

黄 松,郝天珧,徐 亚等.南黄海残留盆地宏观分布特征研究.地球物理学报,2010,53(6):1344~1353,DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.013

Huang S, Hao T Y, Xu Y, et al. Study on macro distribution of residual basin of South Yellow Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2010, 53(6):1344~1353, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733, 2010.06.013

南黄海残留盆地宏观分布特征研究

黄 松¹,郝天珧¹,徐 亚¹,王贝贝²

1 中国科学院地质与地球物理研究所,中国科学院油气资源研究重点实验室,北京 100029

2 中海石油(中国)有限公司北京研究中心,北京 100027

摘 要 由于前新生代残留盆地具有埋深大、构造复杂的特点,采用综合地球物理研究方法成为圈划残留盆地宏观分布及预测残留盆地油气资源的重要方法技术.本文以南黄海地区为例,以重、磁数据为主体,以钻井、地震等高精度数据为先验信息做约束,采用带约束界面反演方法求取重力基底,同时根据求取的磁性基底计算了中、古生界的残余厚度,给出了前新生代残留盆地宏观分布特征.结合石油地质条件,圈划了油气资源有利区.研究结果表明南黄海北部拗陷北部和东北部中生界残余厚度较大,中部隆起与勿南沙隆起古生界残余厚度巨大,是较好的前新生代油气前景区.

关键词 南黄海,残留盆地,前新生代,综合地球物理方法

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2010.06.013

中图分类号 P738,P541

收稿日期 2010-01-06,2010-05-21 收修定稿

Study on macro distribution of residual basin of South Yellow Sea

HUANG Song¹,HAO Tian-Yao¹,XU Ya¹,WANG Bei-Bei²

1 Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2 China National Offshore Oil Corporation Limited Research Center, Beijing 100027, China

Abstract Because of the features with great depth and complex structure for Pre-Cenozoic residual sedimentary basins, integrated geophysical methods are usually used to define macro spatial distribution and petroleum resources of residual basins as an effective way. Basing on gravity and magnetic data, we calculate the gravity basement using constraint inversion method and the magnetic basement of South Yellow Sea with constraint of well and seismic resources. The distribution of Pre-Cenozoic residual basins in South Yellow Sea has been obtained with the calculated residual thickness of Mesozoic and Palaeozoic groups. Some favorable areas of the Pre-Cenozoic are defined through combining the residual thickness and geological conditions for oil and gas accumulation. The results show that the north and northeast part of northern depression have great residual thickness of Mesozoic group, and the middle uplift and Wunansha uplift have great residual thickness of Palaeozoic group. These areas have Pre-Cenozoic petroleum potential.

Keywords South Yellow Sea, Residual basin, Pre-Cenozoic, Integrated geophysical methods

基金项目 国家自然科学基金重大研究计划项目(90814011),国家自然科学基金面上基金(40620140435,40674046,40804016),国家高技术研究发展计划(863)(2006AA09Z359)联合资助.

作者简介 黄 松,男,1981年生,在读博士,从事综合地球物理油气资源勘查研究. E-mail: huangsong81@gmail.com

* **通讯作者** 郝天珧,女,1957年生,研究员,主要从事海、陆油气盆地综合地球物理研究. E-mail: tyhao@mail.igcas.ac.cn

1 引言

随着我国新生代盆地油气勘探逐渐转入中、晚期,埋藏在新生界之下的前新生代残留盆地油气资源越来越多地受到人们的关注.1997年,刘光鼎^[1]提出中国油气资源“二次创业”的观点,指出前新生代海相残留盆地油气资源勘探应成为新的勘探领域和新的新技术生长点,为中国油气资源可持续发展指明了新的方向^[2].近年来我国南方等地区海相油气取得的重大突破^[3],证实了前新生代残留盆地油气资源的巨大潜力.但由于前新生代海相残留盆地一般具有埋藏深度大、演化历史长、构造复杂的特点,其勘探思路与新生代陆相盆地则差异较大^[4,5].同时,这些特点致使残留盆地的油气勘探面临诸多难题,如宏观构造规律、前新生界残余厚度以及基底分布情况认识模糊、海相储层分布规律性差、难以识别与预测^[6,7]等,使前新生代残留盆地的研究增加了难度.因此,必须开拓新的思路,寻求针对性和适用性强的方法技术.

