

doi: 10.12029/gc20200513

王明健,张勇,潘军,黄龙,陈晓红,骆迪,侯方辉,尚鲁宁. 2020. 东部海域地学大断面地质结构特征及其对综合地层分区的约束[J]. 中国地质, 47(5): 1474-1485.

Wang Mingjian, Zhang Yong, Pan Jun, Huang Long, Chen Xiaohong, Luo Di, Hou Fanghui, Shang Luning. 2020. Geological structure of the large section in eastern China's sea areas and its constraint on comprehensive stratigraphic division[J]. Geology in China, 47(5):1474-1485(in Chinese with English abstract).

东部海域地学大断面地质结构特征 及其对综合地层分区的约束

王明健^{1,2},张勇^{1,2},潘军¹,黄龙¹,陈晓红³,骆迪¹,侯方辉¹,尚鲁宁¹

(1. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 2. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东 青岛 266071; 3. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266580)

摘要:本文利用实测的地质地球物理资料,在中国东部海域开展了地学大断面重磁震联合反演,系统研究了各构造单元的基底性质和地层结构,并以此为约束开展了海陆综合地层分区。研究认为,东海陆架盆地基底为元古宇和古生界,盖层发育5套构造层;南黄海盆地具有双重基底,盖层可以划分为8个构造层。东海陆架盆地以晚中生代燕山期以来的变形为主;南黄海盆地海相下构造层主要表现为挤压变形,陆相中构造层主要发育拉张作用形成各种构造样式。区内莫霍面深度稳定,一般在30 km左右,仅在勿南沙—中部隆起处上地幔略有抬高,总体上南部东海陆架盆地莫霍面埋深要大于北部南黄海盆地—苏鲁造山带。将中国东部海域划分为2个地层大区,6个地层区和14个地层分区。大断面地层结构研究揭示,在南黄海海域和东海海域广泛发育中、古生代地层,巨厚的中—古生界为油气资源的形成与赋存提供了丰富的物质基础。

关键词:地震剖面;地球物理;构造特征;联合反演;油气资源效应;中国东部海区

中图分类号: TE122.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2020)05-1474-12

Geological structure of the large section in eastern China's sea areas and its constraint on comprehensive stratigraphic division

WANG Mingjian^{1,2}, ZHANG Yong^{1,2}, PAN Jun¹, HUANG Long¹,
CHEN Xiaohong³, LUO Di¹, HOU Fanghui¹, SHANG Luning¹

(1. Qingdao Institute of Marine Geology, CGS, Qingdao 266071, Shandong, China; 2. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266071, Shandong, China; 3. China University of Petroleum, Qingdao 266580, Shandong, China)

Abstract: Based on the geophysical and geophysical data collected in recent years, the authors carried out the joint gravity-magnetic-seismic inversion in eastern China's sea areas and studied the characteristics of the basement and geological structure of

收稿日期:2020-04-02;改回日期:2020-07-06

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(DD20160137,DD20190205,DD20190208)及国家自然科学基金(41606079)联合资助。

作者简介:王明健,男,1983年生,博士,从事盆地构造与油气成藏研究;E-mail:wangmingjian0328@qq.com。

通讯作者:张勇,男,1970年生,研究员,博士生导师,主要从事海洋地质学方面的研究;E-mail:qimgzy@163.com。

each structural unit systematically. Constrained by the joint interpretation, the authors carried out the unified sea-land stratigraphic regionalization and predicted the favorable oil-bearing prospective areas of Mesozoic. The basement of the East China Sea shelf basin is composed of Proterozoic and Paleozoic strata, and 5 sets of tectonic layers are developed in the caprock. The south Yellow Sea basin having dual basement and caprock feature can be divided into 8 tectonic layers. The East China Sea shelf basin is dominated by the late Mesozoic Yanshanian transformation. The lower tectonic layer of the Yellow Sea basin is mainly characterized by extrusion deformation while the middle tectonic layer is mainly characterized by multiple structural styles formed by extension. The depth of the Moho surface is stable in the study area, which is usually about 30 km. The upper mantle is slightly elevated in the Wunansha-middle uplift. The Moho depth in the East China Sea shelf basin is generally deeper than that in the South Yellow Sea Basin-Sulu orogenic belt. Eastern China's sea areas and their adjacent areas can be divided into 2 first level stratigraphic regions (Eurasian), 6 second level stratigraphic regions and 14 third level stratigraphic regions. The study of large cross-section stratigraphic structure reveals that the Mesozoic and Paleozoic strata are widely developed in south Yellow Sea and the East China Sea. The thick Meso-Paleozoic strata provide a rich material basis for oil and gas formation and accumulation.

Key words: seismic section; geophysics; tectonic characteristics; joint inversion; oil and gas resources; eastern China's sea areas

About the first author: WANG Mingjian, male, born in 1983, senior engineer, mainly engages in marine geology; E-mail: wangmingjian0328@qq.com.

About the corresponding author: ZHANG Yong, male, born in 1970, senior researcher, mainly engages in marine regional geological survey and research; E-mail: qimgzy@163.com.

Fund support: Supported by the Project of China Geological Survey (No. DD20160137, No. DD20190205, No. DD20190208) and National Natural Science Foundation of China (No. 41606079).

1 前言

中国海域面积辽阔,蕴藏有丰富的矿产资源。由于海水的覆盖,海洋当中的调查手段和方法与陆地存在较大的不同,地球物理方法是海洋地质调查当中最重要的手段。但是受自身性质以及采集环境等多方面因素的影响和控制,每种地球物理资料都有其缺点和局限性(于鹏等,2006;张训华,2008)。地震勘探对于研究盆地尺度的浅层构造、地层分布等有非常明显的优势,但是在地质构造复杂、强波阻抗界面发育的地区(如南黄海盆地),地震波经常受到屏蔽,有效波穿透性大大削弱,地震反射资料品质差,无法反映区内的构造和地层发育特征。重力资料长于圈定盆地以及二级构造单元范围、深大断裂展布,偏向于较大尺度的构造单元研究。磁力资料则是在确定深大断裂的走向、性质、磁性基底深度以及火成岩分布等方面具有独特的优势。但是重磁资料是地球内部所有地质体密度和磁性的一个综合反映,不同的地质现象会形成相同的重磁力异常,这就导致重磁解释的多解性(张训华,2008;林珍等,2009,2013;骆迪等,2013)。有鉴于此,只有综合利用多种地球物理资

料,充分发挥各种地球物理资料和技术手段的优势,互为约束、互相弥补,才能提高解释结果的准确性,从而最大程度地反映地球内部的真实地质特征。

本文利用“1:100万海洋区域调查”和“全国油气资源战略选区调查与评价”项目所获得的中国东部海区重力、磁力资料以及南北向二维地震大剖面,开展重磁震联合反演,对各构造单元的地质结构以及深部构造特征进行研究,以此为约束,开展统一的海陆综合地层分区,进而为区内的油气勘探提供地质依据。

2 区域地质背景

中国东部海区地学大断面全长1148 km,走向SN向,自南向北横穿三大构造单元,分别是华南褶皱带、下扬子地台和苏鲁造山带,次级构造单元包括东海陆架盆地、闽浙隆起、南黄海盆地勿南沙—中部隆起、苏鲁造山带(图1)。

