忽略不计。比较图11b(右旋走滑前)和图11a(右旋走滑后),渤海湾盆地、鲁中隆起、合肥盆地、大别山北部盆地等,沿着郯庐断裂带F1发生右旋走滑,向北东的走滑量在300 km左右。同时F2断裂以东的朝鲜地块发生右旋走滑,沿着F2断裂向西南的走滑量约350 km。F11、F33、F36及

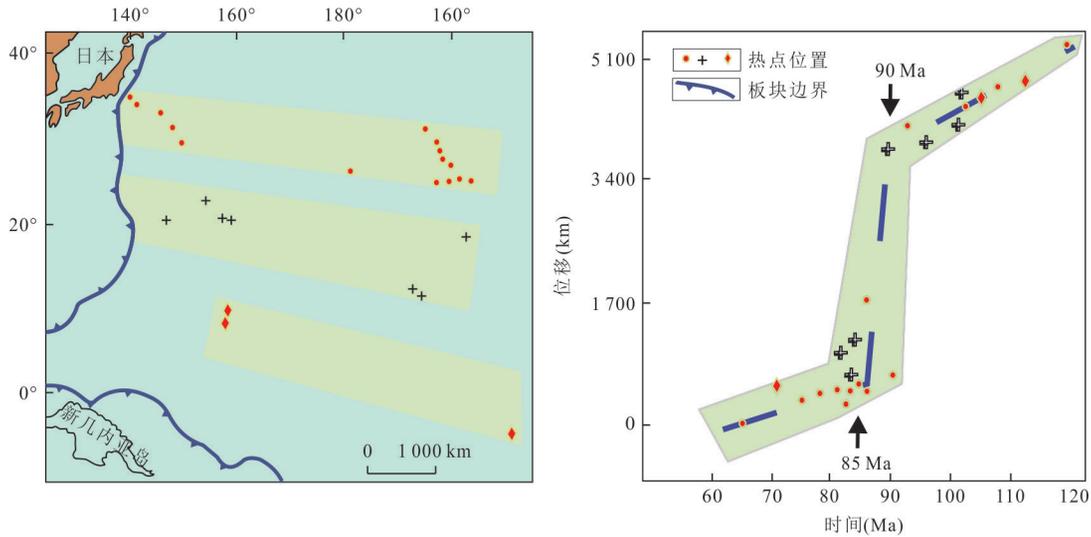


图 9 西太平洋区域位置图以及白垩纪古太平洋板块(由现今太平洋板块上热点海隆年龄标定)自 NWW 至 NNW 向位移—时间图(据 Andrew A. Stepashko, 2017, 私人通讯)

Fig. 9 Location map of the Western Pacific Region and Cretaceous Pacific plate displacement from NWW to NNW (Dated from the current hotspot on the Pacific plate)-time map (revised by Andrew A. Stepashko, 2017, Private communications)

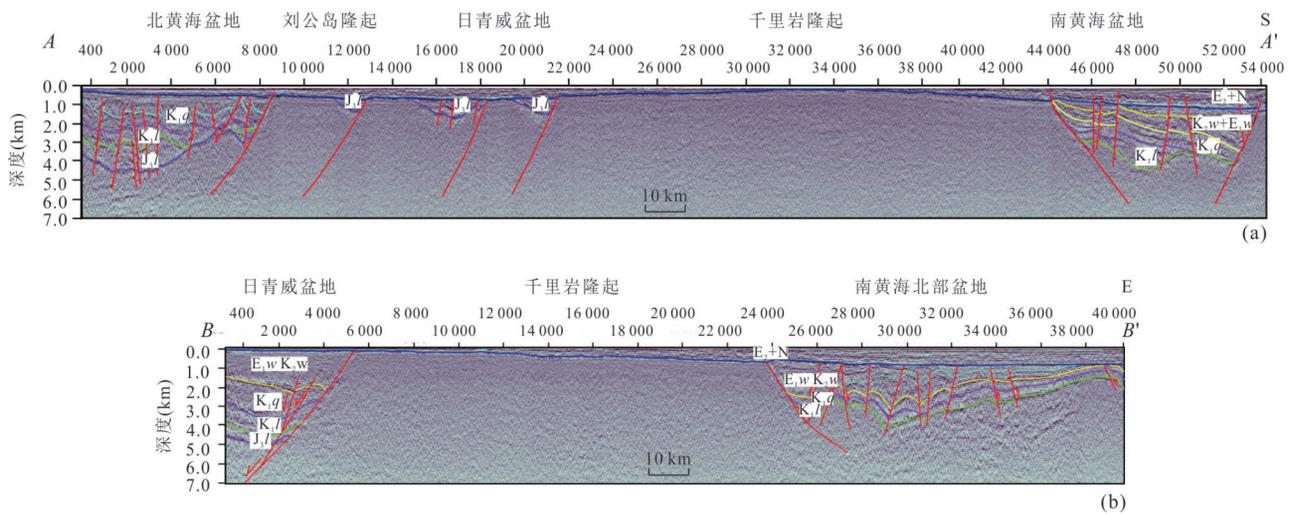


图 10 南黄海海域南北向地震剖面图(位置见图 1 中的 AA') (a) 和东西向地震剖面图(位置见图 1 中的 BB') (b)(据刘菲菲, 2019)

Fig. 10 North-south seismic section (the location map is on Figure 1 AA') (a) and East-west seismic section (the location map is on Figure 1 BB') (b) of the South Yellow Sea area(revised by Liu, 2019)

F37 在右旋走滑过程中被 F2 断裂切割. F2 与 F1 断裂属于同一级别的大断裂, 几乎贯穿朝鲜半岛. 但形成于新生代, 晚于 F1 断裂. 位于朝鲜半岛北段的 F2 断裂为该断裂带在中朝板块内的延伸, 是 F7、F8、F9 和 F10 断裂在青山末期左旋走滑地层逆冲缩短合并的结果; F34—F35 断裂带是 F33 断裂在青山末期左旋走滑活动的分支, 类似于 F1 在东北地区分叉的延伸方式(唐贤君等, 2018).