南黄海是我国惟一没有油气突破的海区.该区是扬子块体在郯庐断裂带以东的延伸,在前震旦纪结晶基底之上沉积了逾万米的古生代和中、新生代地层,具有多种构造类型、多生烃层系的油气生储条件^[8~12],虽然经过了多年的勘探,但该海域的油气勘探始终未获重要突破.近年来一些研究^[13~15]认为南黄海油气勘探没有重要突破的一个原因是只重视新生界而忽视了中、古生界可能生油气的层系.因此,迫切需要针对南黄海前新生界残留盆地的研究.但该区由于多次构造变动,地质构造复杂,断层、扭曲和褶皱发育^[16],残留盆地埋深大,中、深层的地震成像不清晰^[17],仅仅依靠地震技术已无法达到勾绘残留盆地宏观格架及盆地基底结构的目的.针对这一问题,本文探索从重、磁数据出发,以岩石物性资料为基础,以钻井和地震资料为先验约束信息,采用正演和带约束反演技术为途径的综合地球物理方法,圈划南黄海残留盆地宏观格架和前新生界残余厚度分布.并在此基础上,初步推测了南黄海残留盆地油气前景.

2 研究方法

文献^[18]介绍了残留盆地宏观分布和残余厚度提取研究的指导思想及方法,该技术流程强调了岩

石物理性质分析和地质-地球物理模型的建立,应用Parker-Oldenburg反演方法求取了相应的重磁基底,获得了渤海的残留盆地分布.实际应用中,能否获得合理结果的关键在于较为准确地获取研究区目标层的重、磁异常以及精确的物性界面反演.将钻井和地震资料等高精度数据应用于获取目标层重磁效应,显然能提高位场分离的准确性.此外,在物性界面反演环节充分应用这些约束信息,则对减少多解性以及获得合理地质认识有明显作用.因此,本文在该技术流程的界面反演环节加以改进,采用了带约束反演方法.

2.1 残留盆地位场分离

针对残留盆地的特点,建立如图1所示的地球物理模型,一般可以将模型分为浅部构造层、残留盆地分布层及深部构造层三个部分.由于重、磁异常是地下深、浅层界面与地质体的总体反映,而残留盆地的研究目标是前新生界地层,为了得到目标层的重、磁异常就需要剥离掉浅部新生界和深部构造层引发的重、磁效应.在获得目标层的重、磁异常后,通过反演计算就可得到前新生代残留盆地的深部界面分布,进而求取残留盆地的残余厚度.

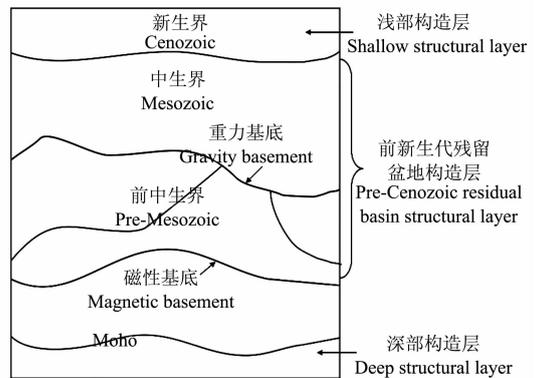


图1 残留盆地地球物理模型(据文献^[18],有修改)

Fig. 1 Geophysical model of residual basin
(after Ref. [18], revised)

为了获得浅部构造层信息,需要利用钻井以及地震勘探资料,结合研究区的地层密度特征进行正演可以获得浅部地层引起的重力效应.重力效应的正演有多种方法^[19],如体元法利用不同的长方体组合模拟计算地层密度界面的起伏,将所有场源范围内的长方体异常叠加计算可以得到总异常.深部构造层的重力效应在有深地震测深资料的情况下也可以采用正演方法获得,在条件不成熟的地区则可采用滤波、小波分析等方法求取.

