



南黄海盆地崂山隆起构造特征与油气勘探方向

雷宝华, 张银国, 王明健, 陈建文, 梁 杰, 王文娟

Structural characteristics and hydrocarbon exploration prospect of the Laoshan uplift in the South Yellow Sea Basin

LEI Baohua, ZHANG Yinguo, WANG Mingjian, CHEN Jianwen, LIANG Jie, and WANG Wenjuan

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2021101201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

南黄海崂山隆起二叠系砂岩储层特征及其油气勘探前景

Characteristics and hydrocarbon prospects of the Permian sandstone reservoirs of the Laoshan Uplift, South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 181

中国海域基岩油气藏特征及未来勘探方向

Characteristics of the recently bedrock hydrocarbon reservoir in China Seas and future exploration directions
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 151

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

北黄海盆地东部坳陷中生界次生孔隙的发育规律

Development of Mesozoic secondary pore zones in the Eastern Depression of North Yellow Sea Basin
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 194

南薇西含油气盆地地层层序及生储盖组合特征

Characteristics of stratigraphic sequence and the source–reservoir–cap assemblages in the Nanweixi petroliferous basin
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 163

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement–involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea
海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

雷宝华, 张银国, 王明健, 等. 南黄海盆地崂山隆起构造特征与油气勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(2): 131-143.
LEI Baohua, ZHANG Yinguo, WANG Mingjian, et al. Structural characteristics and hydrocarbon exploration prospect of the Laoshan uplift in the South Yellow Sea Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(2): 131-143.

南黄海盆地崂山隆起构造特征与油气勘探方向

雷宝华^{1,2}, 张银国^{1,2,3}, 王明健^{1,2}, 陈建文^{1,2}, 梁杰^{1,2}, 王文娟^{1,2}

1. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 青岛 266237
2. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 青岛 266237
3. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 青岛 266580

摘要:崂山隆起海相地层作为南黄海盆地海相中—古生界油气勘探的新领域、新层系,将是下一步油气战略发现和勘探认识突破的方向。综合近年来详查勘探的地震解释成果,划分该隆起北部为青峰变形带,南部为高石稳定带。指出青峰变形带整体为逆冲和逆掩推覆体系,发育 NE 向逆断层;高石稳定带为弱变形稳定带,发育规模较小的 NW 向斜列断层。崂山隆起断裂走向有 NE、NW 和近 EW 向 3 组,边界断裂为近 EW 走向反转断裂。海相构造层变形具有北强南弱、西强东弱、上强下弱的特征。印支—早燕山期挤压推隆和晚燕山—喜马拉雅早期弱拉伸/张扭作用下差异升降错断,形成了崂山断隆区,具有挤压、拉伸、走滑和反转等 4 大构造样式。通过形成过程分析,揭示崂山隆起加里东期为古隆起;海西期为稳定地台;印支期可能为北部前陆盆地的前隆挠曲带,形成幅度增大的背斜;燕山早期为改造型断背斜;燕山中期崂山隆起基本定型;晚燕山—早喜马拉雅期隆升剥蚀,并发育局部小残凹;喜马拉雅晚期开始整体沉降。结合油气地质条件分析,认为崂山隆起南部的高石稳定带是海相油气勘探有利区带,海相下构造层(震旦系—志留系)变形改造较弱,是有利的油气勘探层系。

关键词:海相地层;形成过程;构造特征;油气勘探;崂山隆起;南黄海盆地

中图分类号:P736 文献标识码:A DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021101201

Structural characteristics and hydrocarbon exploration prospect of the Laoshan uplift in the South Yellow Sea Basin

LEI Baohua^{1,2}, ZHANG Yinguo^{1,2,3}, WANG Mingjian^{1,2}, CHEN Jianwen^{1,2}, LIANG Jie^{1,2}, WANG Wenjuan^{1,2}

1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266237, China
2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266237, China
3. School of Geosciences, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China

Abstract: Meso-Paleozoic marine deposits widely occur on the Laoshan uplift of the South Yellow Sea Basin. As a new field and layer for oil and gas exploration, it shall be the future targets for strategic discovery of oil and gas and the breakthrough point of exploration understandings. Based on the detailed seismic interpretation results and exploration progress made in recent years, the uplift is divided into two parts, the Qingfeng deformation zone in the north and the Gaoshi stable zone in the south. The Qingfeng deformation zone is a cover-detachment overthrust nappe system characterized by NE trending thrust faults, while the Gaoshi stability zone a weak deformation and stable zone. NW trending synclinal faults are developed in small scale. The fault system of the Laoshan uplift can be subdivided into three groups, NE, NW and nearly EW in trending, and the boundary fault is a reverse fault nearly in EW direction. The deformation of marine structural layer is strong in the north and west and weak in the south and the east, strong in the upper and weak in the lower. The Laoshan fault-uplift area was formed by Indosinian-Early Yanshanian compressional thrust and late Yanshanian-Early Himalayan weak tension/tension torsion, and four structural styles of compressional, tensional, strike-slip and inversional are recognized. Through the analysis of their forming process, it is revealed that the Laoshan uplift is an old uplift formed in Caledonian period. It was a stable platform in Hercynian. In the Indosinian period, the northern foreland basin was probably a foreuplift flexural belt, formed on an anticline with increasing amplitude. The early Yanshanian fault anticline was a

资助项目:青岛海洋科学与技术试点国家实验室山东省专项经费“中国海域重点盆地发育时空差异及其深部过程”(2021QNL020001-1);中国地质调查局地质调查项目“崂山隆起构造沉积条件地质调查”(DD20190818);青岛市市南区科学计划项目“印支期以来崂山隆起构造变形与隆升过程”(2020-2-021-QT);国家自然科学基金“南黄海崂山隆起二叠系储层油气成藏破坏与流体演化过程还原研究”(42076220),“南黄海盆地中部隆起形成演化的低温热年代学制约”(41606079)

作者简介:雷宝华(1984—),男,硕士,高级工程师,主要从事盆地构造分析和海洋油气地质研究, E-mail: manoil@163.com

收稿日期:2021-10-12; **改回日期:**2021-12-16. 周立君编辑

reformed fault anticline. The uplifting was basically stopped in middle Yanshanian stage. The uplifting and denudation happened in late Yanshanian-early Himalayan period, and local residual depressions developed. The overall subsidence began in late Himalayan. Combined with the analysis of oil and gas geological conditions, it is considered that the Gaoshi stable zone in the south of the Laoshan uplift is a favorable region for Marine oil and gas exploration, and the lower structural layer from Sinian to Silurian is weak in deformation and transformation. It should be also a favorable layer for oil and gas exploration.

Key words: marine stratum; formation process; structural features; hydrocarbon exploration; Laoshan uplift; South Yellow Sea basin

南黄海盆地位于下扬子地区东部的南黄海海域,面积 $18\times 10^4\text{ km}^2$,经历了陆相中—新生界勘探(1961—1990年)、探索勘查(1990—2005年)和海相中—古生界勘探(2005年至今)等3个阶段。已采集数字二维地震约 $8\times 10^4\text{ km}$,三维地震约 $2\times 10^3\text{ km}^2$,钻井30口,未获得实质性油气突破。近年来,我国在公益性和商业性油气资源调查与勘探方面都加大了工作投入,并在盆地基底结构^[1-3]和构造演化^[4-8]、构造变形^[9-10]、地层发育^[11-13]和资源潜力^[14]等方面取得了新进展。

位于南黄海盆地中部的崂山隆起构造变形相对较弱,海相油气保存条件较优越,具备形成大型油气田物质基础,是海相中—古生界油气勘探的新层系、新领域,也是下一步油气战略发现和勘探认识突破的重要方向。近年来,通过对崂山隆起深部海相地层地震资料攻关和地层属性综合分析^[15-17]、构造特征研究^[18-20]、成因演化不同新模式的建立^[21-23]和油气勘探前景再评价^[24-25],崂山隆起已在多方面取得了技术突破和认识创新。如海相中—古生界地震探测技术获得突破^[26];在新近系之下推测为海相中—古生界^[27]成层反射,经大陆架科学探井CSDP-2得以证实,并在下三叠统及上古生界多个层段发现油气显示^[28-31];海相第一套地震反射标志层的识别被重新考虑^[13]等。

然而,目前对崂山隆起构造特征及其对油气成藏的认识仍存在一些不足。首先,由于早期地震资料品质欠佳,缺乏对整个崂山隆起构造和结构特征的系统解析^[18-20];其次,前人研究对于崂山隆起形成过程认识较为宏观^[21-23],还未建立内部差异化构造演化模式;再者,隆起形成过程与油气地质条件匹配关系的分析讨论较弱,特别是对多期次构造活动对油气藏的保存与破坏作用分析较少。因此,本文根据最近崂山隆起中—古生界探测技术突破而获取的高质量地震资料和新近钻探成果,利用区域构造分析、海陆对比和地层回剥等技术,在井震标定和地震地层属性分析的基础上,完成了崂山隆起构造精细解释,对崂山隆起构造特征、形成过程和油气勘探方向等方面作了较为深入系统性分析和总