不同构造单元发育在不同的块体之上,其间为深大断裂所分隔,各构造单元在基底性质、地层发育、构造特征等方面均存在明显差异。

东海陆架盆地分布在江山—绍兴断裂以南,与北部闽浙隆起相邻。基底为元古界和古生界地层,

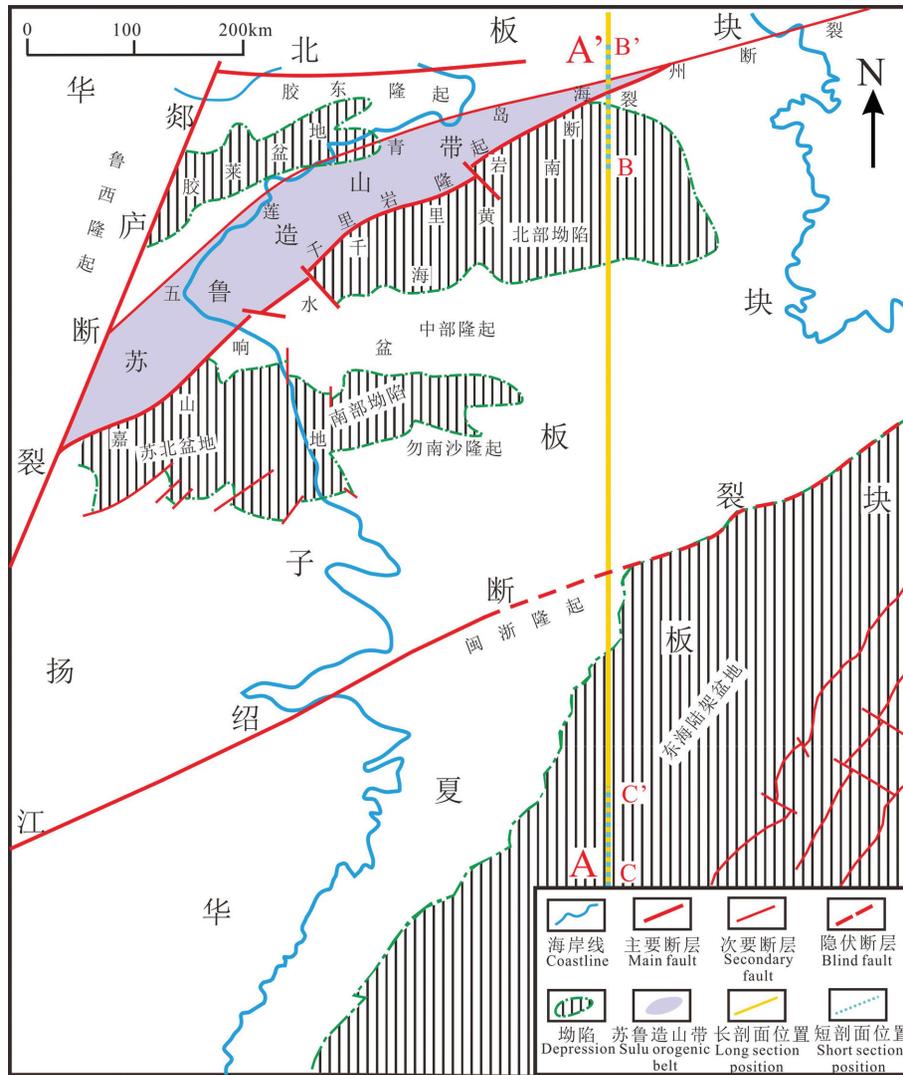


图1 中国东部海区及邻域构造纲要和大断面位置图

Fig.1 Tectonic map and large section location of eastern China's sea areas and adjacent areas

盖层自下而上依次发育侏罗系、白垩系、古近系、新近系,盆地纵向可以划分为侏罗—白垩纪断陷—坳陷和古近纪—新近纪断陷—坳陷两个旋回,以NEE向正断层为主(杨艳秋等,2012;王文娟等,2013)。

闽浙隆起位于南黄海盆地和东海陆架盆地之间,基底为前震旦系变质岩,其上发育震旦纪到早古生代的地层(杨艳秋等,2012)。加里东运动之后,原先发育的早古生代地层遭受抬升、褶皱以及浅变质(陈晓红等,2013),闽浙隆起逐渐形成,并长期处于隆起状态。印支期和燕山期,闽浙隆起火山岩发育。断层以NNE向及NE向的正断裂为主,少量NW向平移断裂。

南黄海盆地加持在闽浙隆起和苏鲁造山带之

间,是下扬子块体向海的延伸,具有褶皱和结晶双重基底(林珍等,2009,2013)。地层发育较为齐全,自下而上可以划分为上、中、下3个构造层,其中南华系—三叠系为下构造层,发育海相地台型沉积,白垩系—古近系为中构造层,发育陆相断陷盆地河湖相沉积,新近系—第四系为上构造层,发育陆相坳陷盆地河湖相沉积(侯方辉等,2012)。下构造层发育挤压构造,如逆冲断层、褶皱等,中构造层主要发育正断层,走向多为NEE向(王明健,等,2014)。

苏鲁造山带是分布在五莲—青岛—海州断裂和嘉山—响水—千里岩断裂之间,其性质是秦岭—大别造山带的一部分,中间为郯庐断裂所错断。基底埋藏较浅,由胶南地块和超高压变质带组成,主

表1 中国东部海区及邻区地层和密度统计(据陈晓红等,2013;侯方辉等,2012)

Table 1 Statistics of stratigraphy and density in eastern China's sea areas and adjacent areas(after Chen Xiaohong et al., Hou Fanghui et al., 2012)

| 地层 | 主要岩性 | | 构造层 | | 平均密度/(g/cm ³) | | | | | |
|------------------|-------------|-------------|------------------|------------------|---------------------------|-------|--------|------------------|------|------|
| | 东海盆地 | 南黄海盆地 | 东海盆地 | 南黄海盆地 | 东海盆地 | 南黄海盆地 | | | | |
| Q | 堆积层和疏松陆相碎屑岩 | 堆积层和疏松陆相碎屑岩 | N—Q | N—Q | 2.15 | 2.06 | | | | |
| N ₂ | | | | | 2.23 | 2.19 | | | | |
| N ₁ | | | | | 2.46 | 2.26 | | | | |
| E ₃ | 碎屑岩 | 碎屑岩 | E ₂₋₃ | E | 2.52 | 2.36 | | | | |
| E ₂ | | | | | | | | | | |
| E ₁ | | | | | | | | | | |
| K ₂ | 碎屑岩夹煤系地层 | 碎屑岩 | K ₂ | J—K | 2.53 | 2.38 | | | | |
| K ₁ | | | | | | | | | | |
| J ₃ | | | | | | | | | | |
| J ₂ | 碎屑岩夹煤系地层 | 碎屑岩 | J ₁₋₂ | J—K | 2.59 | 2.56 | | | | |
| J ₁ | | | | | | | | | | |
| T ₃ | | | | | | | | | | |
| T ₁₋₂ | 碎屑岩 | 海相碳酸盐岩 | ? | T ₁₋₂ | 2.64 | 2.64 | | | | |
| P ₂ | | | | | | | | | | |
| P ₁ | | | | | | | | | | |
| C | ? | 煤系地层为主 | ? | P ₂ | 2.62 | 2.68 | | | | |
| D | | | | | | | 海相碳酸盐岩 | C—P ₁ | 2.70 | 2.65 |
| S | | | | | | | | | | |
| O | | 海相碳酸盐岩为主 | | C—S | 2.71 | 2.47 | | | | |
| E | | | | | | | 2.73 | | | |
| Pt—Ar | | | | | | | | 变质岩 | 2.80 | 2.78 |
| 上地壳 | 2.88 | 2.86 | | | | | | | | |
| 下地壳 | | | 3.30 | 3.30 | | | | | | |