3.5.2 时间节点 87.5 ± 2.5 Ma 左旋走滑构造恢复
青山期早期, 古太平洋板块沿 NW 向快速的高角度俯冲, 首先表现为岩石圈强烈的伸展, 软流圈物质上涌, 上涌的同时造成岩石圈地幔发生熔融. 该时期, 沂沭断裂带的高桥地区火山岩(120 Ma)和断裂带东侧莒县火山岩(129~115 Ma)均主要来源于岩石圈地幔(傅朋远, 2013). 同时, 鲁西蒙阴(124.3~114.7 Ma)等地和胶莱盆地(128~112 Ma)均具有幔

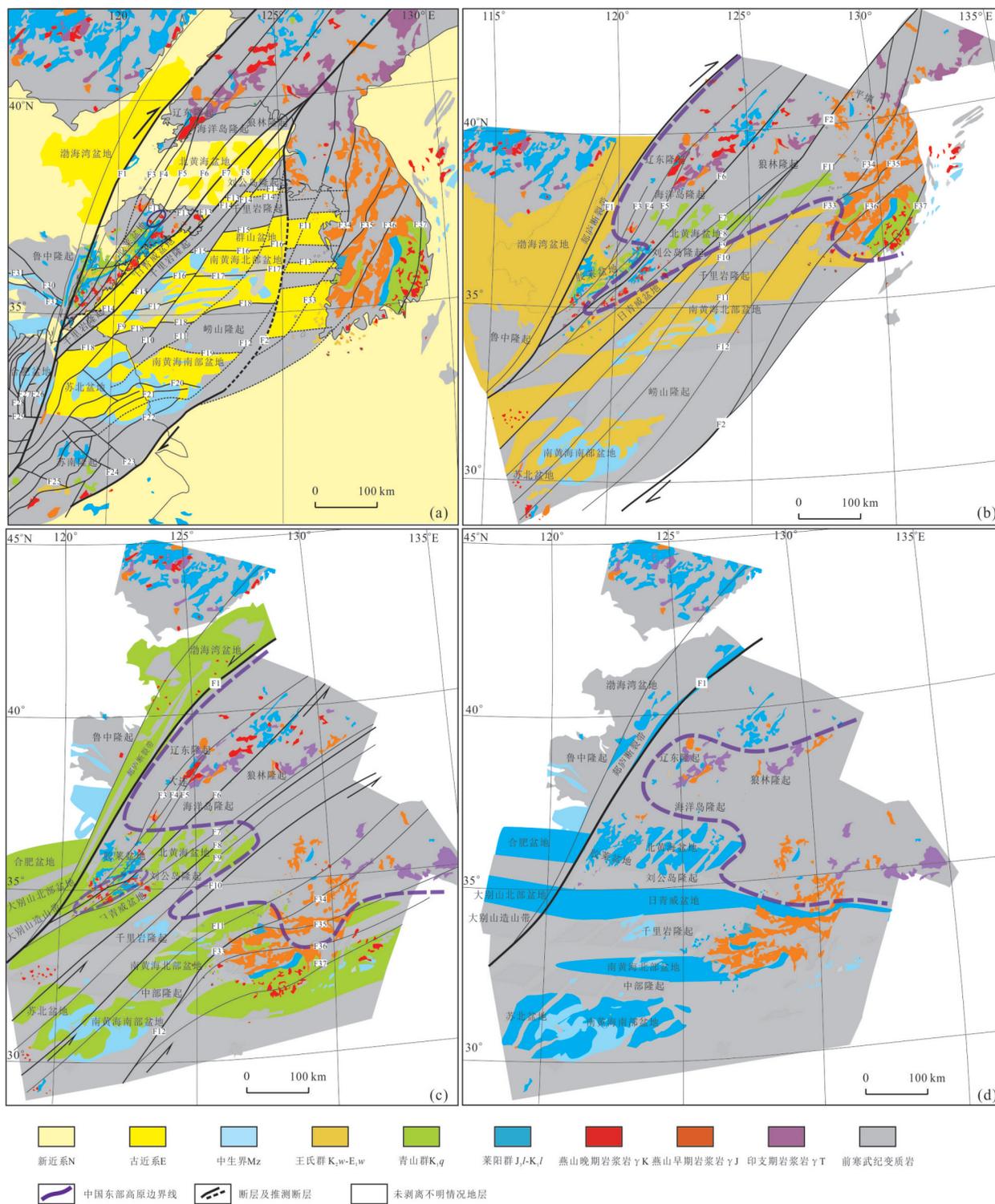


图 11 黄海及邻近地区不同时期构造格局

Fig. 11 Tectonic outline of the Yellow Sea and adjacent area (different period)

a. 黄海及邻近地区(剥新生界/第四系)构造格局; b. 黄海及邻近地区(王氏群)构造格局; c. 黄海及邻近地区(青山期)构造格局; d. 黄海及邻近地区(莱阳期)构造格局; F1~F36 断层之间剥新生界, 其他范围剥第四系

源火山岩出露(邱检生等, 2001; 匡永生等, 2012). 岩石圈减薄峰期时(120 Ma)山东省内普遍存在岩石圈地幔熔融(Wu, 2005). 随后, 胶莱盆地出现了壳

源火山岩(108~96 Ma)(Ling *et al.*, 2017)断裂带内幔源岩浆一直持续至晚白垩世(匡永生等, 2012; 邱检生等, 2012).

火成岩出现的时间和地点说明断裂活动与岩浆活动的正相关性,断裂带是岩石圈的薄弱带,是穿地壳岩浆系统末端岩浆侵入的有利部位,隆起带热隆作用最强烈的时期为青山早期(125~115 Ma),隆起带两侧的裂陷盆地为引张裂陷阶段.青山期应力场方向由莱阳期SN向伸展调整成近EW向的伸展,由图12c可见鲁东—辽东地区青山期火山机构沿着断裂带呈串珠状分布.岩浆活动地带产生强烈的抬升作用,使得莱阳期被动裂谷盆地萎缩闭合,青山期沉积环境由海相转变为陆相.在强烈的热隆抬升—滑脱—伸展作用下,隆升区两侧边缘发育滑脱断层、拆离断层以及大量的变质核杂岩,在隆升区两侧形成了青山期火山弧盆(周瑶琪等,2018;周腾飞等,2022).强烈的滑脱作用,使得先前整体近EW向展布的盆地到青山期沿滑脱面又发育了一系列近NE向的断裂,形成青山期主动裂谷与莱阳期被动裂谷的叠合盆地(图11c).从日青威盆地野外露头剖面上来看,莱阳群深水重力流相到青山群火山溢流相和扇三角洲相的转变,以及由咸水、半咸水环境到微咸水沉积环境的转变,均说明了日青威盆地由莱阳期到青山期沉积环境由海相到陆相的变化(周瑶琪等,2018).