结,为揭示地质规律和下一步油气勘探突破提供依据。

1 地质概况

南黄海盆地是苏北-南黄海盆地的海域部分、扬子地台在海域的延伸、下扬子地块的主体^[32],也是叠合于下扬子地台前震旦系变质岩基底之上,由新元古代震旦纪—中生代海相残留盆地和晚中生代—新生代陆相断陷盆地等构成的多旋回叠合盆地^[3,33-34]。南黄海中—新生代陆相沉积盆地具有“两坳夹一隆”的构造格局,自北向南分别为烟台坳陷、崂山隆起和青岛坳陷^[13](图1)。盆地以北为千里岩隆起区,以南为勿南沙隆起区。变形改造后的震旦纪—中生代海相残留盆地,由北往南可依次划分为烟台冲断区、崂山断隆区和青岛断褶区等3个差异变形单元^[35](图2)。

崂山隆起实际上是中—古生代海相地层变形和隆升作用而形成的断隆区(图3)。以海相中—古生界顶面(印支面)为基准,崂山隆起埋深范围500~1000 m,东西浅、中间深。印支面之上,新近系和第四系直接广覆于海相变形层之上,仅局部残凹发育白垩系—古近系;印支面之下,海相震旦系—中生界发育较为齐全,震旦系、寒武系、奥陶系、志留系、上泥盆统、石炭系、二叠系和下三叠统均有发育,总厚度约5000~8000 m。其中,下志留统及以上地层被区内大陆架科学探井CSDP-2证实^[29-30]。

2 构造特征

2.1 平面分带特征

崂山断隆区是南黄海震旦纪—中生代海相盆地在印支期变形改造后形成的次级构造区划单元,其范围主要是由崂山隆起南、北缘两组近EW向大型边界断裂所控制。印支—燕山早期,这两组边界断裂均为基底卷入式逆冲断裂,在扬子板块与中朝板块印支期碰撞挤压背景下形成。燕山中期开始,因区域挤压应力开始向拉伸应力转变,边界逆断裂

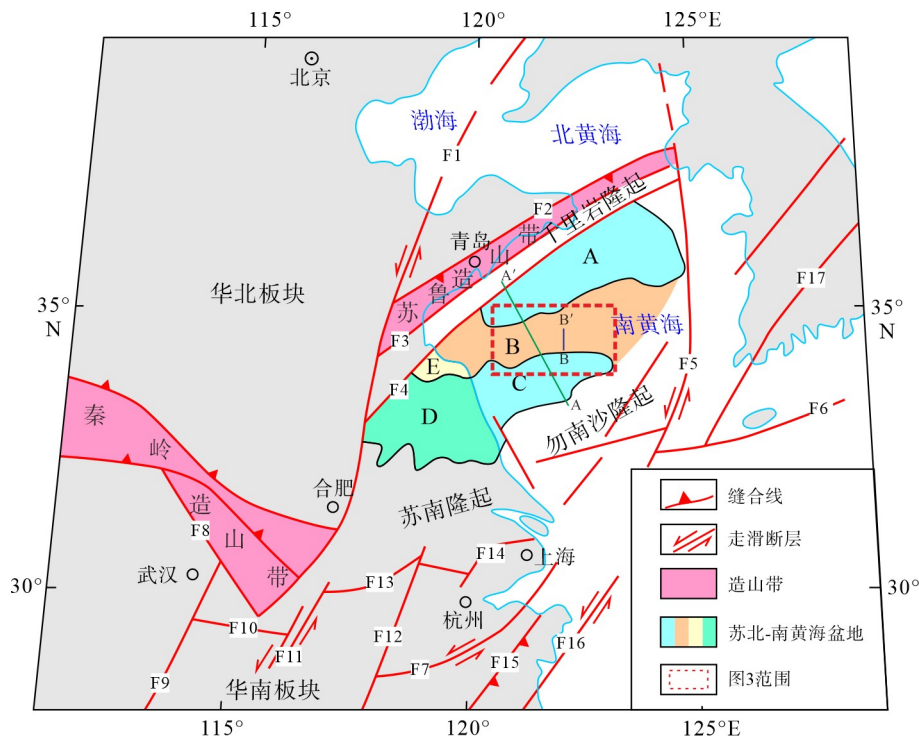


图 1 苏北-南黄海盆地及其周边主要构造单元图

苏北-南黄海盆地名称: A. 烟台拗陷, B. 崂山隆起, C. 青岛拗陷, D. 苏北盆地, E. 滨海凸起。断裂带名称: F1. 郯庐断裂, F2. 五莲-诸城断裂, F3. 连云港-黄梅断裂, F4. 千里岩断裂, F5. 朝鲜半岛西缘断裂, F6. 济州岛南缘断裂, F7. 江绍断裂, F8. 英店-青山口断裂, F9. 团风-麻城断裂, F10. 咸宁-阳新断裂, F11. 长江剪切带, F12. 冀西-赣东北断裂, F13. 江南断裂, F14. 苏州-群山断裂, F15. 丽水-政和-大浦断裂, F16. 长乐-南澳断裂, F17. 韩国沃川断裂。

Fig.1 Tectonic map of the Subei-South Yellow Sea Basin and adjacent areas

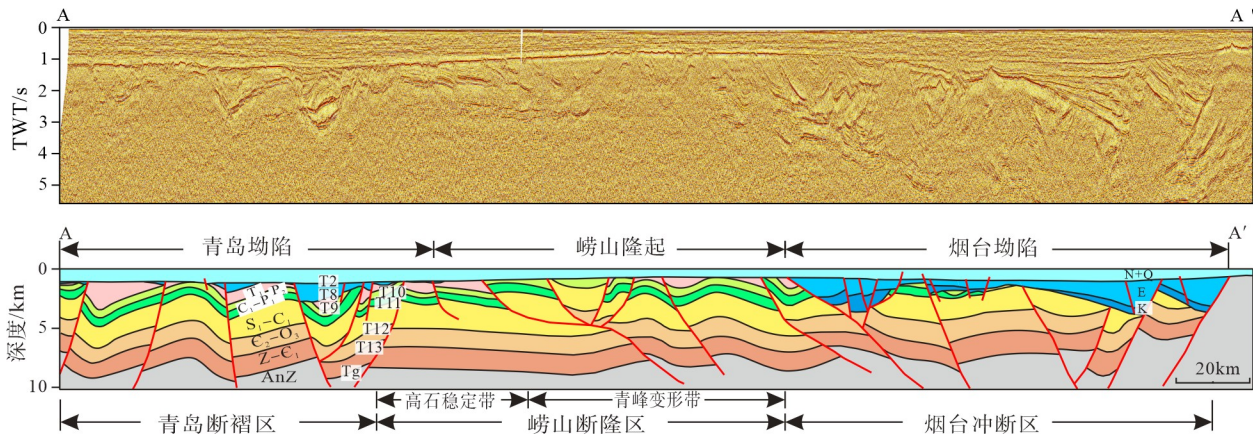


图 2 南黄海盆地构造特征剖面图

剖面位置见图 1。

Fig.2 Seismic and interpreted profile showing the tectonic characteristics of the South Yellow Sea Basin

The section location is shown in Fig. 1.

控制的上盘地层开始反转回滑^[36], 而崂山隆起相对隆升, 隆升作用一直持续到喜马拉雅期。

根据地层保存状况、断裂活动和构造变形差异, 可将崂山断隆区进一步划分为两个近东西向的次级构造带: 分别是北部的青峰变形带和南部的高

石稳定带(图 2—4)。

青峰变形带构造变形较为强烈, 总体表现为一个大型逆冲推覆体系。然而, 变形带内北缘、中部和南缘构造特征具有差异性。北缘主要表现为基底卷入式逆冲, 地层向南呈现高角度上抬, 说明在

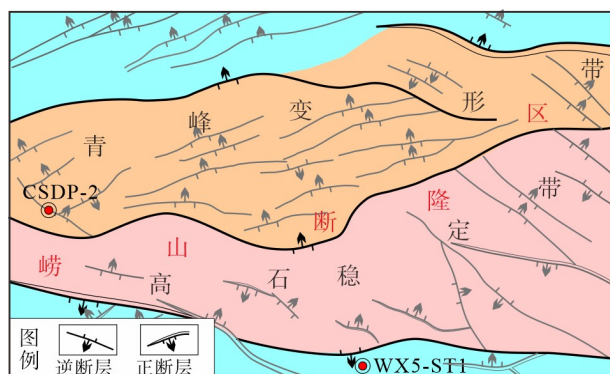


图3 崂山隆起海相中—古生界构造区划图

Fig.3 Structural division of the marine Mesozoic-Paleozoic on the Laoshan uplift

该位置来自北部的挤压应力较为强烈,但与北部烟台冲断带相比,逆冲强度明显减弱,海相地层剥蚀程度也不如北部严重(图5-a2)。中部是应力调节平衡区域,由主逆冲断裂、分支断裂和反冲断裂序列构成复杂的断裂体系,形成局部冲隆构造和冲凹构造相间的构造格局。南缘逆冲带由北倾的逆掩断裂和分支断裂控制,逆掩断裂主要沿志留系高家边组泥岩层滑脱,收敛于滑脱面之上,并在滑脱面上部形成叠瓦状推覆结构(图5-a1)。