要发育太古宙—古元古代变质岩系及晚中生代的火成岩(李三忠等,2009;周建波等,2013)。盖层主要为新近系—第四系,以NEE向断层为主。

3 技术方法及反演结果

3.1 技术方法

研究过程中利用LCT软件,采用人机交互的模拟方法来进行反演。首先要对大剖面所在位置的区域地质背景进行调研,收集研究区以及邻区相应的地层岩性、厚度、地层界面、地层密度以及磁化率资料(陈晓红等,2013;侯方辉等,2012)(表1,表2),开展区内位场数据的综合分析,了解研究区的位场和物性分布特征,明确导致异常的可能地质因素;然后以地震解释剖面作为初始模型,将模型中的地层分为众多的块体,对每一个块体赋予相应的物性参数(密度、磁化率),然后进行人机交互计算模拟,期间需要不断地对比计算值和实测值,直到

表2 中国东部海区及邻区磁化率统计(据陈晓红等,2013;侯方辉等,2012)

Table 2 Statistics of magnetic susceptibility in eastern China's sea areas and adjacent areas(after Chen Xiaohong et al., Hou Fanghui et al., 2012)

| 岩类 | 岩性 | 磁化率/10 ⁻⁶ CGSM | |
|-----|---------|---------------------------|----------|
| | | 东海盆地 | 南黄海盆地 |
| 沉积岩 | 泥岩 | 6~167 | 0~450 |
| | 砂岩 | 6~462 | 0~2125 |
| | 玄武岩 | 1000~1350 | 115~2621 |
| 火山岩 | 火山角砾岩 | 28~1150 | 10~6740 |
| | 安山岩 | 6~1460 | 0~3500 |
| | 凝灰岩 | 20~243 | 40~560 |
| 侵入岩 | 花岗岩 | 14~1150 | 10~400 |
| | 闪长玢岩 | — | 0~1550 |
| | 石英二长岩 | — | 25~1150 |
| 变质岩 | 千枚岩 | — | 0~28 |
| | 黑云母角闪片岩 | — | 300~2550 |
| | 片麻岩 | 0~1160 | 0~1350 |

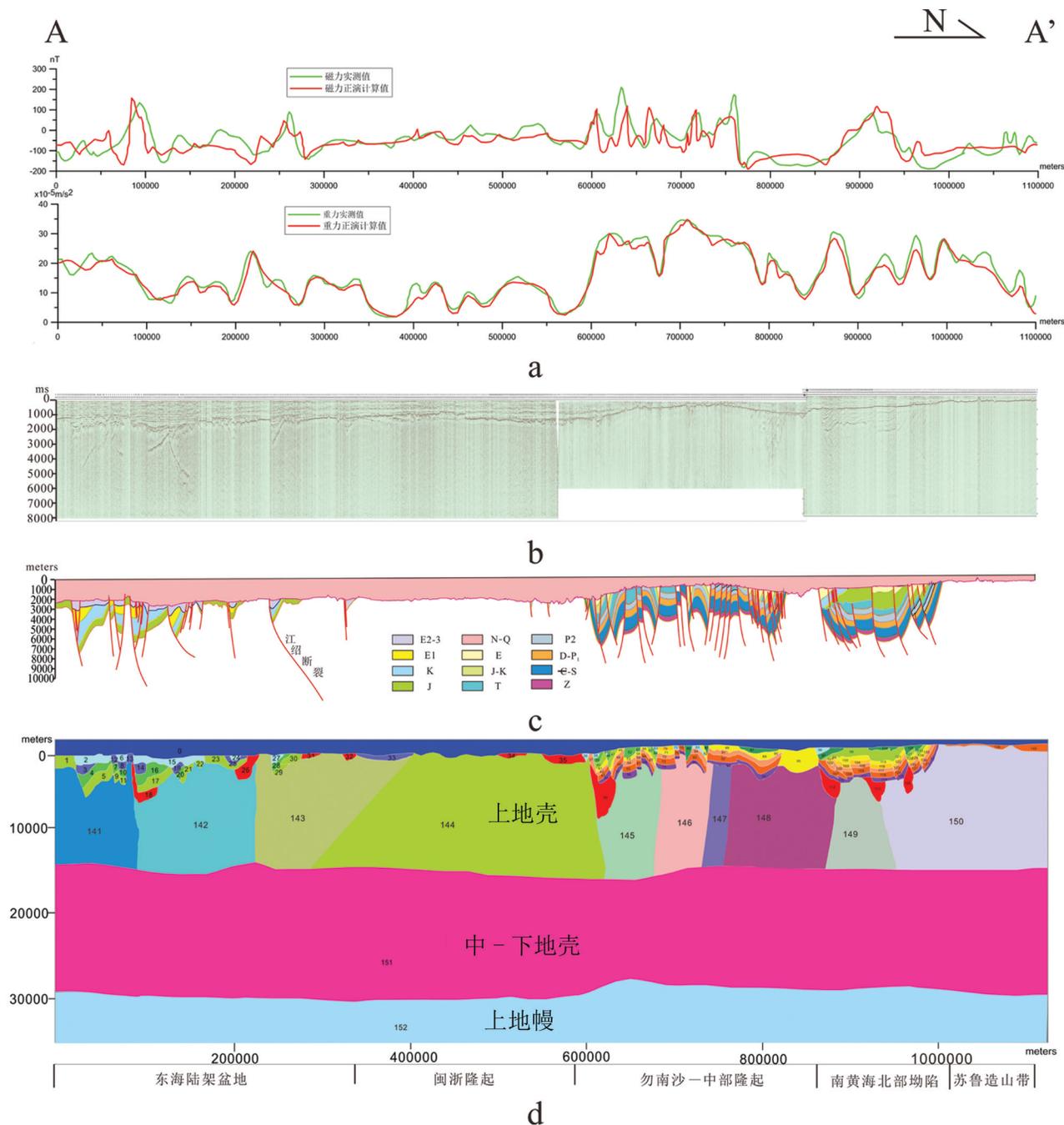


图2 AA'剖面地质地球物理综合反演解释结果(剖面位置见图1;重磁数据引自张洪涛等,2010)
Fig.2 Joint inversion and interpretation of gravity-magnetic-seismic survey in eastern China's sea areas
(section location shown in Fig. 1; after Zhang Hongtao et al., 2010)

拟合精度满足要求为止。反演过程中对于地震资料品质高,层位明确的界面不作改动,而地震资料品质差的地区则可以根据实际需要反复调整,直到重磁震三种资料的计算和解释结果相吻合且符合地质规律。

3.2 反演结果

本次研究累计反演岩体151块,并推断了上、中下地壳顶界面和莫霍面深度。反演过程分别根据东海陆架盆地和南黄海盆地的岩石物理特征进行分类分析。测线地质地球物理综合反演解释剖面