到了青山末期(87.5±2.5 Ma左右)古太平洋板块以NW方向俯冲于东亚大陆边缘海沟之下,并且运动速率骤增,使得区域应力场由拉伸变为NW-SE向的挤压.该构造反转事件造成了东亚大陆普遍的隆升,岩浆活动停止.并沿着F1、F2断裂之间派生出一系列NE向左旋走滑断裂(F3~F12等),先前形成的岩浆岩被走滑断层切割、走滑.正是由于这一阶段的大规模左旋挤压走滑作用,造成了青

山—王氏群之间的角度不整合面(周瑶琪等,2018).以桃村断裂(F5)为例(位置见图11a中蓝圈)计算该时期的走滑量:在F5两侧的牙山燕山晚期岩浆岩(图12中的A、B)是被F5错移的同一地质体,F5断裂形成时限为87.5±2.5 Ma左右,两侧错移距离34 km.牙山地质体和院格庄地质体锆石年龄为115 Ma,属青山期,因此认为青山期岩浆喷发之后,在87.5±2.5 Ma时期发生了左旋走滑而造成现今的构造形态,因此推测F5在莱阳期和青山期之间的左旋走滑速度约6.8 km/Ma.

87.5±2.5 Ma时期,F1和F2断裂带的走滑量相对较大.比较图11c(左旋走滑前)和图11b(左旋走滑后),F1西侧向北东的走滑量在550 km左右.F2断裂以东的朝鲜地块左旋走滑,导致朝鲜半岛北部F7、F8、F9和F10四条走滑断裂合并成F2断裂,这一地带由于强烈的挤压隆升,使得地层缩短约110 km,导致整个朝鲜半岛逆时针旋转30°,并沿着F2断裂朝北东方向走滑约560 km.此阶段岩浆岩热隆的范围除了朝鲜半岛南部庆尚盆地、辽东隆起等地持续热隆,还有日青威盆地和胶莱盆地之间的区域.这3个区域的隆起带均呈现出NE向展布的规律.

3.5.3 时间节点125±1 Ma热隆构造恢复 该时期日青威盆地的南北部分别是刘公岛隆起和千里岩隆起.日青威盆地与大别山北部盆地相对应,中间隔着郯庐断裂带.胶东的晚中生代煌斑岩和大别山中生代煌斑岩吻合,山东蒙阴胶东隆起的金刚石矿和辽宁隆起的金刚石矿也吻合良好.中国的巨型金成矿带,即秦岭—大别山—苏鲁造山带,均是在晚中生代形成.分析认为北黄海—胶莱—合肥盆地

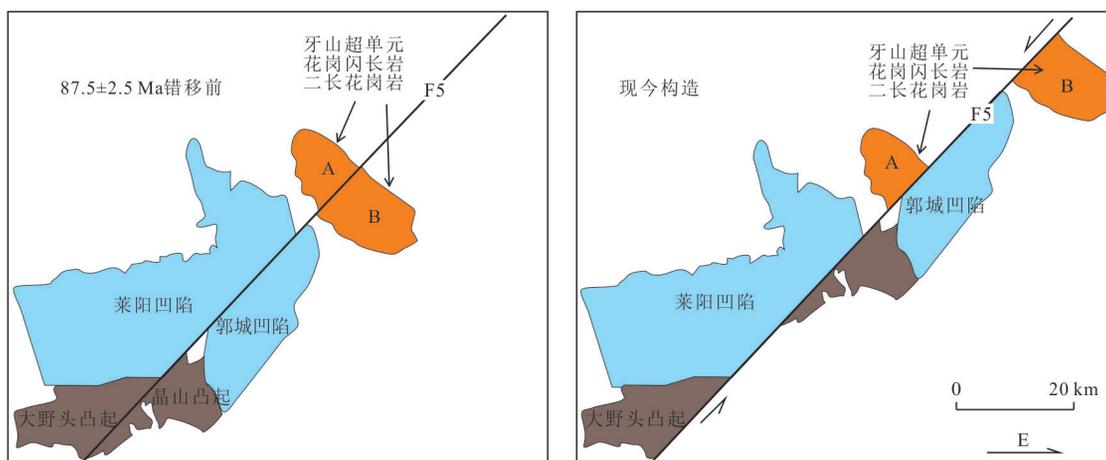


图12 桃村断裂(F5)87.5±2.5 Ma走滑前后对比(位置见图11a上蓝圈的部分)

Fig. 12 Comparison of Taocun fault (F5) before and after 87.5±2.5 Ma strike-slip (Location is in blue circle of Fig.11a)

的构造位置处于同一条带,鲁中—辽东—海洋—狼林及朝鲜半岛北部的隆起同处于东部高原范围内,后期由于受到北东向左旋走滑导致帚状断层之间的地层被挤压缩短,山东半岛的千里岩隆起与朝鲜半岛的沃川造山带在莱阳期相连,日青威盆地与古太平洋局部相通.比较图 11d(热隆前)和图 11c(热隆后),早燕山期岩浆岩主要集中在朝鲜半岛及部分辽东隆起、狼林隆起等地分布,而晚燕山期(主要是青山期)岩浆岩则主要分布于日青威和胶莱盆地周边,以及辽东半岛和朝鲜半岛南部.由此分析认为,莱阳期由于大别—苏鲁—沃川造山带垮塌,朝鲜半岛南部早燕山期热隆地形也随之垮塌,形成被动裂谷盆地.此时,整个盆地与隆起呈近东西向展布(图 11d).而青山期则在山东半岛,辽东半岛和朝鲜半岛南部由于晚燕山期岩浆热隆效应而形成高地,这些隆起带均呈北东—南西向展布,隆起带两侧由于滑脱伸展,形成同方向展布的伸展性质的盆地(图 11c).