高石稳定带位于崂山隆起南部,为构造弱变形带,形态上呈现西窄东宽的特点。目前,该带中部地震资料品质较好,标志层反射特征清楚,能连续追踪对比,地层总体比较完整,构造变形作用较弱,区内各部位构造特征不同。东部和西部,可能受块

体边界或火山岩体影响,地震资料品质相对较差,海相地层存在不同程度的变形。中部是高石稳定带的主体部分,区内古生界沉积稳定,构造变形较弱。断裂系统以浅层小型正断层和逆断层为主,少见穿透志留系高家边组的深大断裂,构造多以断背斜和宽缓背斜为主(图5-b3)。南部是应力释放区(图5-b1, b2)。印支—燕山早期,由南向北的挤压应力在此消减;燕山晚期—喜马拉雅早期,在南黄海盆地区域性伸展断陷背景下,该区同样受到一定程度的张扭应力影响,并发育一些断穿层位较浅、规模不大的张(扭)性断裂(图5-b4)。

2.2 纵向结构特征

在变质基底之上,南黄海盆地崂山隆起以中、晚三叠世的印支运动为界,总体经历了从海相到陆相环境的转换,从而划分为海相和陆相两大构造层。海相构造层又可分为海相下构造层(Z_2 -S)和海相上构造层(D_3 - T_1)。陆相构造层又可分为陆相断陷构造层(K-E)和坳陷构造层(N-Q)(图2)。印支—早燕山期,海相构造层经历了挤压变形;晚燕山—早喜马拉雅期,在拉张/张扭应力环境下,差异隆升的海相构造层遭受大面积剥蚀,特别是在受挤压隆升更为强烈的北部,剥蚀更为强烈;而在南部,由于整体隆升背景下的局部差异沉降,形成小规模陆相断陷构造层。

下古生界志留系可作为海相上、下构造层差异变形的分界层(图4)。由于下志留统高家边组发育

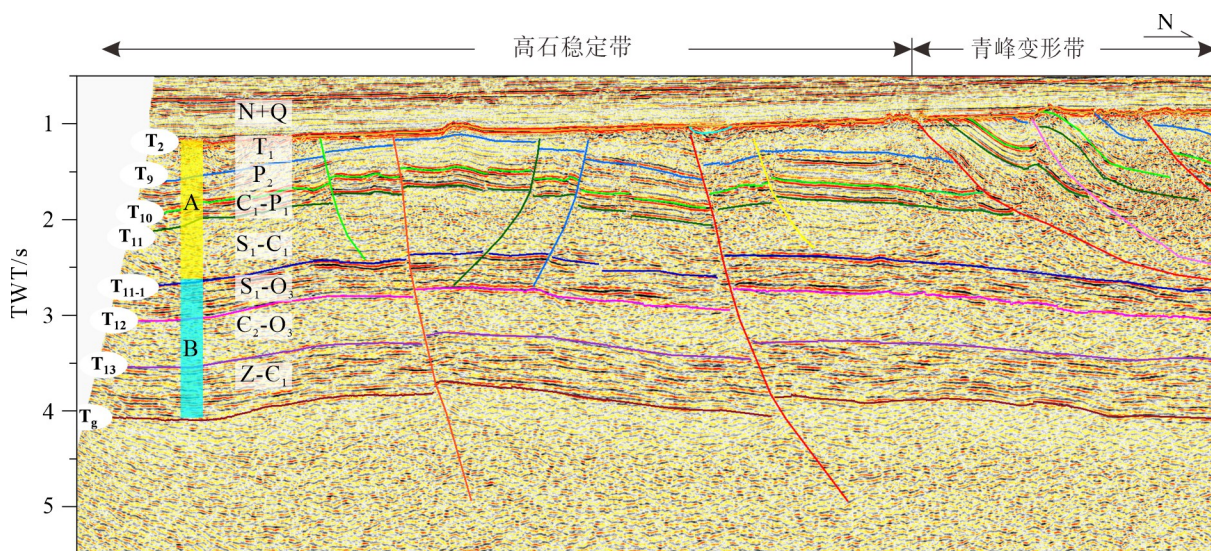


图4 崂山隆起地震剖面

A. 海相上构造层, B. 海相下构造层。剖面位置见图1。

Fig.4 Seismic profile across the Laoshan uplift

A. Marine upper structural layer, B. marine lower structural layer. The section location is shown in Fig. 1

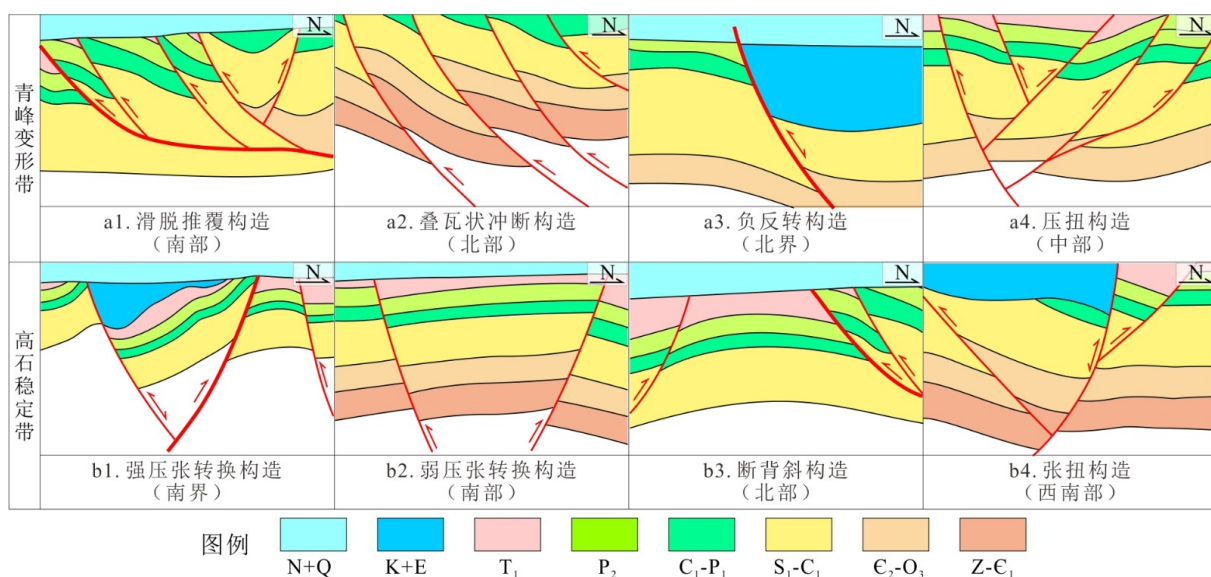


图 5 崂山隆起主要构造样式

Fig.5 Main structural patterns of the Laoshan uplift

厚度较大的塑性泥页岩地层,海相上构造层的变形和错断大部分通过塑性流变和横向滑脱被吸收。受其影响,晚期张扭性的正断层到古生界深层断距减小或停止发育,只有部分断距规模较大的正断层切穿下构造层至基底,从而使得海相下构造层的构造形态较海相上构造层完整。

陆相中生界—古近系为断陷构造层,主要发育在隆起南部的几个小型残凹中,而在隆起高部位断陷层不发育或因后期的构造活动剥蚀殆尽;其上的新近系和第四系为坳陷构造层,地层表现为区域性广覆沉积,构造运动以整体升降为主,断层不发育。新近系与中—古生界的分界面是该区最大的区域不整合面,也是多期不整合构造的叠合面。渐新世至早中新世发生的三垛运动是一次构造反转事件,盆地整体经历了断拗转换,该事件造成的区域不整合面也是陆相断陷构造层和坳陷构造层的分界面。

2.3 断裂特征及分布

崂山隆起区内断裂平面上有 NE、NW 和近 EW 向三组走向。崂山隆起南、北部的边界发育大规模的近 EW 向的控拗反转断层,这些断层断距大、延伸长,主要由早期逆断层在黄桥压张转换事件活化而来。区内断裂多分布在隆起北部的青峰变形带,以 NE 走向的逆断层为主。在崂山隆起高石稳定带,受中—新生代张扭作用的影响,海相上构造层发育 NW 走向为主的正断层,这些正断层与早期逆断裂体系共存。

断裂平面展布具有较明显的分区性。在崂山隆起的北部以 NE 和近 EW 向逆断裂为主,规模较大,主要受晚印支—早燕山期近 SN 向强烈挤压影响;在其南部以 NW、NWW 向断裂为主, NW 向断层多为次级断层,规模较小,主要受晚燕山—早喜马拉雅期张扭影响。然而,其东部发育规模较大的 NW 向压扭性质的逆断层,则控制了崂山隆起东部古生代地层赋存和地形地貌,形成规模较大的断隆构造。