表3 岩体的密度和磁化率

Table 3 Statistics of rock density and susceptibility

| 编号 | 密度/(g/cm ³) | 磁化率/10 ⁻⁶ CGSM | 编号 | 密度/(g/cm ³) | 磁化率/10 ⁻⁶ CGSM | 编号 | 密度/(g/cm ³) | 磁化率/10 ⁻⁶ CGSM |
|----|-------------------------|---------------------------|-----|-------------------------|---------------------------|-----|-------------------------|---------------------------|
| 0 | 2.22 | 0 | 51 | 2.72 | 5056 | 102 | 2.55 | 100 |
| 1 | 2.45 | 0 | 52 | 2.49 | 53 | 103 | 2.56 | 0 |
| 2 | 2.45 | 0 | 53 | 2.5 | 106 | 104 | 2.64 | 0 |
| 3 | 2.65 | 0 | 54 | 2.6 | 0 | 105 | 2.6 | 0 |
| 4 | 2.66 | 1325 | 55 | 2.75 | 4056 | 106 | 2.6 | 211 |
| 5 | 2.72 | 4877 | 56 | 2.78 | 5049 | 107 | 2.7 | 0 |
| 6 | 2.4 | 0 | 57 | 2.4 | 0 | 108 | 2.45 | 502 |
| 7 | 2.6 | 0 | 58 | 2.5 | 0 | 109 | 2.65 | 500 |
| 8 | 2.64 | 20 | 59 | 2.6 | 0 | 110 | 2.78 | 0 |
| 9 | 2.75 | 2312 | 60 | 2.87 | 612 | 111 | 2.78 | 8112 |
| 10 | 2.7 | 0 | 61 | 2.7 | 0 | 112 | 2.89 | 2804 |
| 11 | 2.77 | 1872 | 62 | 2.78 | 5064 | 113 | 2.88 | 6088 |
| 12 | 2.5 | 129 | 63 | 2.31 | 209 | 114 | 2.35 | 0 |
| 13 | 2.3 | 1507 | 64 | 2.32 | 0 | 115 | 2.45 | 50 |
| 14 | 2.66 | 8563 | 65 | 2.37 | 0 | 116 | 2.5 | 100 |
| 15 | 2.53 | 0 | 66 | 2.4 | 0 | 117 | 2.65 | 220 |
| 16 | 2.57 | 0 | 67 | 2.6 | 0 | 118 | 2.7 | 512 |
| 17 | 2.7 | 0 | 68 | 2.62 | 2061 | 119 | 2.78 | 1054 |
| 18 | 2.75 | 9045 | 69 | 2.7 | 5097 | 120 | 2.4 | 0 |
| 19 | 2.67 | 0 | 70 | 2.4 | 56 | 121 | 2.5 | 0 |
| 20 | 2.72 | 0 | 71 | 2.5 | 107 | 122 | 2.59 | 0 |
| 21 | 2.78 | 0 | 72 | 2.65 | 203 | 123 | 2.67 | 0 |
| 22 | 2.4 | 211 | 73 | 2.76 | 511 | 124 | 2.62 | 0 |
| 23 | 2.47 | 0 | 74 | 2.78 | 9099 | 125 | 2.66 | 1066 |
| 24 | 2.3 | 156 | 75 | 2.5 | 0 | 126 | 2.89 | 2035 |
| 25 | 2.45 | 211 | 76 | 2.6 | 0 | 127 | 2.44 | 0 |
| 26 | 2.83 | 0 | 77 | 2.75 | 0 | 128 | 2.45 | 0 |
| 27 | 2.7 | 0 | 78 | 2.6 | 0 | 129 | 2.55 | 0 |
| 28 | 2.68 | 6603 | 79 | 2.75 | 4532 | 130 | 2.6 | 0 |
| 29 | 2.69 | 9007 | 80 | 2.6 | 4366 | 131 | 2.67 | 0 |
| 30 | 2.46 | 7812 | 81 | 2.4 | 0 | 132 | 2.71 | 0 |
| 31 | 2.85 | 0 | 82 | 2.5 | 55 | 133 | 2.44 | 0 |
| 32 | 2.85 | 0 | 83 | 2.5 | 100 | 134 | 2.45 | 0 |
| 33 | 2.41 | 0 | 84 | 2.55 | 200 | 135 | 2.44 | 0 |
| 34 | 2.85 | 2004 | 85 | 2.6 | 4545 | 136 | 2.51 | 0 |
| 35 | 2.4 | 2013 | 86 | 2.78 | 5069 | 137 | 2.67 | 0 |
| 36 | 2.45 | 7046 | 87 | 2.25 | 0 | 138 | 2.75 | 0 |
| 37 | 2.7 | 6052 | 88 | 2.35 | 0 | 139 | 2.51 | 2011 |
| 38 | 2.4 | 0 | 89 | 2.8 | 0 | 140 | 2.63 | 2512 |
| 39 | 2.45 | 0 | 90 | 2.35 | 0 | 141 | 2.72 | 2270 |
| 40 | 2.5 | 0 | 91 | 2.4 | 0 | 142 | 2.72 | 1800 |
| 41 | 2.54 | 307 | 92 | 2.5 | 0 | 143 | 2.7 | 2851 |
| 42 | 2.6 | 2609 | 93 | 2.65 | 9052 | 144 | 2.7 | 4820 |
| 43 | 2.72 | 3023 | 94 | 2.6 | 0 | 145 | 2.67 | 5130 |
| 44 | 2.72 | 4046 | 95 | 2.4 | 0 | 146 | 2.67 | 3400 |
| 45 | 2.4 | 0 | 96 | 2.3 | 50 | 147 | 2.7 | 3650 |
| 46 | 2.43 | 52 | 97 | 2.35 | 0 | 148 | 2.7 | 300 |
| 47 | 2.45 | 0 | 98 | 2.44 | 0 | 149 | 2.66 | 4059 |
| 48 | 2.47 | 506 | 99 | 2.45 | 51 | 150 | 2.66 | 0 |
| 49 | 2.6 | 4009 | 100 | 2.45 | 55 | 151 | 2.84 | 0 |
| 50 | 2.65 | 3813 | 101 | 2.45 | 58 | 152 | 3.3 | 0 |

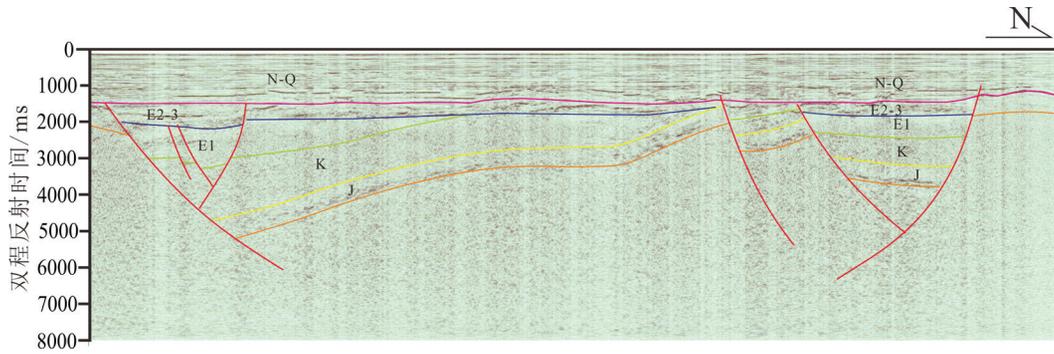


图3 东海陆架盆地CC'典型地震剖面(剖面位置见图1)