3.6 各时间节点走滑量及伸展量估算

根据构造纲要图和地震资料利用 2D Move 半定量估算了不同时期的走滑量及伸展量并分别计算了其速率.走滑间隔分别是青山—王氏期之间(87.5 ± 2.5 Ma),王氏群与上覆沉积地层的时间间隔(50 ± 5 Ma),结果见表 1.

将盆地基底,青山群顶底拉平复原,以平衡剖面理论基础为原则(毛小平等,1998;漆家福等,2001)粗略地计算出不同盆地的总伸展量及莱阳期、青山期、王氏期 3 个阶段的伸展分量,结果

表 2 黄海及邻区不同盆地伸展率及沉降速率

Table 2 Extensional rates and settlement rates of different basins in the Yellow Sea and adjacent areas

盆地名称	伸展率(%)			沉降速率(m/Ma)		
	莱阳期	青山期	王氏期	莱阳期	青山期	王氏期
	SN	EW	SN	期	期	期
日青威盆地	20	3	8	200	38	78
胶莱盆地	15	2	6	150	27	61
南黄海南部盆地	10	1	4	98	12	41
北黄海盆地	10	2	0	87	21	0

见表 2.

3.7 原型盆地构造格局分析

莱阳期由于古太平洋板块向陆方向俯冲,岩石圈根部发生大规模拆沉作用,形成以日青威盆地为中央裂谷的一系列被动裂谷盆地,莱阳早期,150 Ma 古太平洋板块向 NWW 俯冲,导致苏鲁造山带岩石圈发生大规模去根作用(即“岩石圈拆沉”),华北板块受到近 N-S 向强烈的构造伸展,岩石圈根继承了晚三叠纪以来苏鲁造山带近 E-W 的走向.根据重力均衡补偿机制,岩石圈地幔的拆沉作用最终导致了岩石圈伸展减薄和盆地形成.在莱阳早期的伸展作用下,近 E-W 向断裂系统控制了日青威原型盆地的展布.该盆地向东扩展至朝鲜半岛,并与古太平洋相连.由于受到燕山早期岩浆弧热隆作用,使得其与古太平洋的连通性受到一定影响;到了莱阳中期,原型盆地与古太平洋的连通性有所改善,日青威盆地莱阳群沉积环境为半咸水至咸水海

表 1 黄海及邻区主要走滑断裂走滑量及走滑速率

Table 1 Strike-slip quantities and rates of the main strike-slip faults in the Yellow Sea and adjacent areas

走滑时间	断裂带	走滑量(km)	走滑速度(km/Ma)	走滑时间	断裂带	走滑量(km)	走滑速度(km/Ma)
87.5 ± 2.5 Ma 左旋	F1	550	110	50 ± 5 Ma 右旋	F1	300	30
	F2	560	112		F2	350	35
	F3	40	8		F3	0(?)	0(?)
	F4	50	10		F4	0(?)	0(?)
	F5	34	6.8		F5	0(?)	0(?)
	F6	40	8		F6	0(?)	0(?)
	F7	30	6		F7	0(?)	0(?)
	F8	230	46		F8	0(?)	0(?)
	F9	100	20		F9	0(?)	0(?)
	F10	50	10		F10	0(?)	0(?)
	F11	100	20		F11	0(?)	0(?)
	F12	60	12		F12	0(?)	0(?)

相环境. 该时期的原型盆地由东到西延伸近 1 100 km, 达到裂陷盆地发育的鼎盛时期(图 11d).

分析认为, 此阶段研究区范围内的狼林、辽东海洋岛隆起及朝鲜半岛南部由于燕山早期岩浆热隆效应造成相对较高的“高原区”, 而北黄海、日青威、胶莱及南黄海等盆地整体处于造山带垮塌和岩石圈减薄造成的相对较低的“盆地区”. 青山期初 (125 ± 1 Ma), 为热隆作用造成的应力场转变时间, 由莱阳期的拉伸转变为挤压. 青山期古太平洋板块俯冲角度由低角度变为高角度, 随后回卷(rollback)并后撤, 软流圈物质上涌形成火山弧. 青山期初期的大规模岩浆热隆效应导致莱阳期日青威盆地的萎缩闭合, 随着一系列北东向的滑脱伸展断裂形成, 莱阳期的被动裂谷阶段转变为青山期主动裂谷阶段, 盆地整体呈 NE 向展布. 大量岩浆物质沿着断裂喷出, 形成晚中生代 G 型大火成岩省(周瑶琪等, 2018), 辽东半岛北部莱阳期盆地区也由于青山期岩浆热隆效应而抬升为高地(图 11c). 中国东部高原范围与该时期形成的断裂走向及岩浆岩分布方向相一致, 整体沿郯庐断裂带东侧呈北东向展布, 并向北迁移扩大. 东部高原的形成与燕山中晚期的挤压运动事件有关(张旗等, 2001). 张旗等(2007)据埃达克岩的分布范围推测出中国东部高原的大体范围, 认为辽东半岛、胶东半岛、部分朝鲜地区及山东半岛青山组火山岩和众多中生代侵入岩均属于埃达克岩. 在诸城和蒙阴等地有侏罗纪晚期到白垩纪的恐龙分布, 并且通过恐龙的种类推测出古地理环境由温暖潮湿逐渐向炎热干旱转变(柳永清等, 2011), 据此推测其为高原的边界, 这与本文推测的高原范围相符合.

王氏期由于青山期末—王氏期初 (87.5 ± 2.5 Ma) 古太平洋板块俯冲方向的改变, 由 W 向俯冲变为 NW 向俯冲, 日青威盆地所在区域发生构造反转事件, 由青山期的近 EW 向伸展转变为 NW-SE 挤压, 受到 NE 向左旋走滑作用, 所形成的 NE 向走滑断裂将青山初期热隆作用形成的隆起带及滑脱作用形成的主动裂谷盆地切割, 形成新的“盆—山”格局. 随着青山末期构造挤压力的增强, 地块发生左旋走滑, 高原范围也逐渐整体向北东迁移. 该阶段古太平洋板块整体向北运动较慢, 区域构造应力场在近南北向弱拉张作用下, 王氏期整体处于青山期“盆—山”基础上的热沉降阶段. “盆”的部分发育拗陷, “山”的部分被剥蚀或未沉积(图

11b). 由于青山末王氏初期的左旋挤压作用, 导致该时期处于中国东部高原边缘位置的北黄海盆地整体处于抬升状态, 致使其缺失王氏期沉积的地层. 分析认为王氏期中国东部高原的范围可沿着北黄海盆地一直延伸至日青威盆地和胶莱盆地之间的刘公岛隆起.