纵向上,海相中—古生界深部断裂数量比浅层发育少(图 4),尤其在崂山隆起的南部比较明显,这是因为南部多数断层规模较小,断层断开的层位浅,一些断层滑脱到上二叠统煤系地层或下志留统高家边组泥页岩层中,断层没有向深层传播,只是对地层产状有一定的影响,发育不同规模的褶皱变形。

从发育期次来看,断裂具有“早期逆、晚期正”的特点(图 2,图 5)。印支晚期—燕山早期,南黄海盆地发生了强烈的挤压构造运动,而崂山隆起位于该盆地中部,构造活动强度较盆地南、北部弱,但同样发育逆断层,并对局部地层进行了改造;燕山晚期—喜马拉雅期,在区域拉张应力场的主导下,崂山隆起开始发育正断裂,前期的逆断层部分反转活化。

断裂活动与盆地区域的构造活动息息相关,对崂山隆起影响较大的是印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动,而印支期之前的加里东和海西运动,普遍认为其影响较弱。印支—燕山早期,在扬子和中朝板块碰撞挤压影响下,崂山隆起发育一些规模较大的逆断层,主要发育在隆起北部和构造带边界;燕山晚期—喜马拉雅期,在近南北向伸展应力场作

用下, 崂山隆起部分逆断层开始回返, 同时也叠加发育新的张(扭)性断层, 但其规模总体较小, 主要断开海相上构造层。

2.4 构造样式

构造样式是指同一期构造作用或同一应力场背景下形成的构造总和。崂山隆起主要构造样式按应力性质可分为挤压收缩构造样式、拉张伸展构造样式、走滑构造样式和反转构造样式4类(图5)。

挤压收缩构造样式是崂山隆起海相构造层主要构造样式, 主要是印支—燕山早期运动的直接产物。挤压构造样式按照基底是否参与挤压褶皱或断裂变形又可分为基底卷入型收缩构造样式(图5-a2)和盖层滑脱型构造样式(图5-a1)。在崂山隆起北部, 发育一个规模较大的逆冲推覆带, 该带发育一系列自北向南逆冲断层; 在逆冲带前缘, 逆断层沿志留系高家边组软弱层进行滑脱, 形成盖层滑脱型构造样式; 在逆冲带后根部, 主断层深入基底形成基底卷入型构造样式。

伸展构造样式是崂山隆起陆相构造层主要构造样式, 是晚燕山—喜马拉雅早期构造运动的直接产物。根据断层是否断穿基底, 伸展构造样式可分为基底卷入型和盖层滑脱型。在伸展构造样式中, 单条正断层的产状可表现为直线型、铲式和座椅式断层。多条断层可以形成“Y”字型、扫帚状、多米诺式和低角度滑脱式等多种断层剖面组样式。崂山隆起伸展构造主要发育于高石稳定带的南部。

走滑构造样式是崂山隆起次要构造样式, 形成于晚侏罗世—早白垩世或古近纪末期区域应力场转换作用。而应力场的转换是受周缘板块活动特征的影响, 造成不同方向应力场先后叠加, 在南黄海盆地形成压扭或张扭性质的断裂。在地震解释中发现, 崂山隆起部分断层具有不同方向先后叠加活动的特征, 产生一定程度的走滑分量, 从而形成压扭构造(图5-a4)和张扭构造(图5-b4)。

反转构造样式在崂山隆起南、北边界较为明显(图5-a3), 主要是早期收缩构造样式在晚燕山—喜马拉雅早期发生伸展回滑而形成的负反转构造。从地震剖面反射结构和地震波组特征来看, 现今多数的控凹主断层经历了压张转换的负反转过程。由于崂山隆起区陆相构造层小型断陷发育少, 现今残留沉积地层薄, 在喜马拉雅期该区发生了隆升, 地层遭受剥蚀, 因此反转构造样式不甚明显。

整体来看, 崂山隆起海相构造层原始沉积地层是较为稳定的, 而后期(印支—燕山早期)的挤压构

造变形具有北强南弱、西强东弱的特征。北强南弱: 是由于崂山隆起处于南北不均衡对冲区域^[35], 其北部受到扬子与华北板块碰撞应力强度相对较大, 距离近, 发育由北向南的逆冲断裂; 其南部受到华夏古陆汇聚应力强度较弱, 距离远, 主要发育由南向北的逆冲断裂。由于崂山隆起长期处于相对高部位, 海相构造层受到后期拉张作用的影响, 在浅层发育一些正断裂。西强东弱: 由于东西走向的崂山隆起, 其西部更靠近北东向的板块边界, 受到的应力强度更大。

印支—燕山早期运动是该区最强烈的构造运动, 在地震剖面上可见由北往南逆掩推覆体系; 燕山晚期—喜马拉雅早期的拉张以及喜马拉雅中晚期的再次挤压隆升形成了该区多种构造样式。在这些构造样式的控制下, 崂山隆起区形成挤压背斜、断背斜、断鼻、叠瓦状冲断、挤压推覆、反转构造和扭动构造等多种构造类型。

3 讨论

3.1 形成过程

根据构造分析和前人研究, 南黄海盆地形成于前震旦纪褶皱变质结晶基底之上, 主要经历了震旦纪—早中生代稳定克拉通和地台、中中生代前陆盆地、晚中生代—古近纪断陷和新近纪以来的拗陷^[4, 6, 7, 37]等4个沉积盆地演化阶段; 6个重要的构造发育阶段: 加里东期(广西运动)整体隆升阶段、海西期(东吴运动)短暂弱抬升阶段、印支期—燕山早期强烈回返阶段、燕山中期(黄桥运动)压张转换阶段和喜马拉雅晚期(三垛运动)的断拗转换阶段。其中, 中三叠统沉积时期的金子事件(印支运动Ⅰ幕)可作为海—陆相沉积地层的转折^[35]。受多期构造运动的影响, 不同时期地层的分布残留存在差异。

崂山隆起作为南黄海盆地次一级构造单元, 其形成演化与南黄海盆地演化过程密切相关, 同时又在地层发育、隆拗转换和变形特征上有其独特之处。前人对崂山隆起的认识存在两种不同的观点: 一是崂山隆起为晚期(晚三叠世—古近纪)形成的隆起^[21, 23]; 二是崂山隆起(晚震旦纪以来)是长期和多期叠加的隆起^[22]。这两种观点主要是对古生代崂山隆起演化认识的不同, 究其原因与整个南黄海盆地勘探程度较低、深部的海相下古生界地震反射层连续性较差、无完整揭示地层的钻井和对下扬子整体构造演化的认知差异或不足相关。本文在研

究崂山隆起形成过程时,没有从单一地震解释剖面为基础开展整个崂山隆起构造演化分析,而是参考前人利用的2D Move等软件开展平衡剖面制作过程^[22]和CSDP-2井的单井剥蚀量参数^[23]。同时,考虑整个南黄海盆地勘探和认知现状,将崂山隆起的演化作为南黄海盆地乃至整个下扬子区域演化格局的一部分^[38],与勘探程度较高的下扬子陆域地质演化规律相匹配,结合前文对崂山隆起地质剖面和构造特征分析成果,突出崂山隆起不同时期、不同构造环境、不同构造层、不同构造带演化的差异性,体现以下地质规律:①整体上,崂山隆起在加里东期构造变形整体较弱,印支期构造变形北强南弱,改造程度较大;②崂山隆起下构造层比上构造层稳定;③崂山隆起具有北强南弱的分带差异性;④崂山隆起青峰变形带断层数量多,规模大,构造样式以冲断和滑脱推覆构造为主,高石稳定带断层规模较小,数量少;⑤晚燕山期崂山隆起边界断层开始回滑,表现为跷跷板式反转,北边界断层反转回滑距离大;⑥地层的剥蚀量具有北部大南部少的特征,上部的三叠系剥蚀最为严重,主要残留下三叠统青龙组。崂山隆起的形成过程总体划分为5个阶段,建立了早期隆起雏形、中期填平、晚期变形改造的演化模式(图6)。

3.1.1 加里东期古隆起雏形阶段

新元古代震旦纪时期,随着南华纪冰川的消融和长期夷平,海水分别自北部的秦岭洋和南部的华南海侵入扬子准地台,随着海侵规模不断扩大,南黄海所属的下扬子地区逐渐发育为“两盆夹一台”的沉积格局,即以海上的崂山古隆起^[21]区域、陆上的石台—南京一带构成中部台地,北侧海上的烟台坳陷区域和陆上的滁州沿线为盆地主体,南侧海上的青岛坳陷—勿南沙隆起区域和陆上的休宁沿线为深水盆地主体,共同构成了克拉通边缘海盆。