Fig.3 Typical seismic section in East China Sea shelf basin(section location shown in Fig. 1)

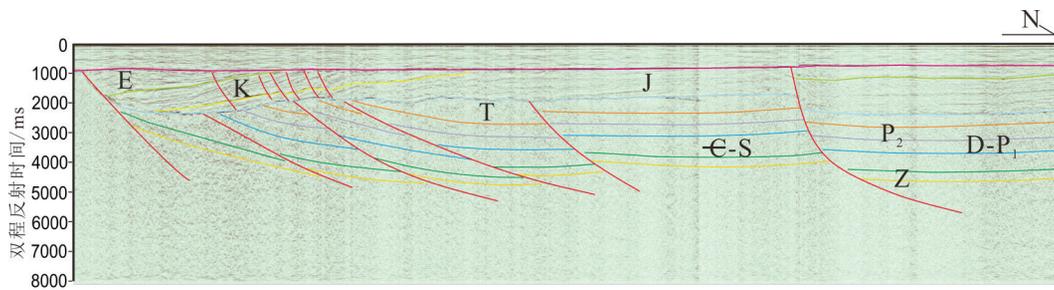


图4 南黄海盆地BB'典型地震剖面(剖面位置见图1)

Fig.4 Typical seismic section in south Yellow Sea Basin(section location shown in Fig. 1)

如图2所示,反演获得的每个岩块的密度和磁化率值见表3。

4 大断面综合地质解释

该条地学大断面横跨中国东部海区,本次研究将由南至北对大断面联合反演结果进行系统的地质-地球物理解释。

4.1 东海盆地

由南向北依次穿越鱼山凸起、钱塘凹陷、海礁凸起、浙闽隆起四个二级构造单元,地层沉积厚度较小。从地震剖面解释来看,东海陆架盆地自下而上发育下—中侏罗统、上白垩统、古新统、始新统一渐新统、新近系—第四系共5套构造层,其中侏罗系—古近系则主要发育张性正断层为主,新近系—第四系厚度稳定,断层不发育(图2b,图3)。根据反演结果,各地层密度分别为:第四系和新近系 2.22 g/m^3 、渐新世 $2.40\sim 2.53 \text{ g/m}^3$ 、始新世和古新世 $2.5\sim 2.67 \text{ g/m}^3$ 、白垩系 $2.57\sim 2.72 \text{ g/m}^3$ 、侏罗系在凹陷区和隆起区分别为 $2.70\sim 2.78 \text{ g/m}^3$ 和 $2.40\sim 2.47 \text{ g/m}^3$ 。

对东海地区岩石磁性统计分析发现该区沉积岩、酸性火成岩、中性火成岩、基性火成岩的磁性和剩余磁化强度逐级增强,岩石磁化强度方向受剩余磁化强度方向的影响也逐级增大(陈晓红等,2013)。在东海地区能引起磁异常的岩石主要为火成岩,花岗岩类岩石引起弱至中等强度磁异常,玄武岩引起中强磁异常,安山岩类岩石则引起磁异常曲线呈幅值变化剧烈的锯齿状,杂乱无章,无规律可循。该段重力异常和磁力异常均表现为跳跃异常(图2a),鱼山凸起西段呈高重力低磁力异常特征,推测基底应为变质岩;鱼山凸起东段重力异常减小,磁力异常快速增大,高达 200 nT ,推测该处存在基性火成岩(18号岩体),密度为 2.75 g/m^3 ,磁化率高达 $9045 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$;钱塘凹陷、海礁凸起及浙闽隆起处重磁异常呈异常跳跃,推测为基底中酸性火成岩所致(26、31、32号岩体)。总体来看,基岩性质变化较小(141和142号岩体),密度均为 2.72 g/m^3 ,磁化率分别为 $2270 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$ 和 $1800 \times 10^{-6} \text{ CGSM}$,分析认为基底应为浅变质岩和变质岩。东海陆架盆地地

壳厚度较为稳定,莫霍面埋深保持在28 km左右。

4.2 闽浙隆起

闽浙隆起在剖面上位于东海陆架盆地的北部(图2),主要发育新近系—第四系。该段重磁异常相对较小,且均存在幅度较小的局部异常跳跃(图2a)。推测该区基底存在中酸性火成岩(32、34、35号岩体),且该区基底(143和144号岩体)岩性稳定,推测基岩主要为变质岩。由反演结果可知,闽浙隆起莫霍面深度为30.2 km,变化相对较小。

4.3 南黄海盆地

大断面向北依次穿过南黄海北部盆地的勿南沙—中部隆起、北部拗陷。前人研究结果(林珍等,2009;骆迪等,2013;侯方辉等,2012)表明,南黄海盆地存在多个密度界面,但由于其界面密度差和埋藏深度的不同,所引起的重力场也强弱不同。新近系底界面平均密度差为-0.22 g/cm³。该界面密度差较大,埋深最浅,因此在重力异常上反映为明显。中生界底界面密度差达-0.23 g/cm³,且界面起伏大,埋深较浅,是本区局部重力异常最主要的成因。前志留系顶界面密度差为-0.07 g/cm³,局部埋藏较深、起伏变化较大,所引起的重力异常比较微弱。上地壳顶界面密度差为0.12 g/cm³,莫霍面界面密度差为0.46 g/cm³,虽然这两个界面埋藏很深,但由于具有很大的界面密度差和埋深变化,引起重力场的变化幅度仍然是可观的。

前期研究成果(陈晓红等,2013;侯方辉等,2012)表明,南黄海盆地新生界、中生界、古生界等沉积岩系均为非磁性岩层;前震旦纪云台组及锦屏山组的各种片岩、大理岩及片麻岩磁性微弱,但当变质加深或局部混合岩化以及含有磁铁矿时,则磁化率值随即增大,可达750×10⁻⁶ CGSM;前震旦系下部胸山组各种片岩、片麻岩及混合岩,为弱—中等磁性岩层,能够引起明显的磁场变化;新生代玄武岩、辉绿岩磁性变化范围很大,为70×10⁻⁶~2670×10⁻⁶ CGSM。其中气孔状玄武岩和辉绿岩磁性较强,而无气孔玄武岩磁性较弱;晚侏罗世火山岩磁性较强,以中性安山岩类为主,其变化范围很大。夹于新生界沉积岩系中的不规则的玄武岩,不仅具有不同的磁场特征,而且在磁场背景上能够引起显著的次级变化,对基岩磁场造成很强的干扰;侏罗纪火山岩具一定磁性,它可在不同磁场背景上显示出弱磁性界面的存在。

从地震剖面解释(图2c,图4)来看,南黄海盆地自下而上发育震旦系、寒武—志留系、泥盆—下二叠统、上二叠统、下三叠统、侏罗—白垩系、古近系以及新近系—第四系8套构造层,其中震旦系—下三叠统属于海相构造层,以挤压构造、逆冲断层为特征,而侏罗系—古近系则主要发育张性正断层为主,新近系—第四系厚度稳定,断层不发育(图2c,图4)。整个盆地区次级断裂比较发育,断层控制南