新生代以来, 由于王氏末期 (50 ± 5 Ma) 的区域挤压应力作用下, 中国黄海及邻近地区整体呈抬升趋势. 来自印度板块向欧亚大陆向北方向碰撞挤压的远程效应, 以及古太平洋板块西向俯冲的推挤力作用, 对黄海及邻区岩石圈形成 NNE 向挤压, 原裂谷盆地进一步萎缩. 在挤压力的作用下, 郯庐断裂带(F1)以西以及朝鲜半岛西部断裂(F2)以东的地块, 整体发生右旋走滑, 而 F1 和 F2 之间地块走滑相对较小, 可忽略不计. 太平洋板块向西俯冲, 印度板块向欧亚板块继续挤压, 共同作用在中国东部及黄海地区, 该时期的挤压力较王氏末期 (50 ± 5 Ma) 相对较弱, 构造活动相对平静, 走滑速度进一步降低, 直至形成现今的构造形态(图 11a). 同时, 研究区内中国东部高原范围随时间逐步缩小, 并局限于朝鲜半岛、辽东半岛和山东半岛范围内.

4 结论

本文通过综合梳理黄海及邻近地区不同盆地晚中生代以来的地层序列和构造特征, 确定了盆地发育不同阶段的起始和结束时间与古构造应力场的转换历史. 通过重磁与地震相结合, 明确了研究区现今的构造特征. 根据古太平洋板块的俯冲历史, 对研究区不同构造演化阶段的平面构造形态进行逆演恢复, 估算了不同阶段不同断层的走滑量、走滑速率及伸展量和伸展速率, 并探讨了中国东部高原的分布范围及其变化. 主要取得了以下认识.

(1) 日青威盆地晚莱阳期与周缘盆地沉积环境不同, 日青威盆地莱阳群多沉积了一套还原环境下的海相或海陆过渡相沉积, 其他盆地则以河流相或湖相的陆相沉积为主. 青山期, 日青威盆地相对其他盆地火成岩更发育. 王氏期, 日青威盆地西部陆上部分及北黄海盆地处于东部高原范围内, 缺失王氏群.

(2) 根据古地磁年龄, 确定了盆地开裂时间, 即莱阳期开始时间为 150 Ma. 对青山群底部样品进行锆石定年, 明确了莱阳群与青山群之间准确时间界限在 125 ± 1 Ma. 古太平洋板块在 90~85 Ma 俯冲方

向转变,导致青山期和王氏期直接形成不整合,推测其时限为 87.5 ± 2.5 Ma. 据印度板块与欧亚大陆碰撞的时间,认为王氏群与上覆地层不整合面的时限在 50 ± 5 Ma.

(3)莱阳期:受古太平洋板块向欧亚板块低角度俯冲影响,早期发育了以日青威盆地为中心的一系列东西向被动裂谷盆地;随着俯冲角度加大,岩石圈地幔物质上涌,晚期发生大规模热隆抬升,盆地消亡.青山期:受热隆—滑脱—伸展作用影响,发育了具伸展性质的火山弧盆.青山末期随古太平洋板块俯冲方向的转变,发生大规模左旋走滑.王氏期:整体处于差异性热沉降阶段,王氏末期受控于印欧板块碰撞的远程效应和古太平洋板块的俯冲作用,研究区发生右旋走滑作用.

(4)研究区青山末期的左旋走滑量大于王氏末期的右旋走滑量,其中F1和F2断层的走滑量均比同期断层的走滑量大.日青威盆地莱阳期的伸展率和沉降率相对周缘其他盆地大.莱阳末期与青山初期的热隆作用,青山末期断裂的走滑聚拢、地层的挤压作用、王氏期的热沉降及王氏末期的挤压走滑作用,均与中国东部高原的造山演化历史有较好的时间对应关系.

致谢:本次研究主要从构造的角度探讨了研究区的演化历史,涉及到团队多年的研究成果,感谢团队成员们的付出和努力,感谢刘菲菲博士授权使用其部分图件.同时,审稿专家对本文给予了宝贵的修改建议,在此一并表示感谢!