志留纪晚期华南海关闭,华夏板块与扬子板块的拼合碰撞,结束了下扬子地区“两盆夹一台”的沉积构造格局。下扬子准地台受加里东运动影响,以隆升为主,志留系上部遭受剥蚀。晚泥盆世开始了又一次海侵,南黄海地区开始了晚古生代陆表海发育阶段,崂山古隆起形成的平缓隆起普遍被夷平,海相上、下构造层间形成假整合或不整合接触,志留系上部遭受剥蚀,中、下泥盆统沉积缺失。

3.1.2 海西—印支早期稳定地台阶段

海西期,崂山隆起为稳定地台型盆地性质,上泥盆统—三叠系在整个南黄海盆地广覆式沉积。频繁的差异升降运动,引起岩性的变化、沉积的迁

移和局部高地势区地层的缺失。从晚泥盆世到二叠纪,崂山隆起碳酸盐岩与碎屑岩互层发育。海西运动晚期,区域小幅度的抬升,局部高地势处二叠系孤峰组有一定的剥蚀。整体上,该阶段地层厚度变化较小,沉积地层在区内分布比较稳定。

3.1.3 印支晚期—燕山早期对冲挤压阶段

中三叠世末期开始,由于华南板块和中朝板块之间的碰撞挤压,一方面造成了苏鲁造山带的形成;另一方面使得南黄海地区形成大隆大坳相间的格局,南黄海北部慢慢演变为前陆盆地,崂山隆起区可能作为该前陆盆地的前隆部位,发生挠曲变形。

随后,苏鲁造山带和华南造山带从南、北两面向南黄海地区夹持和推进,整体形成强弱程度不同的对冲构造格局。其中,南黄海盆地北部由北向南逆冲推覆规模和强度均较大,产生大量的北倾逆断层,构成烟台冲断构造区;南黄海盆地南部由南向北的逆冲挤压作用相对较弱,地层逆冲错断规模相对较小,主要形成南倾断层,构成青岛断褶构造区。而崂山隆起位于盆地中部,处于对冲构造部位,是挤压应力的释放区,推覆构造不甚发育,处于构造相对稳定的部位。

崂山隆起在北强南弱的不均衡挤压应力作用下,形成“南北不平衡(不对称)对冲”的总体构造模式。崂山隆起北部形成以滑脱构造为特征的青峰变形带,南部形成了构造相对稳定的高石稳定带。

根据区域构造演化过程来看,南黄海盆地在燕山早期主要是在挤压应力场的控制下;燕山晚期主要是在拉张应力场的控制下;而燕山中期为应力场转换期,应力环境开始由挤压转换为拉张。随着幕式拉张活动的增强,中—新生代陆相断陷盆地开始发育,崂山古隆起区迅速开始相对隆升,南黄海盆地形成现今区域上“两坳夹一隆”的构造格局。

3.1.4 燕山晚期—喜马拉雅早期夷平阶段

晚燕山运动开始,南黄海盆地整体进入区域拉张环境,部分逆断层反转成为正断层,南黄海北部前陆盆地在拉张作用下发生断陷,苏北-南黄海南部也相继断陷沉积,并一直持续到喜马拉雅运动早期。而崂山隆起处于相对隆升部位,区内地层不断被剥蚀夷平,大部分地区未接受断陷期沉积或接受沉积后又被剥蚀。这一时期,崂山隆起浅层受到一定程度的拉张应力影响,局部发育一些小型残凹。残凹中的沉积物可能主要为晚中生代和古近纪早期地层。

3.1.5 喜马拉雅运动晚期整体沉降阶段

进入新近纪以来,包括崂山隆起在内的整个南

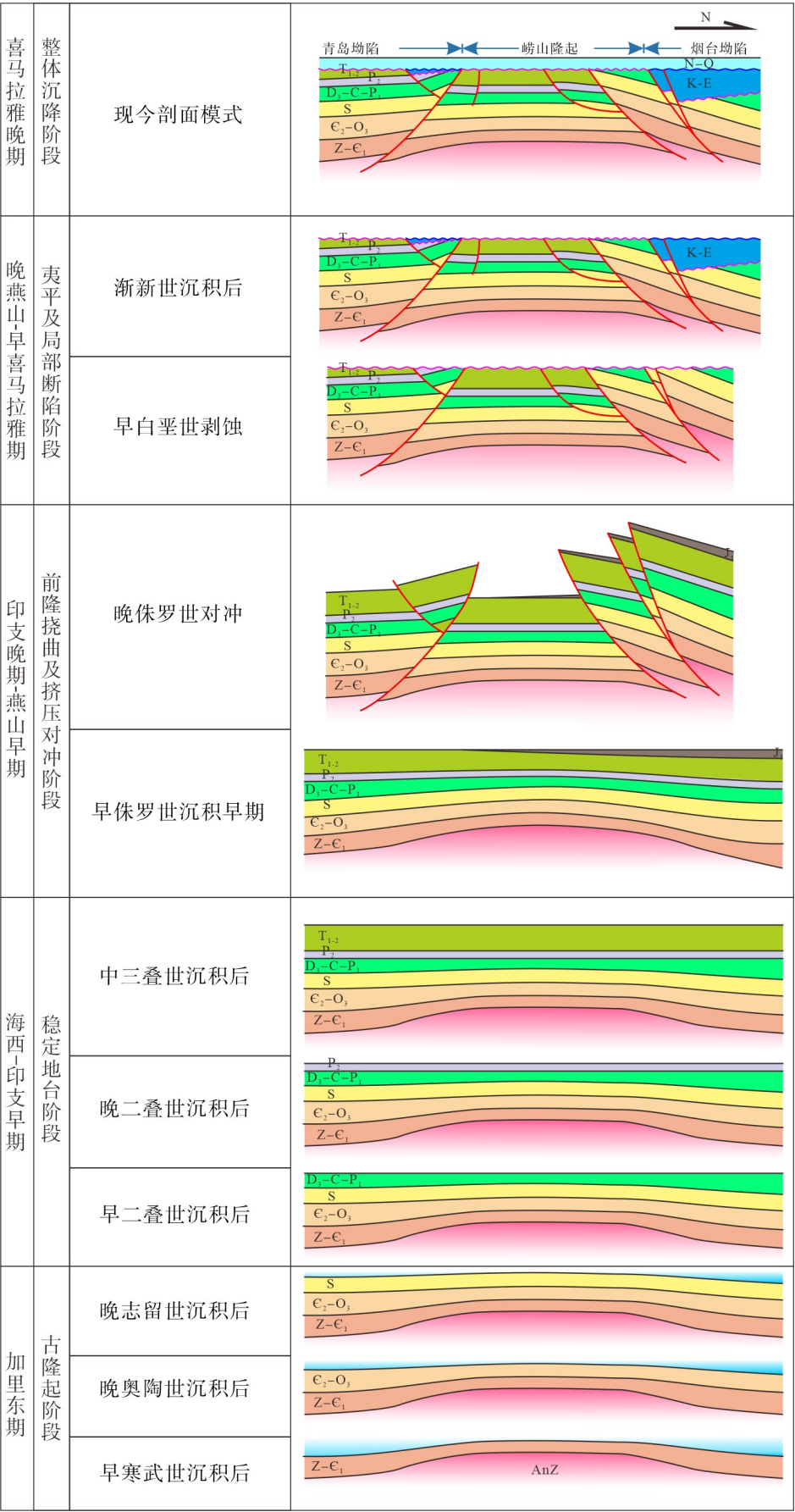


图 6 崂山隆起形成演化过程
Fig.6 Origin and evolution of the Laoshan uplift

黄海盆地转变成广阔湖盆,处于拗陷沉积阶段,但其局部地区在早期存在差异性升降或压扭作用,部分地段接受新近纪地层沉积较薄。目前,该套新近纪和第四纪地层分别处于半成岩和未成岩阶段。

综上所述,崂山隆起在加里东期为古隆起;海西期为稳定地台阶段;印支期,崂山隆起可能为南黄海北部前陆盆地的前隆挠曲带,增加了古隆起的幅度,形成崂山大背斜构造;燕山早期,随着南北不均挤压应力的增强,崂山大背斜改造为断背斜,北翼被冲断为多个局部断背斜、断块构造,南翼形成较为完整断背斜、断鼻和次级局部背斜构造;燕山中期,应力场压张转换,崂山隆起基本定型;燕山晚期—喜马拉雅早期,崂山隆起为隆升剥蚀区,构造变形弱;在喜马拉雅晚期的三垛运动后,开始整体沉降,全区接受沉积。