磁异常一般可分解为由磁性基底引起的区域磁

异常和浅层磁性体(如火成岩等)引起的局部磁异常之和。浅层磁性体引起的异常难以通过正演途径获得,其异常特征一般表现为变化比较剧烈,具有高频特征,而区域磁异常变化平缓,具有低频特征^[20]。根据磁异常特征的这种差异,通过滤波、延拓以及小波变换等方法可以消除浅部磁性体引起的磁异常,分离出反映磁性基底的区域磁异常。

2.2 小波多尺度分析

重磁异常分离的常用方法有解析延拓、频率域滤波、求导、分量转换等,这些方法虽然很通用但是针对某些特定地质界面提取问题,特别是针对残留盆地时异常分离会受到一些限制。以小波变换作为重磁异常分解的工具,在国内外已经得到广泛的应用^[21~27],可以作为位场资料处理和解释的有效途径。

基于多尺度分析的理论,Mallat^[21]提出了一个塔式分解算法,设 $\{V_j\}$ 是一给定的多尺度分析,对于某个 $J_1 \in \mathbb{Z}$,对于某一整数, $J_2 > J_1$,函数 $f(x) \in V_{J_1}$,于是,有以下分解:

$$\begin{aligned} f(x) &= A_{J_1} f(x) = A_{J_1+1} f(x) + D_{J_1+1} f(x) \\ &= A_{J_1+2} f(x) + D_{J_1+2} f(x) + D_{J_1+1} f(x) \\ &= A_{J_2} f(x) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} D_j f(x), \end{aligned} \quad (1)$$

称 $A_j f(x)$ 为 $f(x)$ 在尺度 2^j 分辨下的连续逼近, $D_j f(x)$ 为 $f(x)$ 在尺度 2^j 分辨下的连续细节。

对于二阶情况,假设 $\{V_j^2\}$ 是一个二维多尺度分析,其中 $V_j^2 = V_j \otimes V_j$,对于某一整数, $J_2 > J_1$,二维函数 $f(x, y) \in V_{J_1}^2$,如果令 $J_2 = 4$ 由小波多尺度分解方法原理

$$\begin{aligned} f(x, y) &= A_{J_1} f(x, y) = A_{J_1+1} f(x, y) + \sum_{\epsilon=1}^3 D_{J_1+1}^\epsilon f(x, y) \\ &= A_{J_2} f(x, y) + \sum_{j=J_1+1}^{J_2} \sum_{\epsilon=1}^3 D_j^\epsilon f(x, y). \end{aligned} \quad (2)$$

对于二维重力异常 $\Delta g(x, y)$ 则有

$$\begin{aligned} \Delta g(x, y) &= A_4 f(x, y) + \sum_{\epsilon=1}^3 D_4^\epsilon f(x, y) + \sum_{\epsilon=1}^3 D_3^\epsilon f(x, y) \\ &\quad + \sum_{\epsilon=1}^3 D_2^\epsilon f(x, y) + \sum_{\epsilon=1}^3 D_1^\epsilon f(x, y). \end{aligned} \quad (3)$$

上式表明一个二维重力异常可以表达为一个四阶逼近 $A_4 f$ 及一阶、二阶、三阶和四阶四个细节 ($D_1 f, D_2 f, D_3 f, D_4 f$) 所构成。显然,可以类推至更多阶的细节和逼近。

利用小波多尺度分析方法,可以将位场异常分

解到不同尺度空间中。对重磁场而言,正交小波变换可以实现高频细节和低频逼近之和等于原始信号,根据地质目标来组合小波细节,选择合适的高阶逼近,可以实现有地质意义的分解。

2.3 界面反演

对于界面反演问题,常规的反演方法一般通过对比反演结果与已知信息来选择合理的解释结果,若在界面反演中增加已知控制点信息,则可以降低反演的不稳定性,同时提高反演的准确度。林振民等^[28]在进行 2D 单界面反演问题的讨论中,利用已知深度点的重力异常及正演计算值对 2D 剖面整体的计算残差进行估计,使用了线性近似关系计算深度改进量,在正演过程及残差计算中使用了已知深度点的约束信息。汪汉胜等^[29]提出了深部大尺度单一密度界面重力异常迭代反演方法,通过球谐展开,得到重力异常的级数展开式,并推导出积分形式的反演迭代解,将已知控制点的深度值作为该点的迭代初值,并且将控制点的深度均方差作为迭代收敛条件之一。Leão^[30]分析了重力异常下延结果与界面深度及相关参数的关系,利用已知控制点的深度信息及重力观测值对地下构造的基本参数进行最优估计,采用得到的最优参数反演全区的界面起伏。Silva^[31]在讨论界面起伏与密度差参数的同时反演中利用已知点深度与对应反演结果残差、重力观测值与对应正演计算值残差二者共同作为判断反演结果的标准,通过二者的加权组合建立关于密度差与界面深度的目标函数。这些方法都表明,应用约束信息对反演过程或反演目标进行优化可获得更为合理的结果。