References

- Cheng, Y.J., Wu, Z.P., Liu, X.Y., et al., 2022. Study on Late Jurassic to Early Cretaceous Magnetic Stratigraphy in Well Lingke 1, Lingshan Island, Riqingwei Basin, Eastern China. *Scientia Sinica (Terra)*, 52(5): 903—919(in Chinese with English abstract).
- Ding, L., Maksatbek, S., Cai, F.L., et al., 2017. The Time Limit, Closure Mode and Process of Initial Collision between India and Eurasia. *Scientia Sinica (Terra)*, 47(3): 293—309(in Chinese with English abstract).
- Fu, P.Y., 2013. Geochronology and Petrogenesis of the Early Cretaceous Volcanic Rocks in the Yi-Shu Fault Zone (Dissertation). Hefei University of Technology, Hefei (in Chinese with English abstract).
- Han, R., Ree, J. H., Cho, D. L., et al., 2006. Shrimp U-Pb Zircon Ages of Pyroclastic Rocks in the Bansong Group, Taebaeksan Basin, South Korea and Their Implication for the Mesozoic Tectonics. *Gondwana Research*, 9(1—2): 106—117. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2005.06.006>
- Kuang, Y.S., Pang, C.J., Hong, L.B., et al., 2012. Geochronology and Geochemistry of the Late Cretaceous Basalts in the Jiaolai Basin: Constraints on Lithospheric Thinning and Accretion beneath North China Craton. *Geotectonica et Metallogenia*, 36(4): 559—571(in Chinese with English abstract).
- Kusky, T. M., Windley, B. F., Wang, L., et al., 2014. Flat Slab Subduction, Trench Suction, and Craton Destruction: Comparison of the North China, Wyoming, and Brazilian Cratons. *Tectonophysics*, 630: 208—221. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2014.05.028>
- 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, Geophysical and Geochemical Data. *Earth-Science Reviews*, 166: 270—285. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2017.01.009>
- Li, S.Z., Suo, Y.H., Li, X.Y., et al., 2018. Mesozoic Plate Subduction in West Pacific and Tectono-Magmatic Response in the East Asian Ocean-Continent Connection Zone. *Chinese Science Bulletin*, 63(16): 1550—1593(in Chinese with English abstract).
- Li, S.Z., Zhang, G.W., Zhou, L.H., et al., 2011. The Opposite Meso-Cenozoic Intracontinental Deformations under the Superconvergence: Rifting and Extension in the North China Craton and Shortening and Thrusting in the South China Craton. *Earth Science Frontiers*, 18(3): 79—107(in Chinese with English abstract).
- Li, Z. Q., Yang, B., Han, Z. J., et al., 2022. Tectonic-Thermal Evolution of Meso-Cenozoic Rift Basin in the South Yellow Sea, offshore Eastern China: Implications for Basin-Forming Mechanism and Thermal Evolution of Source Rocks. *Earth Science*, 47(5): 1652—1668 (in Chinese with English abstract).
- Liang, R.C., Han, G.Z., Zheng, Y.P., et al., 2001. Gravity and Magnetic Field and Geological Structure Characteristics in the South Yellow Sea. *Chinese Science Bulletin*, 46 (S1): 59—67(in Chinese with English abstract).
- Liang, Z., Zhou, Y. Q., van Loon, A. J. T., 2018. Soft-Sediment Deformation Structures Induced by Rapid Sedimentation in Early Cretaceous Turbidites, Lingshan Island, Eastern China. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 55(2): 118—129. <https://doi.org/10.1139/cjes-2017-0106>
- Ling, Y.Y., Zhang, J.J., Liu, K., et al., 2017. Geochemis-

- try, Geochronology, and Tectonic Setting of Early Cretaceous Volcanic Rocks in the Northern Segment of the Tan-Lu Fault Region, Northeast China. *Journal of Asian Earth Sciences*, 144: 303–322. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.12.025>
- Liu, F. F., Zhou, Y. Q., 2019. Nd Isotopic and Model Age Study of the Shandong Province, North China Craton: Implications for Correlation with South Korea. *Journal of Earth Science*, 30(5): 938–951. <https://doi.org/10.1007/s12583-019-1213-1>
- Liu, F. F., Zhou, Y. Q., Zhang, Z. K., et al., 2019. Detrital Zircon U-Pb Geochronology of Early Cretaceous Sedimentary Rocks in Dingzi Bay and Taolin Area from the Sulu Orogen: Provenances and Tectonic Implications. *Geological Journal*, 54(4): 2693–2715. <https://doi.org/10.1002/gj.3364>
- Liu, F. F., 2019. Tectonic Framework and Evolution Study of Eastern Shandong Offshore Ri-Qing-Wei Basin (Dissertation). China University of Petroleum, Qingdao (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. F., Zhou, Y. Q., Xu, H., et al., 2016. Origin of the Lingshan Island and Geotectonic Significance. *Marine Geology Frontiers*, 32(3): 33–40 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Y. Q., Kuang, H. W., Peng, N., et al., 2011. Sedimentary Facies of Dinosaur Trackways and Bonebeds in the Cretaceous Jiaolai Basin, Eastern Shandong, China, and Their Paleogeographical Implications. *Earth Science Frontiers*, 18(4): 9–24 (in Chinese with English abstract).
- Lü, H. B., Wang, J., Zhang, H. C., 2011. Discovery of the Late Mesozoic Slump Beds in Lingshan Island, Shandong, and a Pilot Research on the Regional Tectonics. *Acta Geologica Sinica*, 85(6): 938–946 (in Chinese with English abstract).
- Ma, Q., Zhou, Y., Mu, H., et al., 2022. Geochemistry of the Laiyang Group from Outcrops and Lingke-1 Core on Lingshan Island, Shandong Province, Eastern China: Implications for Provenance, Tectonic Setting and Palaeo-Environment. *Geological Magazine*, 159(1), 37–54. <https://doi.org/10.1017/S0016756821000819>
- Ma, Z. J., Chai, F. M., Wang, W., et al., 2022. Petrogenesis of Pingtaishan Compound Massif in the Eastern Tianshan, NW China, and Its Implications on Late Paleozoic Ridge Subduction. *Earth Science*, 47(9): 3210–3228 (in Chinese with English abstract).
- Mao, X. P., Wu, C. L., Yuan, Y. B., 1998. Physical Balanced Cross Sections for Geological Structure. *Earth Science*, 23(2): 167–170 (in Chinese with English abstract).
- Qi, J. F., Yang, Q., Wang, Z. Y., et al., 2001. Some Problems about Compiling Tectonic Evolution Sections of Basin. *Geological Review*, 47(4): 388–392 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Liu, L., Li, Y. L., 2012. Geochronology and Geochemistry of Potassic and Sodid Volcanic Rocks in Tangtuo Basin, Shandong Province: Implications for Lithospheric Thinning beneath the North China Craton. *Acta Petrologica Sinica*, 28(4): 1044–1056 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, J. S., Xu, X. S., Luo, Q. H., 2001. ^{40}Ar - ^{39}Ar Dating of Potassium-Rich Volcanic Rocks and Lamprophyres in Western Shandong and Tracing of Their Source Regions. *Chinese Science Bulletin*, 46(18): 1500–1508 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. S., Niu, B. G., Wang, J., et al., 2013. 1:5 Million International Geological Map of Asia. *Acta Geoscientica Sinica*, 34(1): 24–30, 129 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Pang, X., Lei, C., et al., 2015. Ocean and Continent Transition in Passive Continental Margins and Analysis of Lithospheric Extension and Breakup Process: Implication for Research of the Deepwater Basins in the Continental Margins of South China Sea. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 102–114 (in Chinese with English abstract).
- Ren, J. Y., Xie, X. N., 1996. Continental Rifting and Basin Development System. *Geological Science and Technology Information*, 15(4): 26–32 (in Chinese with English abstract).
- Tang, X. J., Zhang, S. L., Shan, R., 2018. Discussion on Mesozoic Plate Boundary in East China-Korean Peninsula: A Revised Model of Plate Indentation. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 38(2): 79–87 (in Chinese with English abstract).
- Wang, A. D., Zhou, Y. Q., Zhang, Z. K., et al., 2014. Characteristics and Significance of Underwater Non-Tectonic Cracks in Laiyang Group of Lingshan Island, Shandong Province. *Acta Geoscientica Sinica*, 35(3): 321–328 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Chang, S. C., Lin, P., et al., 2016. Evidence of Early Cretaceous Transpression in the Sulu Orogenic Belt, Eastern China. *Tectonophysics*, 687: 44–55. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2016.09.005>
- Wu, F. Y., 2005. Nature and Significance of the Early Cretaceous Giant Igneous Event in Eastern China. *Earth and*