3.2 油气勘探方向

3.2.1 油气地质条件

震旦纪—中生代下扬子地区发育了多套海相地层,受到印支期—中燕山期、晚燕山期—喜马拉雅期构造改造和盆地叠加^[39]。地震资料解释、海陆对比、钻井和油气地质条件分析认为,南黄海盆地发育与下扬子陆域相似的新元古界震旦系陡山沱组、下寒武统幕府山组、下志留统高家边组 and 上二叠统龙潭—大隆组等4套有效烃源岩^[32,40],具有形成大型油气田的物质基础,具有4大套较完整的生储盖组合和多期生烃过程。第1套生储盖组合:以震旦系陡山沱组泥页岩为烃源岩,以震旦系灯影组白云岩为储层,下寒武统幕府山组泥页岩为盖层;第2套生储盖组合:以下寒武统幕府山组泥页岩为烃源岩,以中、上寒武统—奥陶系灰岩和白云岩为储层,下志留统高家边组泥页岩为盖层;第3套生储盖组合:以上奥陶统五峰组(O_3w)和下志留统高家边组泥页岩为烃源岩,以中志留统坟头组、上志留统茅山组、上泥盆统五通组砂岩以及石炭系灰岩为储层,以下二叠统栖霞组泥灰岩、上二叠统龙潭组及大隆组泥页岩为盖层;第4套生储盖组合:以下二叠统栖霞组泥灰岩、上二叠统龙潭组及大隆组泥页岩为烃源岩,以上二叠统龙潭组砂岩和下三叠统青龙组灰质白云岩为储层,以下三叠统青龙组泥灰岩和膏盐层为盖层^[32]。

在崂山隆起,海相地层普遍遭受一定程度的剥蚀(图3,图5),剥蚀作用较强的主要有3期,第1期为加里东运动引起海相地层整体抬升,造成中—下泥盆统的剥蚀或沉积间断;第2期为晚印支—早燕

山运动造成海相地层的挤压推覆抬升,使得侏罗系—三叠系剥蚀;第3期为喜马拉雅运动Ⅲ幕的三垛事件,表现为区域性挤压抬升剥蚀,早喜马拉雅期形成的局部小断陷剥蚀殆尽,晚燕山幕式裂陷初期的拗陷/断拗沉积层剥蚀成小残凹,海相上构造层遭受进一步剥蚀,从而使得上部的第4套生储盖组合部分区域遭到破坏,而下部的第1、第2和第3套生储盖组合较为完整。

从崂山隆起单点埋藏史和生烃史来看(图7),震旦系陡山沱组泥页岩在早寒武世开始生油,中奥陶世达到生油高峰,早志留世达到生气高峰;下寒武统幕府山组在晚奥陶世开始生油,早志留世达到生油高峰,晚泥盆世达到生气高峰;上奥陶统—下志留统高家边组在晚志留世开始生油,早二叠世达到生油高峰,中三叠世达到生气高峰;二叠系烃源岩在中三叠世开始生油,晚白垩世达到生油高峰,现今尚未达到生气高峰。在海相上构造层遭受一定程度的剥蚀区域将缺乏有利的顶部盖层,下构造层将是主要的烃源岩和勘探目的层^[41]。

从生排烃期与构造形成和演化的匹配关系来看,崂山隆起在加里东期就已经具备古隆起雏形,可作为原生油气运移成藏的指向区和聚集区,第1套生储盖组合中的震旦系陡山沱组烃源岩达到生油生气阶段,第2套生储盖组合中的下寒武统幕府山组烃源岩达到了生油阶段。海西期—印支早期,崂山隆起处于稳定地台发育阶段,在前期古隆起雏形地质背景下,幕府山组烃源岩进入生气阶段,上奥陶统—下志留统高家边组泥岩既是第2套生储盖组合的盖层又是第3套生储盖组合的生油层,厚度较大,区域分布稳定,具备优越的下生上储和自生自储油气保存条件。然而,第3套生储盖组合缺乏大型的隆凹构造背景,油气聚集条件相对弱一些。第4套生储盖组合中的上二叠统龙潭—大隆组烃源岩刚开始生油,盖层缺乏大型的隆凹构造背景。晚印支—早燕山期,挤压性质的印支运动和燕山运动对崂山隆起不同构造层、不同部位进行了差异性改造,位于海相上构造层的第4套生储盖组合改造和破坏作用最大,第3套改造作用中等,位于海相下构造层的第1和2套改造作用最弱。因此,位于崂山隆起高石稳定带海相下构造层是原生油气藏改造最弱的部位,青峰变形带海相上构造层是原生油气藏改造最强的部位。晚燕山—早喜马拉雅期,在区域拉伸断陷背景下,崂山隆起差异隆升和剥蚀夷平,海相上构造层局部改造后已完全定型,海相下构造层影响更弱,4套烃源岩生排烃条件

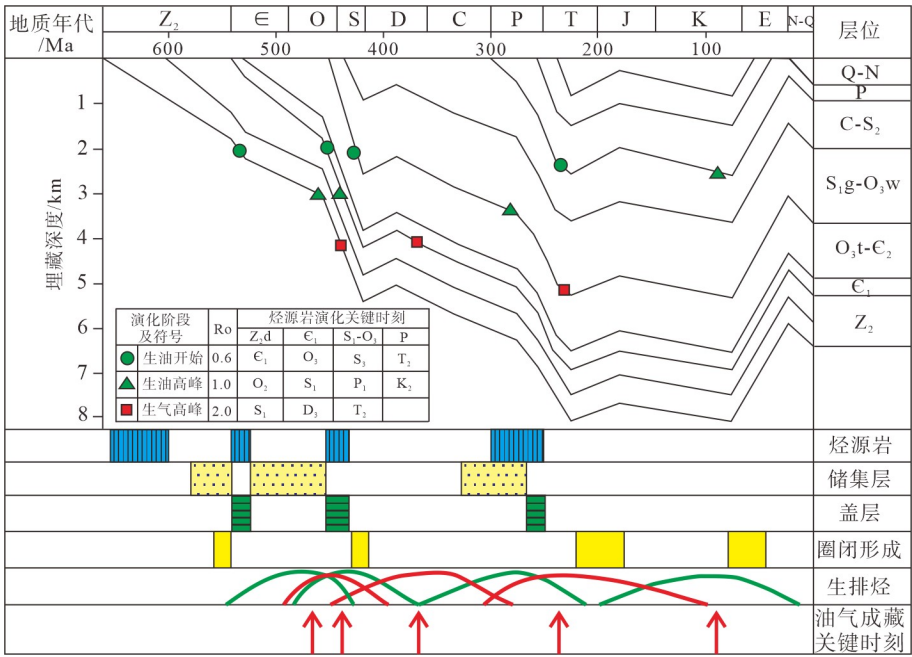


图 7 南黄海崂山隆起地层埋藏史及油气成藏匹配关系图

Fig.7 Burial history and relationship with elements of petroleum system on the Laoshan uplift of the South Yellow Sea Basin

放缓或趋于停止。晚喜马拉雅期,崂山隆起整体沉降了 500~1000 m,促进了烃源岩再次生排烃,但圈闭构造早已定型,崂山隆起高石稳定带海相下构造层长期维持着原生油气藏改造最弱的部位。

3.2.2 有利构造部位与油气勘探方向

从下扬子海相油气勘探领域来看,印支期至燕山期的构造运动对古生界原生油气藏改造较为严重,但构造相对稳定的地区仍有勘探远景^[42]。特别是构造更为稳定的对冲带是油气成藏的有利区块,但对冲带不同段构造特征具有较大的差异性,导致油气成藏的复杂性^[43]。油气的大规模成藏需要较为稳定的保存条件,下志留统高家边组巨厚泥岩不仅吸收了印支运动以来多期次的构造应变,而且具有良好的封闭覆盖,从而使得海相下构造层油气藏的保存条件优越^[44]。例如,无为—望江、句容—南陵等地对冲向带是海相中生界、古生界油气勘探的优选地区^[45];苏州—无锡地区的下古生界受后期改造作用较弱,是油气勘探的有利地区^[46];遭受构造运动破坏比较弱的南黄海盆地崂山隆起和勿南沙隆起是潜在的油气勘探目标^[47]。

南黄海海相地层油气勘探的突破口是构造改造相对薄弱的地区,崂山隆起高石稳定带海相地层地震反射相对清晰,具有埋藏浅、构造稳定、大型圈闭发育等特点,是南黄海中—古生界油气勘探有利的区带;高石稳定带海相构造层构造改造相对较弱,特别是海相下构造层,在加里东期就有古隆起

雏形,燕山中期基本定型,是有利的油气勘探层系,可寻找出古生古储的原生油气藏、二次生烃油气藏以及古生新储和新生古储等类型的油气藏^[25, 48]。同时,海相地层发育 3~4 套生储盖组合,生储盖优越,组合匹配良好,具有形成大型油气田的条件。

在下扬子地区,古生界露头区已发现背斜逾 200 个(许多背斜面积大于 40 km²),上震旦统一二叠系的油气显示(油、气和固体沥青)达 424 处,多赋存于洞、缝,反映该区经历了广泛的成油过程^[42]。位于崂山隆起海相地层对冲断隆区内的科探井 CSDP-2 井,首次证实了南黄海中部崂山隆起存在中—古生代海相地层,并在下三叠统及上古生界多个层段发现油气显示^[28-31],展示了崂山隆起存在多源供烃、油气运移和多期成藏过程,具有良好的油气资源前景。