在文献[28]方法基础上,将其扩展到 3D 界面反演,从迭代反演基本思路出发,结合最优化理论,有效的利用约束信息建立优化目标函数并求解。基本思想是:结合局部控制点的信息和区域重力异常特征,估算非线性项对应的界面埋深误差,改进初始模型;根据改进后的模型深度进行正演计算得到重力异常正演值,利用已知点上计算的重力异常与实测重力异常之差预测整体测网的误差,并据此改进迭代反演的过程,构建联合优化目标函数;求解该优化问题,并施加正则化以保证解的收敛性,反复迭代至合理结果。

3 南黄海残留盆地研究

3.1 地质背景及地球物理场特征

南黄海为半封闭状的海湾性陆表海,其北以山

东半岛成山角与朝鲜半岛的白翎岛连线毗邻北黄海,南以长江口启东嘴至济州岛西北角连线与东海为界,是一个以下扬子地台为主体,发育古、中、新生代三套沉积体系的大型叠合盆地^[8,9].在大地构造上,一般将南黄海划分为五个一级构造单元^[32],由北向南依次为:千里岩隆起、北部拗陷、中部隆起、南部拗陷、勿南沙隆起.南黄海基底结构复杂,反映其在多期成盆过程中曾有过重大地质事件,包括郯庐断裂平移走滑活动、苏鲁超高压变质带的切入等^[33].中生界主要分布于北部拗陷及南部拗陷,海相中、古生界地层主要分布在勿南沙隆起区、南部拗陷和中部隆起区^[9,10].

研究区重磁数据分布范围为:119°E~127°E, 31°N~38°N,数据来自于《中国近海残留盆地研究数据库》¹⁾,成图网格间距为 0.05°×0.05°.布格重力异常特征如图 2 所示,海区内总体异常范围在-5~40 mGal之间,以正异常为主,负异常主要分布于南北两个拗陷区内,总体呈 NE 向和 EW 向展布.海区西部由北向南,异常高值区与低值区相间分布,异常梯度带介于其间.

磁异常特征见图 3a,对磁异常进行化极处理,化极磁异常见图 3b,化极参数为:磁偏角-7°,磁倾角 53.5°.研究区磁异常化极处理后整体特征相似,变化较小.山东半岛南部沿海岸线分布有条带状高值正异常分布,千里岩隆起区西部以平缓的负异常为主,东部则以团块状的正异常为主,整体呈 NE

向.海区大部分地区异常变化平缓,大都在-100~200 nT.西部表现为正异常背景下的负异常圈闭,中部发育块状高值正异常.勿南沙隆起存在一变化平缓的负异常区,其南部表现为 NEE 走向异常梯度带.

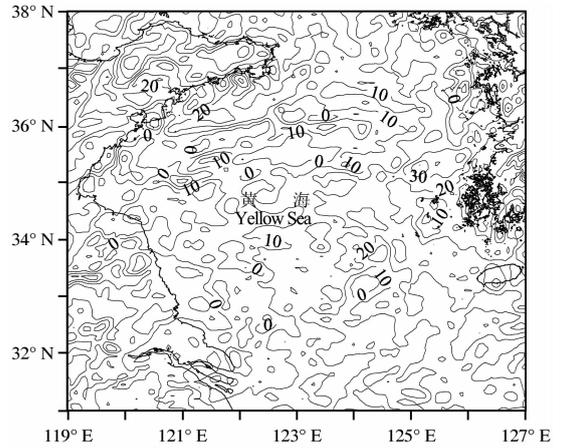


图 2 研究区布格重力异常(单位:mGal)

Fig. 2 Bouguer gravity anomaly map of study region(unit:mGal)

3.2 研究区岩石物性特征

前人在南黄海及邻区做过大量的岩石物性调查工作,表 1~4 只是其中的一部分.在此基础上,经过分析整理得到了研究区的岩石物性参数(表 5)作为正反演依据.