- Planetary Science Letters*, 233(1–2): 103–119. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.02.019>
- Xia, G.Q., Yi, H.S., Zhao, X.X., et al., 2012. Quantitative Study on Paleoelevation of Eastern China Plateau in Late Mesozoic. *Chinese Science Bulletin*, 57(23): 2220–2230(in Chinese with English abstract).
- Xie, X.N., Ren, J.Y., Lei, C., 2012. Reviews and Prospects of Depositional Basin Dynamics. *Geological Science and Technology Information*, 31(5): 76–84(in Chinese with English abstract).
- Yang, J.Y., 2010. Research on the Tectonic Relation between the South Yellow Sea Basin and Its Adjacent Area and Distribution Characteristic and Tectonic Evolution of the Mesozoic–Paleozoic Marine Strata (Dissertation). Zhejiang University, Hangzhou (in Chinese with English abstract).
- Zhang, L. M., Wang, C.S., Ke, C., et al., 2016. High Elevation of Jiaolai Basin during the Late Cretaceous: Implication for the Coastal Mountains along the East Asian Margin. *Earth and Planetary Science Letters*, 456: 112–123. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.09.034>
- Zhang, L. X., Liu, P. H., Wang, Y. L., et al., 2021. Depositional Timing and Provenance Characteristics of the Cretaceous in Sishan Formation in the Shewopo Area, Jiaolai Basin: New Evidence from Detrital Zircon U–Pb Dating and REE Composition. *Earth Science*, 46(3): 1119–1132 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Jin, W.J., Wang, Y.L., et al., 2007. Discussion of North Boundary of the East China Plateau during Late Mesozoic Era. *Acta Petrologica Sinica*, 23(4): 689–700 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Q., Qian, Q., Wang, E.Q., et al., 2001. An East China Plateau in Mid–Late Yanshanian Period: Implication from Adakites. *Chinese Journal of Geology*, 36(2): 248–255(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.B., Wu, F.Y., Yang, Z.H., et al., 2016. Petrogenesis and Geological Implications of Phanerozoic Granitoids at Northern Korean Peninsula. *Acta Petrologica Sinica*, 32(10): 3098–3122(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y.Q., Zhao, Y., Dong, S.W., et al., 2004. Tectonic Evolution Stages of the Early Cretaceous Rift Basins in Eastern China and Adjacent Areas and Their Geodynamic Background. *Earth Science Frontiers*, 11(3): 123–133(in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. K., Zhou, Y. Q., Zhou, T. F., et al., 2020. Geochemistry of Siltstones of the Early Cretaceous Laiyang Group in Taolin Area, Shandong Province, Eastern China: Implications for Provenance, Source Weathering, Palaeo-Environment, and Tectonic Setting. *Geological Journal*, 55(1): 133–146. <https://doi.org/10.1002/gj.3400>
- Zhang, Y. Q., Dong, S. W., Shi, W., 2003. Cretaceous Deformation History of the Middle Tan–Lu Fault Zone in Shandong Province, Eastern China. *Tectonophysics*, 363(3–4): 243–258. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(03\)00039-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(03)00039-8)
- Zhou, T. F., Zhou, Y. Q., Nina Søger, et al., 2022. Late Mesozoic Rifting and Its Deep Dynamic Mechanisms in the Central Sulu Orogenic Belt: Records from Lingshan Island. *Science China: Earth Sciences*, 52(10): 2002–2022 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.Q., Gu, Y.J., Zhou, T.F., et al., 2019. Sedimentary Strata and Organic Matter Features of the Cretaceous Laiyang Group in Eastern Shandong Province. *Oil & Gas Geology*, 40(1): 109–122(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.Q., Zhang, Z.K., Liang, W.D., et al., 2015. Late Mesozoic Tectono–Magmatic Activities and Prototype Basin Restoration in Eastern Shandong Province, China. *Earth Science Frontiers*, 22(1): 137–156(in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.Q., Zhou, T.F., Ma, C.Q., et al., 2018. Transcrustal Magmatic System of Early Cretaceous (Qingshan Stage) in Eastern Shandong and the Basin Formation Related to “Thermal Upwelling–Detachment”. *Earth Science*, 43(10): 3373–3390 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, Y.Q., Zhou, T.F., Zhang, Z.K., et al., 2017. Characteristics and Formation Mechanism of Soft–Sediment Deformation Structures Related to Volcanic Earthquakes of the Lower Cretaceous Qingshan Group in Lingshan Island, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography*, 19(4): 567–582(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 (Terrae)*, 48(4): 415–435(in Chinese with English abstract).
- Zhu, G., Wang, Y., Wang, W., et al., 2017. An Accreted Micro–Continent in the North of the Dabie Orogen, East China: Evidence from Detrital Zircon Dating. *Tectonophysics*, 698: 47–64. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.01.004>