4 结论

(1)崂山隆起海相构造层发育较为完整,地层厚度和展布较为稳定。纵向上,可分为海相和陆相两大构造层,其中海相构造层可细划为海相上构造层和海相下构造层。平面上,可划分为北部的青峰变形带和南部的高石稳定带。北部青峰变形带逆冲和逆掩构造发育,断层规模较大,走向以 NE 向为主;南部高石稳定带构造变形弱,断层规模较小,走向以 NW 向为主。

(2)崂山隆起海相构造层构造样式主要有挤压、拉张、走滑和反转构造4类。断裂走向有NE、NW和近EW向3组。构造变形具有北强南弱、东西强中部弱、上强下弱的特征。崂山隆起主要经历了印支—早燕山期挤压和晚燕山—喜马拉雅早期弱张(扭)等应力环境。

(3)崂山隆起在加里东期为古隆起,在晚三叠世开始隆升,燕山中期基本定型,早喜山期受到一定程度的改造。

(4)崂山隆起发育4套较完整的生储盖组合,下部的第1、第2和第3套生储盖组合较为完整和优越。高石稳定带是南黄海盆地海相地层油气勘探有利的区带,海相下构造层改造薄弱,是有利的油气勘探层系。

参考文献 (References)

- [1] 张玄杰, 张婉, 范子梁, 等. 南黄湖北部航空重力场特征及主要地质认识[J]. 中国地质调查, 2017, 4(1): 50-56. [ZHANG Xuanjie, ZHANG Wan, FAN Ziliang, et al. Characteristics of airborne gravity field and the main geological discovery in the northern South Yellow Sea [J]. Geological Survey of China, 2017, 4(1): 50-56.]
- [2] Zhang M H, Xu D S, Chen J W. Geological structure of the Yellow Sea Area from regional gravity and magnetic interpretation [J]. *Applied Geophysics*, 2007, 4(2): 75-83.]
- [3] 张训华, 杨金玉, 李刚, 等. 南黄海盆地基底及海相中、古生界地层分布特征[J]. 地球物理学报, 2014, 57(12): 4041-4051. [ZHANG Xunhua, YANG Jinyu, LI Gang, et al. Basement structure and distribution of Mesozoic-Paleozoic marine strata in the South Yellow Sea basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014, 57(12): 4041-4051.]
- [4] 冯志强, 陈春峰, 姚永坚, 等. 南黄湖北部前陆盆地的构造演化与油气突破[J]. 地学前缘, 2008, 15(6): 219-231. [FENG Zhiqiang, CHEN Chunfeng, YAO Yongjian, et al. Tectonic evolution and exploration target of the northern foreland basin of the South Yellow Sea [J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(6): 219-231.]
- [5] 郑求根, 蔡立国, 丁文龙, 等. 黄海海域盆地的形成与演化[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 647-654. [ZHENG Qiugen, CAI Ligu, DING Wenlong, et al. Development and evolution of basins in Yellow Sea [J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(5): 647-654.]
- [6] Yao Y J, Chen C F, Feng Z Q, et al. Tectonic evolution and hydrocarbon potential in northern area of the South Yellow Sea [J]. *Journal of Earth Science*, 2010, 21(1): 71-82.
- [7] 杨琦, 陈红宇. 苏北-南黄海盆地构造演化[J]. 石油实验地质, 2003, 25(S1): 562-565. [YANG Qi, CHEN Hongyu. Tectonic evolution of the north Jiangsu-South Yellow Sea basin [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2003, 25(S1): 562-565.]
- [8] 马立桥, 陈汉林, 董庸, 等. 苏北-南黄海南部叠合盆地构造演化与海相油气勘探潜力[J]. 石油与天然气地质, 2007, 28(1): 35-42. [MA Liqiao, CHEN Hanlin, DONG Yong, et al. Tectonic evolution of Subei-South Nanhuanghai superimposed basin from the Late Mesozoic to the Cenozoic and marine petroleum potential [J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(1): 35-42.]
- [9] 侯方辉, 张志珣, 张训华, 等. 南黄海盆地地质演化及构造样式地震解释[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(5): 61-68. [HOU Fanghui, ZHANG Zhixun, ZHANG Xunhua, et al. Geologic evolution and tectonic styles in the South Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2008, 28(5): 61-68.]
- [10] 韩宗珠, 刘涵, 许红, 等. 南黄海盆地盆山耦合作用与地质演化[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(4): 55-62. [HAN Zongzhu, LIU Han, XU Hong, et al. Geological evolution and basin-range coupling relationship of the South Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(4): 55-62.]
- [11] 高顺莉, 谭思哲, 侯凯文, 等. 南黄海域侏罗系分布与构造意义[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(4): 7-12. [GAO Shunli, TAN Sizhe, HOU Kaiwen, et al. Distribution pattern of the Jurassic in the South Yellow Sea and its tectonic implications [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(4): 7-12.]
- [12] 张银国, 梁杰. 南黄海盆地二叠系至三叠系沉积体系特征及其沉积演化[J]. 吉林大学学报:地球科学版, 2014, 44(5): 1406-1418. [ZHANG Yinguo, LIANG Jie. Sedimentary system characteristics and their sedimentary evolution from the Permian to Triassic in the Southern Yellow Sea basin [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2014, 44(5): 1406-1418.]
- [13] 雷宝华, 陈建文, 李刚, 等. 南黄海盆地二叠系地震地层特征与识别[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 29-34. [LEI Baohua, CHEN Jianwen, LI Gang, et al. Seismic stratigraphic features and recognition of the Permian in the South Yellow Sea basin [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(1): 29-34.]
- [14] Chen J W, Xu M, Lei B H, et al. Prospective prediction and exploration situation of marine Mesozoic-Paleozoic oil and gas in the South Yellow Sea [J]. *China Geology*, 2019, 2(1): 67-84.
- [15] 欧阳凯, 张训华, 李刚. 南黄海中部隆起地层分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(1): 59-66. [OUYANG Kai, ZHANG Xunhua, LI Gang. Characteristics of stratigraphic distribution in the middle uplift of South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2009, 29(1): 59-66.]
- [16] 王丰, 李慧君, 张银国. 南黄海崂山隆起地层属性及油气地质[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2010, 30(2): 95-102. [WANG Feng, LI Huijun, ZHANG Yinguo. Stratigraphic geologic attribute and hydrocarbon geology in Laoshan uplift of South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(2): 95-102.]
- [17] 杨艳秋, 易春燕, 李刚. 南黄海中部隆起地震层序地层的识别及其地质时代探讨[J]. 海相油气地质, 2015, 20(4): 49-56. [YANG Yanqiu, YI Chunyan, LI Gang. Sequence stratigraphic identification and geologic age inference of seismic profiles in central uplift, South Yellow Sea [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(4): 49-56.]
- [18] 赵文芳, 杨风丽, 庄建建. 南黄海中部隆起中-古生界构造特征分析[J]. 油气藏评价与开发, 2011, 1(5): 6-13. [ZHAO Wenfang, YANG Fengli, ZHUANG Jianjian. Analysis of the tectonic characteristics of Mesozoic-Paleozoic in the middle uplift of the South Yellow Sea [J]. *Reservoir Evaluation and Development*, 2011, 1(5): 6-13.]