研究区主要存在以下密度界面:

新生界与中生界之间的密度界面,密度差为

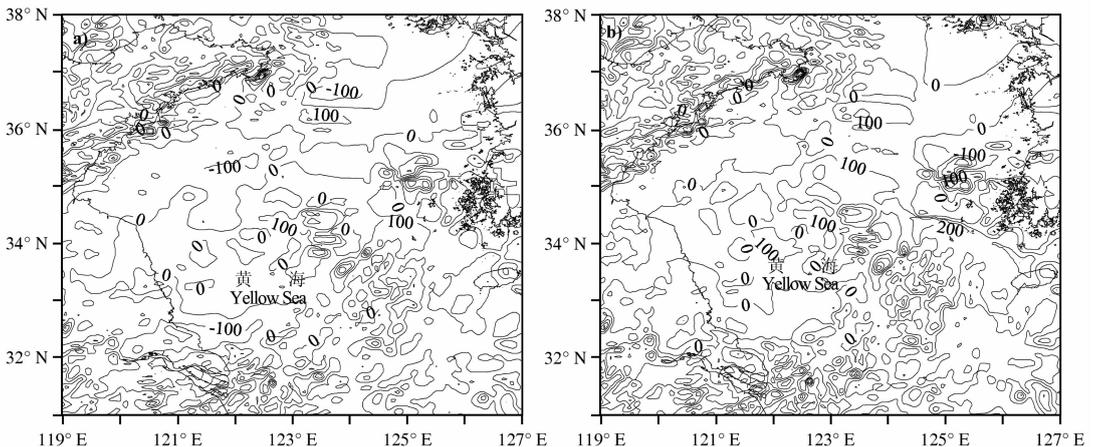


图 3 研究区磁异常(单位:nT)

(a)总磁异常;(b)化极磁异常.

Fig. 3 Magnetic anomaly in study region(unit:nT)

(a) Total field magnetic anomaly; (b) Magnetic anomaly with reduction to the pole.

1)郝天珧等.《中国近海前新生代油气资源地球物理地球化学探测技术研究》报告,2005,中国科学院地质与地球物理研究所

0.20 g/cm³; 侏罗系与三叠系之间的密度界面, 密度差为 0.19 g/cm³, 地壳与地幔之间的密度差取 0.42 g/cm³.

研究区新生界、中生界、古生界均为弱磁性或无磁性, 下元古界和太古界具有较强磁性. 该区为双层结晶基底(中—新元古代浅变质岩与太古代—早元古代深变质岩), 其主要的磁性界面在中元古界与下元古界之间. 因此, 下元古界的顶界面作为本区反演的磁性基底, 磁化强度差取 0.28~0.45 A/m.

表 1 A 井测井得到的地层密度和速度^[17]

Table 1 Density and velocity of stratum from well A^[17]

时代	地层	地层密度 (g/cm ³)	地层速度 (m/s)
新生代	上第三系	2.05	1800~2400
	三垛组	2.17	2600~3200
	戴南组	2.41	3400~3600
	阜宁组	2.55	3500~4500
中生代	泰州组	2.60	3500~5000

表 2 南黄海地区密度参数表²⁾

Table 2 Density of stratum in South Yellow Sea²⁾

地层	密度(g/cm ³)	平均密度(g/cm ³)
第四系	2.02	2.22
上第三系	2.15	
下第三系	2.33	2.65
三叠系	2.69	
二叠系	2.45	
石炭系	2.63	

表 3 黄海前第三系岩石物性参数^[12]

Table 3 Petrophysics of Pre-Tertiary in Yellow Sea^[12]

地层	密度(g/cm ³)	磁化率($\times 10^{-5}$ SI)
白垩系	2.30~2.50	无磁、弱磁
侏罗系	2.58	无磁、弱磁
三叠系-古生界	2.69~2.79	无磁、弱磁
元古界	2.67~2.75	<126
太古界	2.45~3.26	628~3768 (混合岩和花岗岩化)