附中文参考文献

- 程燕君, 吴智平, 刘晓宇, 等, 2022. 中国东部日青威盆地灵山岛灵科1井晚侏罗世至早白垩世磁性地层研究. 中

- 国科学: 地球科学, 52(5): 903—919.
- 丁林, Satybaev MAKSATBEK, 蔡福龙, 等, 2017. 印度与欧亚大陆初始碰撞时限、封闭方式和过程. 中国科学: 地球科学, 47(3): 293—309.
- 傅朋远, 2013. 沂沭断裂带早白垩世火山岩年代学及其成因研究(硕士学位论文). 合肥: 合肥工业大学.
- 解习农, 任建业, 雷超, 2012. 盆地动力学研究综述及展望. 地质科技情报, 31(5): 76—84.
- 匡永生, 庞崇进, 洪路兵, 等, 2012. 胶莱盆地晚白垩世玄武岩的年代学和地球化学特征及其对华北岩石圈减薄—增生的制约. 大地构造与成矿学, 36(4): 559—571.
- 李三忠, 索艳慧, 李玺瑶, 等, 2018. 西太平洋中生代板块俯冲过程与东亚洋陆过渡带构造—岩浆响应. 科学通报, 63(16): 1550—1593.
- 李三忠, 张国伟, 周立宏, 等, 2011. 中、新生代超级汇聚背景下的陆内差异变形: 华北伸展裂解和华南挤压逆冲. 地学前缘, 18(3): 79—107.
- 李志强, 杨波, 韩自军, 等, 2021. 南黄海中—新生代裂谷盆地构造—热演化: 对成盆机制和烃源岩热演化的指示. 地球科学, 47(5): 1652—1668.
- 梁瑞才, 韩国忠, 郑彦鹏, 等, 2001. 南黄海重磁场与地质构造特征. 科学通报, 46(增刊 1): 59—67.
- 刘菲菲, 2019. 山东东部近海日青威盆地的构造格局与演化研究(博士学位论文). 青岛: 中国石油大学(华东).
- 刘菲菲, 周瑶琪, 许红, 等, 2016. 灵山岛成因特征、类型及其地质构造意义. 海洋地质前沿, 32(3): 33—40.
- 柳永清, 旷红伟, 彭楠, 等, 2011. 山东胶莱盆地白垩纪恐龙足迹与骨骼化石埋藏沉积相与古地理环境. 地学前缘, 18(4): 9—24.
- 吕洪波, 王俊, 张海春, 2011. 山东灵山岛晚中生代滑塌沉积层的发现及区域构造意义初探. 地质学报, 85(6): 938—946.
- 马志杰, 柴凤梅, 王雯, 等, 2022. 东天山平台山复式岩体岩石成因及其对晚古生代洋脊俯冲的启示. 地球科学, 47(9): 3210—3228.
- 毛小平, 吴冲龙, 袁艳斌, 1998. 地质构造的物理平衡剖面法. 地球科学, 23(2): 167—170.
- 漆家福, 杨桥, 王子煜, 等, 2001. 关于编制盆地构造演化剖面的几个问题的讨论. 地质论评, 47(4): 388—392.
- 邱检生, 刘亮, 李友连, 2012. 山东汤头盆地钾质及钠质火山岩的年代学与地球化学: 对华北克拉通岩石圈减薄的启示. 岩石学报, 28(4): 1044—1056.
- 邱检生, 徐夕生, 罗清华, 2001. 鲁西富钾火山岩和煌斑岩的⁴⁰Ar—³⁹Ar定年及源区示踪. 科学通报, 46(18): 1500—1508.
- 任纪舜, 牛宝贵, 王军, 等, 2013.1: 500万国际亚洲地质图. 地球学报, 34(1): 24—30, 129.
- 任建业, 解习农, 1996. 大陆裂陷作用及盆地发育系统. 地质科技情报, 15(4): 26—32.
- 任建业, 庞雄, 雷超, 等, 2015. 被动陆缘洋陆转换带和岩石圈伸展破裂过程分析及其对南海陆缘深水盆地研究的启示. 地学前缘, 22(1): 102—114.
- 唐贤君, 张绍亮, 单蕊, 2018. 中国东部—朝鲜半岛中生代板块结合带划分: 对嵌入模式的新认识. 海洋地质与第四纪地质, 38(2): 79—87.
- 王安东, 周瑶琪, 张振凯, 等, 2014. 山东灵山岛莱阳群水下非构造裂缝特征及意义. 地球学报, 35(3): 321—328.
- 夏国清, 伊海生, 赵西西, 等, 2012. 晚中生代中国东部高原古高程定量研究. 科学通报, 57(23): 2220—2230.
- 杨金玉, 2010. 南黄海盆地与周边构造关系及海相中、古生界分布特征与构造演化研究(博士学位论文). 杭州: 浙江大学.
- 张连祥, 刘平华, 王义龙, 等, 2021. 胶莱盆地蛇窝泊地区白垩纪林寺山组沉积时代与物源特征: 来自碎屑锆石U—Pb测年与稀土元素组成的新证据. 地球科学, 46(3): 1119—1132.
- 张旗, 金惟俊, 王元龙, 等, 2007. 晚中生代中国东部高原北界探讨. 岩石学报, 23(4): 689—700.
- 张旗, 钱青, 王二七, 等, 2001. 燕山中晚期的中国东部高原: 埃达克岩的启示. 地质科学, 36(2): 248—255.
- 张艳斌, 吴福元, 杨正赫, 等, 2016. 朝鲜半岛北部显生宙花岗岩成因研究及地质意义. 岩石学报, 32(10): 3098—3122.
- 张岳桥, 赵越, 董树文, 等, 2004. 中国东部及邻区早白垩世裂陷盆地构造演化阶段. 地学前缘, 11(3): 123—133.
- 周腾飞, 周瑶琪, Nina Soager, 等, 2022. 苏鲁造山带中部晚中生代裂谷作用与深部动力机制: 来自灵山岛的记录. 中国科学: 地球科学, 52(10): 2002—2022.
- 周瑶琪, 辜洋建, 周腾飞, 等, 2019. 山东东部白垩系莱阳群沉积地层与有机质特征. 石油与天然气地质, 40(1): 109—122.
- 周瑶琪, 张振凯, 梁文栋, 等, 2015. 山东东部晚中生代构造—岩浆活动及原型盆地恢复. 地学前缘, 22(1): 137—156.
- 周瑶琪, 周腾飞, 马昌前, 等, 2018. 山东东部早白垩世青山期穿地壳岩浆系统与热隆滑脱成盆. 地球科学, 43(10): 3373—3390.
- 周瑶琪, 周腾飞, 张振凯, 等, 2017. 山东省灵山岛下白垩统青山群火山地震软沉积物变形构造特征及成因机制. 古地学报, 19(4): 567—582.
- 朱光, 刘程, 顾承串, 等, 2018. 郯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.