表4 中国东部海域及相邻陆域综合地层分区方案

Table 4 Comprehensive stratigraphic regionalization scheme for eastern China's sea areas and adjacent land areas

| 构造分区 | | 地层分区 | | |
|---------|-----------|-------------|---------------|--------------|
| 一级 | 二级 | 一级 | 二级 | 三级 |
| | | | | 燕辽地层分区 |
| | | | | 华北平原地层分区(渤海) |
| | 华北—狼林陆块 | | 华北—狼林地层区(I) | 鲁西地层分区 |
| | | | | 鲁东地层分区 |
| | | 欧 | | 辽东地层分区(北黄海) |
| 欧 | | 亚 | | 狼林地层分区 |
| 亚 | | 地 | | 苏鲁地层分区 |
| 板 | 苏鲁—临津江造山带 | 层 | 秦—祁—昆地层区(II) | 临津江地层分区 |
| 块 | | 大 | | 下扬子地层分区(南黄海) |
| | 扬子—京畿陆块 | 区 | 扬子—京畿地层区(III) | 京畿地层分区 |
| | | | | 江绍地层分区 |
| | 江绍断裂带 | | 江绍地层区(IV) | 东南沿海地层分区 |
| | 华夏褶皱带 | | 华夏地层区(V) | 东海陆架地层分区 |
| 东亚洋陆汇聚带 | 琉球洋陆汇聚带 | 东亚洋陆汇聚带地层大区 | 琉球地层区(VI) | 琉球地层分区 |

黄海地层南部边界,倾向为北西向。反演结果显示重力值在整个南黄海盆地整体表现为高值,勿南沙—中部隆起最高,且磁力异常变化剧烈。中部隆起区磁力异常突然降低,且达到测线最低值,推测由基底磁性变化引起。总体来看,该段测线基底密度较为稳定,但是磁性变化明显。重力异常曲线的起伏与前中生界基底的形态有对应关系,中部隆起前中生界基底埋藏较浅,重力异常曲线为高值区。中、新生界陆相沉积是充填在盆地内的砂泥质沉积物,其岩石密度相对较小,新近系和第四系密度为 2.22 g/cm³,反演的古近系密度为 2.33~2.50 g/cm³。南部拗陷白垩系密度为 2.25~2.60 g/cm³,北部拗陷白垩系密度为 2.35~2.40 g/cm³;南部拗陷三叠系密度为 2.37~2.58 g/cm³,北部拗陷三叠系密度为 2.44 g/cm³左右;中生界密度为 2.45~2.68 g/cm³,震旦系密度为 2.61~2.78 g/cm³。火成岩体密度较大 2.75~2.89 g/cm³,磁化率为 2000×10⁻⁶~7000×10⁻⁶ CGSM。勿南沙隆起区莫霍面抬升明显(由 30 km 抬升为 25 km),地幔上涌,同时浅部遭受拉张作用,发育了一些正断层和火成岩(60号岩体);北部拗陷莫霍面略有抬升(由 28 km 抬升为 26 km),与勿南沙隆起区相比,抬升幅度较小,浅部发育了一些正断层和火成岩体(112、113 和 126号岩体)。

4.4 苏鲁—千里岩造山带

大断面的最北端经过苏鲁—千里岩造山带。重磁震反演结果显示重力和磁力曲线呈现跳跃异常(图 2a),解释为该区基底为中酸性火成岩(139 和 140号岩体)。该段剖面莫霍面埋深稍微变大,约为 30 km(图 2)。

5 综合地层分区

在中国大地构造一级单元划分的框架下,以该条地学断面综合解释作为约束,开展了中国东部海域综合地层分区,将研究区和相邻陆域划分为 2 个地层大区(一级),6 个地层区(二级)和 14 个地层分区(三级)(王明健,2020)(图 5,表 4)。

中国东部海域的中新生代地层主要赋存于各个沉积盆地当中,归属于相应的 3 级地层分区。渤海海域主体位于华北平原分区,北黄海海域主要分布在辽东地层分区,南黄海海域主要属于下扬子地层分区,而东海和冲绳海槽海域主要位于东海陆架

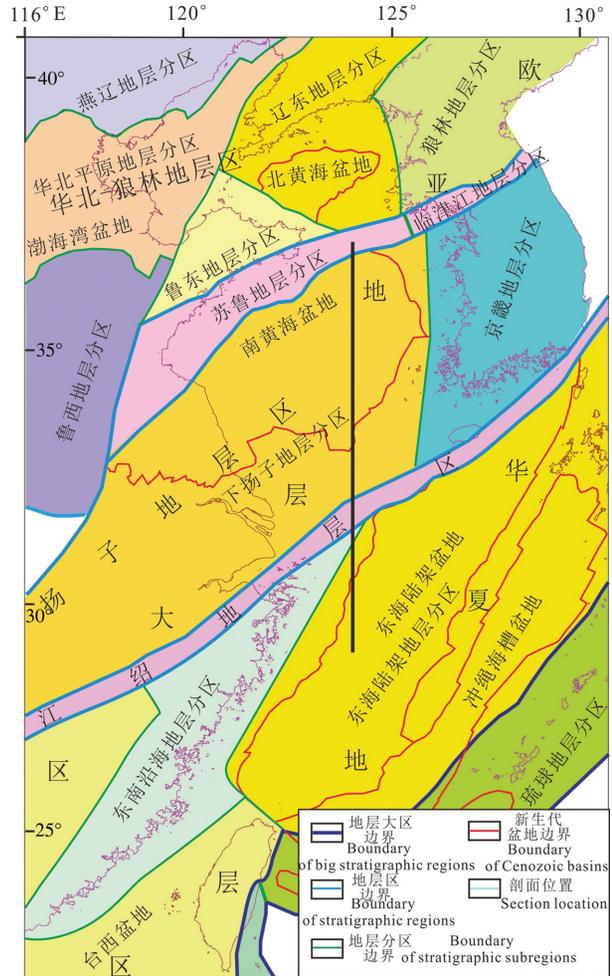


图 5 中国东部海域及邻域综合分区图
Fig.5 Comprehensive regionalization map of eastern China's sea areas and adjacent land areas

分区。上述综合地层分区方案完整覆盖整个中国东部海域及邻域,整体上反映了不同单元的沉积特征和构造属性,从沉积地层的角度揭示了东亚大陆边缘中新世代的构造格局与演化特征。

6 油气资源效应

随着中国经济的快速发展,对于油气资源的需求也越来越大,但是中国目前各个油田中浅层的探明程度已经很高。在这种情况下,向深部地层出发,寻找后备油气资源,是缓解中国油气资源短缺的一个有效途径。通过对中国东部海区各沉积盆地中生界油气赋存规律的综合剖析与总结,突出新区、新层系的找矿思路,对中国海域深部地层油气资源前景及勘探方向进行了分析与预测。