表 4 山东半岛采样磁化率统计²⁾

Table 4 Susceptibility statistics in Shandong Peninsula²⁾

时代		岩性	磁化率($\times 10^{-5}$ SI)		
群(系)	组(代号)		极小	极大	平均
白垩系	青山组	玄武岩、安山岩	20	6228	963
		泥岩、砂岩、砾岩	2	882	75
侏罗系	莱阳组	粉砂岩、砂岩、砾岩	1	402	31
		灰岩、石英岩、大理岩、片岩	0	54	10
		斜长角闪岩	68	110	97
粉子山群	祝家疃组(Pt ₁ zj)	角闪安山岩	14	837	367
		片麻岩	11	39	25
	明村组(Pt ₁ m)	大理岩	3	18	11
		片麻岩	150	2849	679
五莲群	(Pt ₁ w1)	花岗片麻岩	10	168	34
		片麻岩、浅粒岩	22	1827	467
胶东群	民山组(Ar-Pt ₁ m)	花岗片麻岩	14	1096	233
		片麻岩	336	2425	847

3.3 重力基底与中生界残余厚度求取

岩石物性研究表明南黄海地区最大密度差界面主要有三个. 由于研究区浅层重力效应主要在新生界地层产生, 采用前述的重力正演方法, 利用钻井及地震勘探得到的新生界地层埋深资料正演计算求取

该层的重力效应(图 4). 该区深部区域场主要是莫霍面起伏引起的重力效应, 该界面的密度差为 0.42 g/cm³. 通过布格重力异常的小波分析, 对比分析向上延拓以及尺度滤波的结果, 选取小波四阶逼近作为深部区域场的重力效应(图 5). 将浅层重力效应和深部

区域场从总场中除去后,得到的剩余重力异常主要反映该区中生界与下伏地层间密度差所引起的重力效应(图 6). 该界面对应三叠系的顶界,即本区的重力基底.

根据钻井及地震资料可以获取部分先验信息作为重力基底的控制点,利用前述的约束界面反演方法对剩余重力异常进行反演,得到研究区重力基底埋深(图 7). 控制点反演结果对比最小误差为 0.1 km,最大误差为 1.1 km,均方差 0.3 km,反演结果比较理想.

表 5 研究区地层密度及磁性表

Table 5 Density and susceptibility of stratum in study area

地层	平均密度 (g/cm^3)	密度差 (g/cm^3)	磁化率 ($\times 10^{-5}$ SI)
第四系—古近系	2.30		0~120
白垩系—侏罗系	2.50	0.2	0~75
三叠系—寒武系	2.69	0.19	0~100
元古界	2.70		10~679
太古界	2.73		233~2388

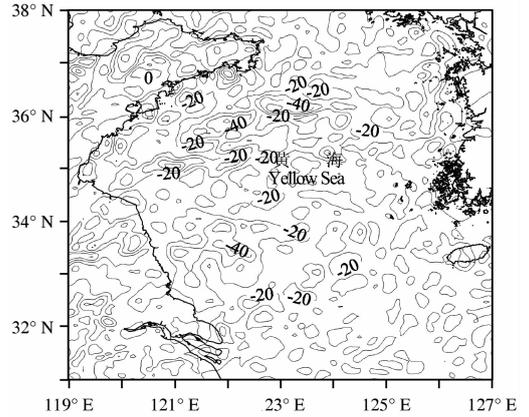


图 6 研究区剩余重力异常(单位:mGal)

Fig. 6 Residual gravity anomaly of study region(unit:mGal)

研究区重力基底埋深分带性特征十分明显,隆、拗相间,总体呈 EW、NE 方向延伸,北部拗陷和南部拗陷被次一级的凹陷和凸起穿插切割. 北部拗陷重力基底凹凸起伏很大,凹陷部位埋藏深度约在 3~6 km 范围,在东北凹陷部最大可达 7.5 km,凸起部位埋深浅,为 1~3 km;中部隆起重力基底变化平缓,大部分在 1~2 km 左右;南部拗陷基底深部起伏也较大,局部大于 5 km,凸起部位在 1~3 km 变化;勿南沙隆起基底埋深在 1.5~3 km 之间.

本区重力基底相当于三叠系顶界埋深,以重力基底减去本区新生界底界埋深,就可以近似获得研究区中生界的残余厚度分布(图 7,主要是白垩系和侏罗系,三叠系与上古生界有些地区不可分). 结果显示,该区中生界残留地层主要分布于北部拗陷,南部拗陷局部发育,中部隆起和勿南沙隆起仅零星分布. 北部拗陷被一些局部凸起分割,中生界残留地层成块状分布,最大残余厚度在东北部,可达 3.5 km,北部拗陷的增厚中心可达 3 km 以上,西部和南部拗陷部位残余厚度一般为 1~2.5 km,凸起部位则缺失中生界或很薄. 中部隆起中生界一般缺失,南部拗陷局部有较厚的中生界分布,大部中生界残余厚度较小,局部残余厚度能达到 2 km. 勿南沙隆起中生界大部缺失,局部有较薄的分布.