- [19] 孙晶, 王建强, 肖国林, 等. 南黄海盆地中部隆起海相上构造层分布及断裂系统特征[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(10): 18-25. [SUN Jing, WANG Jianqiang, XIAO Guolin, et al. Distribution pattern of marine upper structural layer and fault system on the central uplift of the South Yellow Sea basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(10): 18-25.]
- [20] 李慧君, 林年添, 金兴, 等. 南黄海盆地崂山隆起中、古生界断裂特征[J]. 山东科技大学学报:自然科学版, 2012, 31(6): 69-75. [LI Huijun, LIN Niantian, JIN Xing, et al. The fracturing characteristics of Mesozoic and Paleozoic Eras in Laoshan uplift of South Yellow Sea Basin [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology:Natural Science, 2012, 31(6): 69-75.]
- [21] 杨长清, 董贺平, 李刚. 南黄海盆地中部隆起的形成与演化[J]. 海洋地质前沿, 2014, 30(7): 17-21. [YANG Changqing, DONG Heping, LI Gang. Formation and tectonic evolution of the central uplift of the South Yellow Sea Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2014, 30(7): 17-21.]
- [22] 陈春峰, 施剑, 徐东浩, 等. 南黄海崂山隆起形成演化及对油气成藏的影响[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 55-65. [CHEN Chunfeng, SHI Jian, XU Donghao, et al. Formation and tectonic evolution of Laoshan uplift of South Yellow Sea basin and its effect on hydrocarbon accumulation [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 55-65.]
- [23] 庞玉茂, 郭兴伟, 张训华, 等. 南黄海中中部隆起印支面剥蚀量恢复与演化过程: 来自CSDP-2井的证据[J]. 大地构造与成矿学, 2019, 43(2): 235-245. [PANG Yumao, GUO Xingwei, ZHANG Xunhua, et al. Denudation of Indosinian unconformity and tectonic evolution in the central uplift of South Yellow Sea Basin: insights from CSDP-2 well [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2019, 43(2): 235-245.]
- [24] 陈建文. 南黄海崂山隆起海相中—古生界发现多个大型圈闭构造[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(4): 69-70. [CHEN Jianwen. Many large trap structures develop in the marine Mesozoic-Paleozoic strata in the South Yellow Sea Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(4): 69-70.]
- [25] 张敏强, 高顺利, 谭思哲. 南黄海盆地中、古生界地质特征及勘探方向[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 24-34. [ZHANG Min-qiang, GAO Shunli, TAN Sizhe. Geological characteristics of the Meso-Paleozoic in South Yellow Sea Basin and future exploration [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 24-34.]
- [26] 陈建文, 张昇彪, 陈华, 等. 南黄海盆地海相中-古生界地震探测技术攻关历程及效果[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(4): 1-17. [CHEN Jianwen, ZHANG Yibiao, CHEN Hua, et al. Research experiences and application of seismic exploration technology to the Mesozoic-Paleozoic marine strata in the South Yellow Sea Basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2021, 37(4): 1-17.]
- [27] 张海啟, 陈建文, 李刚, 等. 地震调查在南黄海崂山隆起的发现及其石油地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(3): 107-113. [ZHANG Haiqi, CHEN Jianwen, LI Gang, et al. Discovery from seismic survey in Laoshan uplift of the South Yellow Sea and the significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(3): 107-113.]
- [28] 陈建文, 雷宝华, 梁杰, 等. 南黄海盆地油气资源调查新进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2018, 38(3): 1-23. [CHEN Jianwen, LEI Baohua, LIANG Jie, et al. New progress of petroleum resources survey in South Yellow Sea basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2018, 38(3): 1-23.]
- [29] Cai L X, Xiao G L, Guo X W, et al. Assessment of Mesozoic and Upper Paleozoic source rocks in the South Yellow Sea Basin based on the continuous borehole CSDP-2 [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 101: 30-42.
- [30] Pang Y M, Guo X W, Han Z Z, et al. Mesozoic-Cenozoic denudation and thermal history in the Central Uplift of the South Yellow Sea basin and the implications for hydrocarbon systems: Constraints from the CSDP-2 borehole [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 99: 355-369.
- [31] 蔡来星, 肖国林, 郭兴伟, 等. 南黄海盆地科学钻探CSDP-2井上古生界—中生界烃源岩评价及海相油气勘探前景[J]. 石油学报, 2018, 39(6): 660-673. [CAI Laixing, XIAO Guolin, GUO Xingwei, et al. Evaluation of Upper Paleozoic and Mesozoic source rocks in Well CSDP-2 and marine oil & gas exploration prospect in the South Yellow Sea Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2018, 39(6): 660-673.]
- [32] 陈建文, 龚建明, 李刚, 等. 南黄海盆地海相中—古生界油气资源潜力巨大[J]. 海洋地质前沿, 2016, 32(1): 1-7. [CHEN Jianwen, GONG Jianming, LI Gang, et al. Great resources potential of the marine Mesozoic-Paleozoic in the South Yellow Sea basin [J]. Marine Geology Frontiers, 2016, 32(1): 1-7.]
- [33] 郭玉贵, 李延成, 许东禹, 等. 黄东海大陆架及邻域大地构造演化史[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(1): 1-12. [GUO Yugui, LI Yancheng, XU Dongyu, et al. Tectonic evolution of Yellow Sea, east China sea and continental shelf and adjacent areas [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1997, 17(1): 1-12.]
- [34] 蔡乾忠. 中国东部与朝鲜大地构造单元对应划分[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(1): 7-24. [CAI Qianzhong. Corresponding division of geotectonic units of Eastern China and Korea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1995, 15(1): 7-24.]
- [35] Lei B H, Xu M, Chen J W, et al. Structural characteristics and evolution of the South Yellow Sea Basin since Indosinian [J]. China Geology, 2018, 1(4): 466-476.
- [36] 高顺利, 徐曦, 周祖翼. 南黄河北部盆地晚白垩世以来构造变形与盆地成因[J]. 石油与天然气地质, 2015, 36(6): 924-933. [GAO Shunli, XU Xi, ZHOU Zuyi. Structural deformation and genesis of the northern sub-basin in South Yellow Sea since Late Cretaceous [J]. Oil & Gas Geology, 2015, 36(6): 924-933.]
- [37] 姚永坚, 夏斌, 冯志强, 等. 南黄海古生代以来构造演化[J]. 石油实验地质, 2005, 27(2): 124-128. [YAO Yongjian, XIA Bin, FENG Zhiqiang, et al. Tectonic evolution of the South Yellow Sea since the Paleozoic [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2005, 27(2): 124-128.]
- [38] 朱伟林, 陈春峰, 张伯成, 等. 南黄海古生代盆地原型演变与烃源岩发育特征[J]. 石油实验地质, 2020, 42(5): 728-741. [ZHU Weilin, CHEN Chunfeng, ZHANG Bochong, et al. Paleozoic basin prototype evolution and source rock development in the South Yellow Sea [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2020, 42(5): 728-741.]
- [39] 金之钧, 刘光祥, 方成名, 等. 下扬子区海相油气勘探选区评价研究

- [J]. *石油实验地质*, 2013, 35(5): 473-479, 486. [JIN Zhijun, LIU Guangxiang, FANG Chengming, et al. Evaluation of selected areas for petroleum exploration in marine strata of Lower Yangtze region [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2013, 35(5): 473-479, 486.]
- [40] 龚建明, 王建强, 李小豫, 等. 南黄海崂山隆起古生界页岩气远景区[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2013, 33(6): 115-120. [GONG Jianming, WANG Jianqiang, LI Xiaoyu, et al. Exploration targets of Paleozoic shale gas at the Laoshan uplift, South Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2013, 33(6): 115-120.]
- [41] 戴春山, 李刚, 蔡峰, 等. 黄海前第三系及油气勘探方向[J]. *中国海上油气(地质)*, 2003, 17(4): 225-231. [DAI Chunshan, LI Gang, CAI Feng, et al. The Pretertiary and its hydrocarbon exploration targets in Yellow Sea [J]. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 2003, 17(4): 225-231.]
- [42] 郭念发, 尤效忠, 刘德法. 下扬子区古生界油气地质条件及勘探选区[J]. *石油勘探与开发*, 1998, 37(4): 4-7. [GUO Nianfa, YOU Xiaozhong, LIU Defa. Palaeozoic oil and gas geological conditions and exploration area screening in Lower Yangzi region [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1998, 37(4): 4-7.]
- [43] 梅廉夫, 戴少武, 沈传波, 等. 中、下扬子区中、新生代陆内对冲带的形成及解体[J]. *地质科技情报*, 2008, 27(4): 1-7, 14. [MEI Lianfu, DAI Shaowu, SHEN Chuanbo, et al. Formation and disintegration of Mesozoic-Cenozoic intra-continental ramp zone in Middle and Lower Yangtze region [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2008, 27(4): 1-7, 14.]
- [44] 俞凯, 郭念发. 下扬子区下古生界油气地质条件评价[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(1): 41-46, 51. [YU Kai, GUO Nianfa. Evaluation on the geologic conditions of the lower Paleozoic hydrocarbon in Lower Yangtze area [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2001, 23(1): 41-46, 51.]
- [45] 姚柏平, 陆红, 郭念发. 论下扬子地区多期构造格局叠加及其油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 1999, 26(4): 10-13. [YAO Boping, LU Hong, GUO Nianfa. The multi-stage structure frame of Lower Yangtze basin evolution and its significance in petroleum geology [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1999, 26(4): 10-13.]
- [46] 李海滨, 贾东, 武龙, 等. 下扬子地区中-新生代的挤压变形与伸展改造及其油气勘探意义[J]. *岩石学报*, 2011, 27(3): 770-778. [LI Haibin, JIA Dong, WU Long, et al. The Mesozoic-Cenozoic compressional deformation, extensional modification and their significance for hydrocarbon exploration in Lower Yangtze region [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 770-778.]
- [47] 王连进, 叶加仁, 吴冲龙. 南黄海盆地前第三系油气地质特征[J]. *天然气工业*, 2005, 25(7): 1-3. [WANG Lianjin, YE Jiaren, WU Chonglong. Petroleum geological characteristics of pre-Tertiary in South Yellow Sea Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2005, 25(7): 1-3.]
- [48] 张敏强, 漆滨汶, 高顺莉, 等. 南黄海中生界勘探进展及油气潜力[J]. *海洋地质前沿*, 2016, 32(3): 7-15. [ZHANG Minqiang, QI Binwen, GAO Shunli, et al. New exploration progress and hydrocarbon potential of the Meso-Paleozoic systems in the South Yellow Sea [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2016, 32(3): 7-15.]