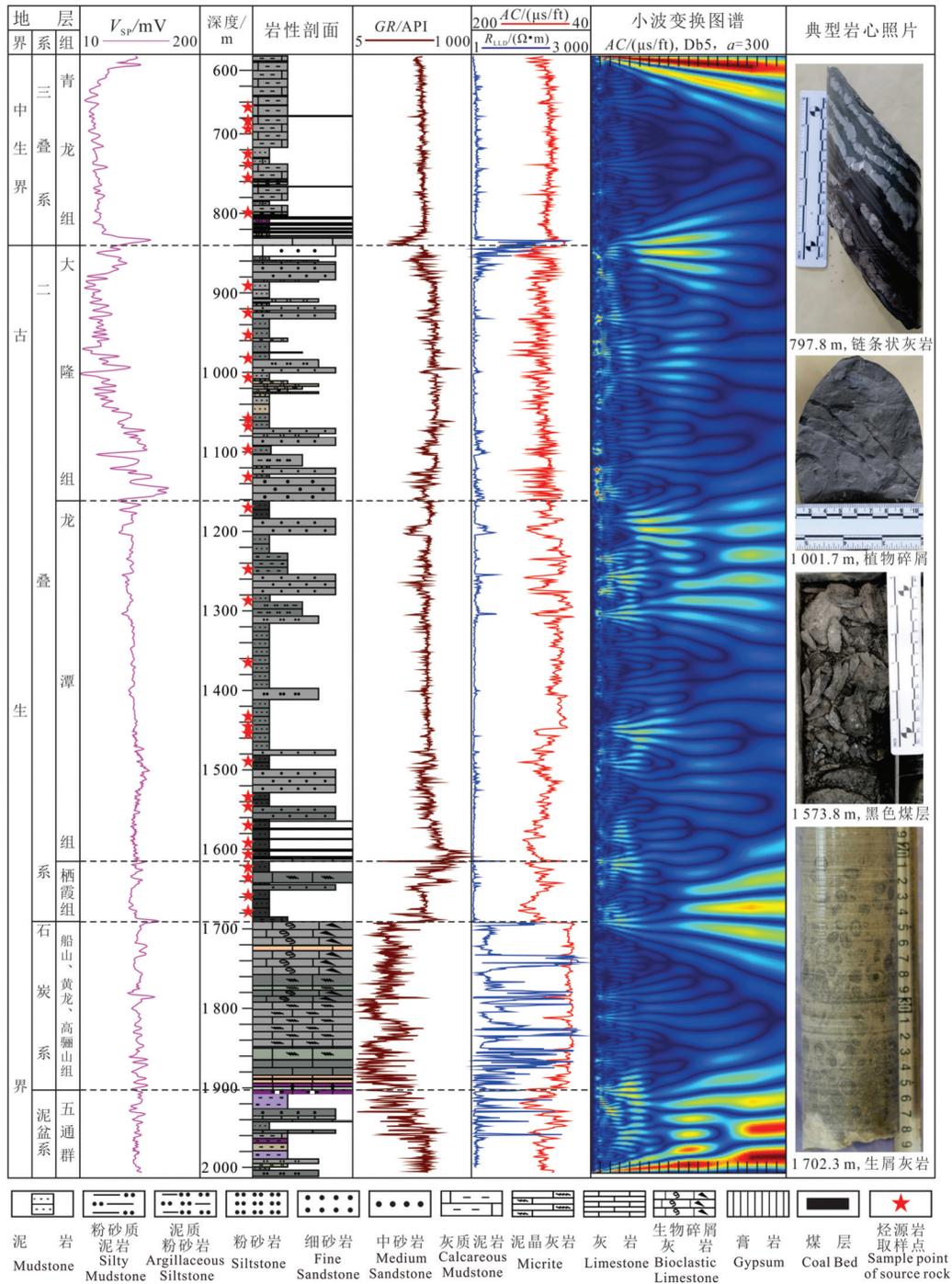


图6 南黄海CSDP-2钻井地层综合柱状图(据蔡来星等,2017)

Fig.6 Stratigraphic columnar section of CSDP-2 well in the central uplift of south Yellow Sea(after Cai Laixing et al. 2017)

6.1 南黄海盆地

大断面地层结构研究揭示,南黄海盆地震旦系一下三叠统海相地层广泛发育,厚度大且稳定。重磁、地震资料和钻井资料揭示南黄海盆地发育完整的中古生界海相地层(图6),厚度一般分布在5000~

8000 m。总体来看,南黄海盆地下寒武统幕府山组盆地相暗色泥岩以及上二叠统龙潭一大隆组海陆交互相泥岩和煤层非常发育,具备形成大型油气田的物质基础。而中部隆起自印支期以来所遭受的构造活动相对较弱,是下扬子最大的稳定区块(王

明健, 2014, 2018), 因此是寻找中生界油气藏的有利远景区。

6.2 东海陆架盆地

东海陆架盆地发育侏罗纪以来的地层, 侏罗系主要发育在雁荡低凸起以东地区, 白垩系在整个盆地广泛发育, 中生界厚度分布在 1000~7000 m。其中东海陆架盆地南部中生界厚度大, 分布广, 岩浆活动较弱, 区内基隆凹陷和台北转折带—中侏罗统暗色泥岩和煤系地层非常发育, 有机质丰度高。中生代烃源岩生成的油气可以向西侧构造高部位运移成藏, 因此东海陆架盆地南部中生界具备形成大型油气田的地质条件(肖国林, 2019; 王明健, 2019; Wang, 2019)。

通过对中生界油气成藏条件进行综合分析, 圈定出南黄海盆地中部隆起海相中—古生界、东海陆架盆地南部中生界等 2 个中—古生界“深层”油气远景区, 为中国油气资源调查的战略部署和选区提供了优选方向。

7 结 论

(1) 地学大断面自南而北横穿东海陆架盆地、闽浙隆起、南黄海盆地勿南沙—中部隆起、苏鲁造山带。以该断面综合解释为约束, 将中国东部海域地层划分为 2 个地层大区(一级), 6 个地层区(二级)和 14 个地层分区(三级)。

(2) 深部构造活动控制浅部的变形特征: 自东海陆架盆地至苏鲁造山带莫霍面表现较为平缓, 深度一般在 30 km 左右, 仅在勿南沙—中部隆起处上地幔略有抬高, 莫霍面深度约在 28 km, 总体上南部东海陆架盆地地区莫霍面埋深要深于北部南黄海盆地—苏鲁造山带; 中下地壳厚度较为稳定, 仅在勿南沙—中部隆起处厚度较薄, 厚度约 12 km; 上地壳略有起伏, 一般为 15 km 左右。

(3) 地学大断面揭示, 南黄海海域中、古生代海相地层极为发育, 东海海域南部存在厚层中生界。巨厚的中—古生代地层为油气资源的形成与赋存提供了丰富的物质基础。

References

Cai Laixing, Wang Jiao, Guo Xingwei, Xiao Guolin, Zhu Xiaoping. 2017. Characteristics of sedimentary facies and source rocks of Mesozoic—Paleozoic in central uplift of South Yellow Sea: A case