3.4 磁性基底与古生界残余厚度求取

磁异常的处理采用了向上延拓、尺度滤波、插值切割与小波分析等多种处理方法来消除浅层磁性体产生的异常,选用小波三阶逼近作为区域背景场,利用 Parker 反演方法求取磁性基底深度(图 8). 该区磁性基底埋深显示出“中间浅四周深”的特点,构造走向以 EW、NE 向为主,局部 NW 走向,最大埋深

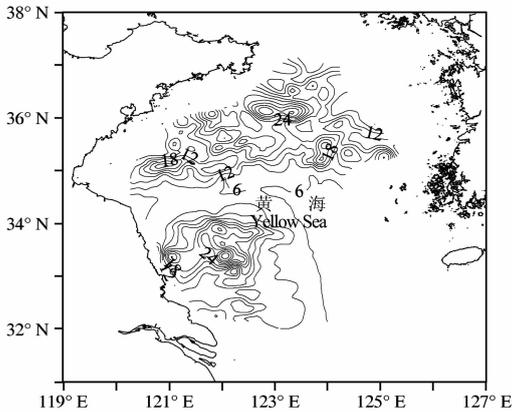


图 4 研究区新生界重力效应(单位:mGal)

Fig. 4 Gravity anomaly of Cenozoic strata in study region(unit:mGal)

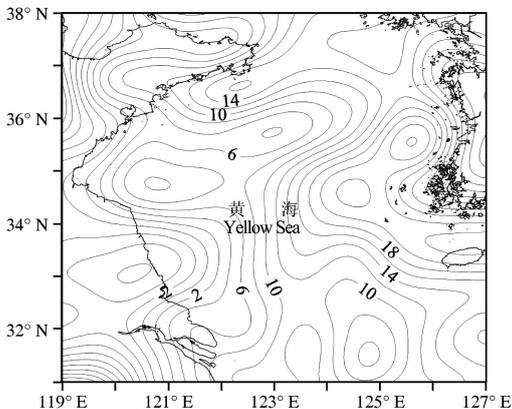


图 5 布格重力异常四阶小波逼近(单位:mGal)

Fig. 5 The fourth-level approximation of Bouguer gravity anomaly(unit:mGal)

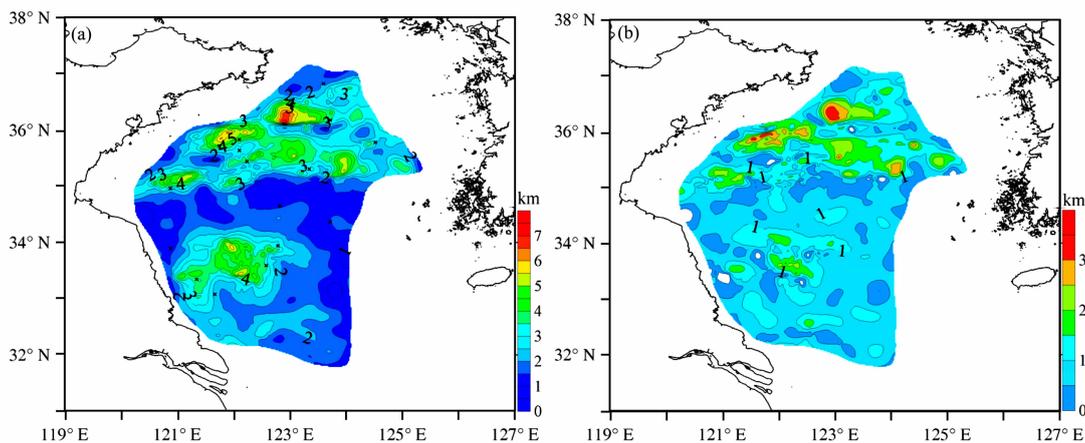


图 7 研究区重力基底埋深(a)与中生界残留厚度分布(b) (× 控制点)

Fig. 7 Distribution of gravity basement(a) and residual thickness distribution of Mesozoic(b) in study region (× constraint points)