- study of CSDP-2 coring well[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 47(4):1030-1046(in Chinese with English abstract).
- Chen Xiaohong, Liu Zhan, Zhang Zhixun, Yang Huiliang, Hou Fanghui. 2013. Deducing the East China Sea shelf basin jointing gravity and seismic data[J]. Progress in Geophys., 28 (3): 1596-1061(in Chinese with English abstract).
- Hou Fanghui, Tian Zhenxing, Zhang Xunhua, Zhang Zhixun, Li Sanzhong. 2012. Joint inversion of gravity, magnetic and seismic data of the South Yellow Sea Basin[J]. Oil Geophysical Prospecting, 47(5): 808-814(in Chinese with English abstract).
- Li Sanzhong, Liu Xin, Suo Yanhui, Liu Liping, Qian Cunchao. 2009. Triassic folding and thrusting in the Eastern Block of the North China Craton and the Dabie-Sulu orogen and its geodynamics[J]. Acta Petrologica Sinica, 25 (9): 2031-2049(in Chinese with English abstract).
- Lin Zhen, Yao Yongjian. 2009. Gravity-magnetic-seismic inversion and integrated interpretation of a typical section in South Yellow Sea[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 33 (4): 361-373 (in Chinese with English abstract).
- Lin Zhen, Zhang Li, Zhong Guangjian. 2013. The application of gravity magnetic seismic joint inversion to the comprehensive interpretation of geophysics in the northern south China sea[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 37 (6): 968-975(in Chinese with English abstract).
- Luo Di, Zhang Xunhua, Cai Feng, Liu Zhan, Zhang Zhixun, Hou Fanghui, Du Runlin, Wei Long. 2013. Integrated gravity-magnetic-seismic data inversion and interpretation and their application to underwater tectonics[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 37 (6): 968-975(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingjian, Chen Xi, Lei Baohua, Zhu Xiaoping. 2018. Current status and problems of oil and gas exploration in south yellow sea basin [J]. Marine Geology Frontiers, 34(11): 20-25(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingjian, Xiao Guolin, Yang Changqing. 2019. Characteristics and evaluation of Mesozoic source rocks in the southeastern East China Sea continental shelf[J]. China Geology, (2):133-141.
- Wang Mingjian, Xiao Guolin, Zhang Yong, Yang Yanqiu, Yang Changqing. 2019. Cretaceous hydrocarbon accumulation conditions in the southeastern East China Sea Shelf Basin [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 39(6):169-176(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingjian, Xu Yang, Zhang Yong, Huang Long. 2020. Integrated stratigraphic regionalization of eastern China sea areas and adjacent land and their characteristics[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 40(2): 1-9(in Chinese with English abstract).
- Wang Mingjian, Zhang Xunhua, Wang Anguo. 2014. Quantative prediction of listric normal fault geometry and its application-taking southern depression of South Yellow Sea Basin for

- example[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 38(2): 1-8 (in Chinese with English abstract).
- Wang Mingjian, Zhang Xunhua, Xiao Guolin. 2014. Tectonic evolution and hydrocarbon accumulation since Triassic of the Southern Depression in South Yellow Sea Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 25(7): 991-998(in Chinese with English abstract).
- Wang Wenjuan, Li Gang, Yang Changqing, Yang Chuansheng. 2013. Characteristics of seismic sequences in the east China Sea shelf Basin and their geological attributes[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 33 (3):117- 122(in Chinese with English abstract).
- Xiao Guolin, Wang Mingjian, Yang Changqing. 2019. Numerical simulation of Mesozoic hydrocarbon generation, migration and accumulation in the southern East China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 39(6): 138- 149(in Chinese with English abstract).
- Yang Yanqiu, Yang Changqing, Li Gang, Gong Jianming. 2012. Structural styles and their distribution pattern in the southern East China Sea shelf Basin[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 32(3): 113-118(in Chinese with English abstract).
- Yu Peng, Wang Jialin, Wu Jiansheng, Yang Hui. 2006. Review and discussions on geophysical joint inversion[J]. PEG, 29(2): 87-93 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Hongtao, Zhang Xunhua, Wen Zhenhe, Lan Xianhong. 2008. Geologic-Geophysic Series Maps of East China Seas with A Scale of 1:1000000[M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- Zhang Xunhua. 2008. Tectonic Geology in China Seas[M]. Beijing: China Ocean Press(in Chinese).
- Zhou Jianbo, Zeng Weishun, Cao Jialin, Han Jie. 2013. The tectonic framework and evolution of the Sulu Orogen: evidence from the low-grade metamorphic rocks in the Sulu UHP belt[J]. Chinese Science Bulletin, 58(23):2338-2343(in Chinese).
- 侯方辉,田振兴,张训华,张志珣,李三忠. 2012. 南黄海盆地两条地震剖面的重磁数据联合反演效果[J]. 47(5):808-814.
- 李三忠,刘鑫,索艳慧,刘丽萍,钱存超. 2009. 华北克拉通东部地块和大别-苏鲁造山带印支期褶皱-逆冲构造与动力学背景. 岩石学报,25(9):2031-2049.
- 林珍,姚永坚. 2009. 南黄海某典型剖面重磁震联合反演及综合解释[J]. 物探与化探, 33(4):361-373.
- 林珍,张莉,钟广见. 2013. 重磁震联合反演在南海东北部地球物理解释中的应用[J]. 物探与化探,37(6):968-975.
- 骆迪,张训华,蔡峰,刘展,张志珣,侯方辉,杜润林,魏龙. 2013. 重磁震联合反演及综合解释在海域构造解释中的应用[J]. 海洋地质与第四纪地质,37(6):968-975.
- 王明健,陈晔,雷宝华,朱晓青. 2018. 南黄海盆地油气勘探现状及存在问题[J]. 海洋地质前沿, 34(11): 20-25.
- 王明健,肖国林,张勇,杨艳秋,杨长清. 2019. 东海陆架盆地东南部白垩系油气成藏条件[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(6): 169-176.
- 王明健,徐扬,张勇,黄龙. 2020. 中国东部海域及相邻陆域综合地层分区及地层发育特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 40(2): 1-9.
- 王明健,张训华,肖国林. 2014. 南黄海盆地南部坳陷三叠纪以来的构造演化与油气成藏[J]. 天然气地球科学, 25(7): 991-998.
- 王明健,张训华,王安国. 2014. 铲式正断层几何形态的定量预测及其在南黄海盆地南部坳陷的应用[J]. 东北石油大学学报,38(2): 1-8.
- 王文娟,李刚,杨长清,杨传胜. 2013. 东海陆架盆地地震层序特征及地质属性[J]. 海洋地质与第四纪地质,33(3):117-122.
- 肖国林,王明健,杨长清. 2019. 东海南部中生界烃类生成、运聚与成藏数值模拟[J]. 海洋地质与第四纪地质, 39(6): 138-149.
- 杨艳秋,杨长清,李刚,龚建明. 2012. 东海陆架盆地南部构造样式及分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质,32(3):113-118.
- 于鹏,王家林,吴健生,杨辉. 2006. 地球物理联合反演的研究现状和分析[J]. 勘探地球物理进展,29(2):87-93.
- 张洪涛,张训华,温珍河,蓝先洪. 2010. 中国东部海区及邻域地质地球物理系列图(1:100万)[M]. 北京:海洋出版社.
- 张训华. 2008. 中国海域构造地质学[M]. 北京:海洋出版社.
- 周建波,曾维顺,曹嘉麟,韩杰. 2013. 苏鲁造山带的构造格局与演化:来自苏鲁超高压带浅变质岩的制约[J]. 科学通报, 58(23): 2338-2343.

附中文参考文献

- 蔡来星,王蛟,郭兴伟,肖国林,朱晓青. 南黄海中部隆起中-古生界沉积相及烃源岩特征——以CSDP-2井为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2017,47(4):1030-1046.
- 陈晓红,刘展,张志珣,杨慧良,侯方辉. 2013. 东海陆架盆地重震联合解释推断研究[J]. 地球物理学进展,28(3):1596-1061.