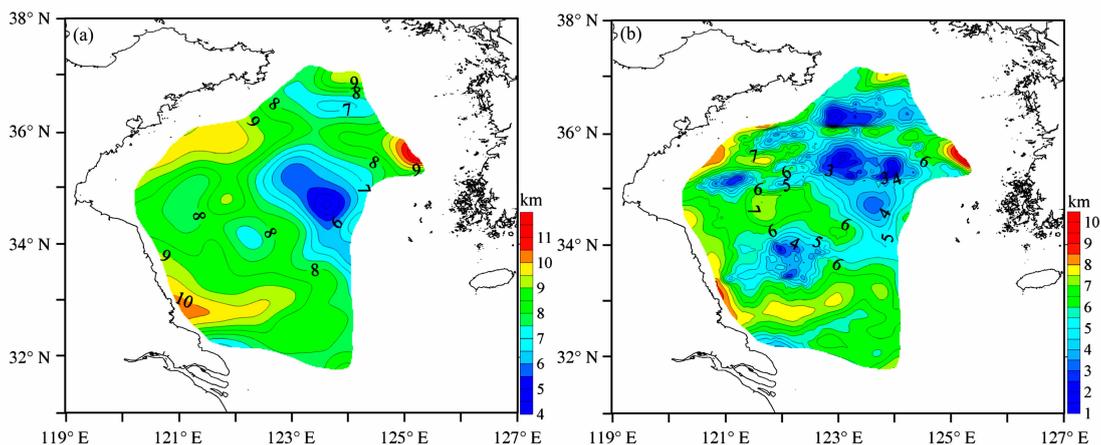


图 8 研究区磁性基底埋深(a)古生界残余厚度分布(b)

Fig. 8 Depth distribution of magnetic basement (a) and residual thickness distribution of Palaeozoic (b) in study region

12 km,位于朝鲜半岛西缘,最小埋深小于 5 km,位于中部隆起带上. 北部拗陷埋深一般在 6~9.5 km;中部隆起起伏较大,变化范围为 4.5~9 km;南部拗陷表现出“东浅西深”的特点,从 6.5 km 递增到 10.5 km;勿南沙隆起也体现出由西向东埋深变浅的特点,但起伏相对平缓.

该区磁性基底深度大致反映了下元古界顶界面埋深. 磁性基底与重力基底相减,便获得了古生界(含三叠系、部分元古界)的残余厚度分布. 区内古生界残余厚度整体上以近 EW、NE 向分布,全区变化较平缓,局部变化较大. 北部拗陷中凸起部位有较大的残余厚度,局部达 7 km 以上,凹陷部位残余厚度较小,一般小于 5 km. 中部隆起残余厚度较大,西部普遍大于 6 km,东部则在 4~6 km. 南部拗陷的古生界残余厚度不大,一般小于 5 km. 勿南沙隆起区

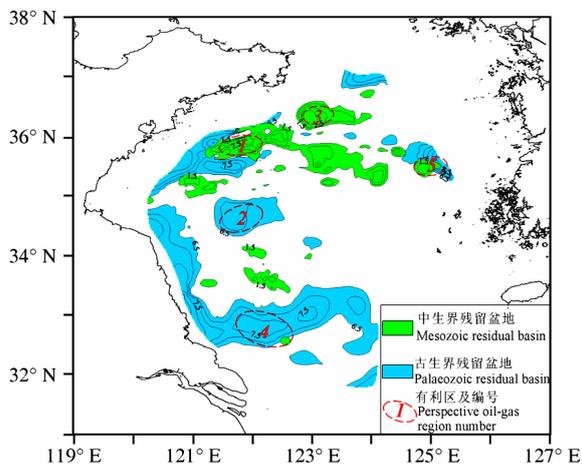


图 9 研究区前新生代残留盆地及油气有利区

Fig. 9 Distribution of perspective oil-gas region in Pre-Cenozoic of study region

有较大的残余厚度分布,达 7 km 以上,表现出近 EW 向的条带状展布。

利用重磁资料提取黄海前新生界残余厚度已有学者^[34]进行过探讨性的研究.文献^[34]采用剥离法和 Parker 反演方法求取了黄海的中、古生界残余厚度,结果显示:南黄海北部拗陷和南部拗陷均有大面积中生界分布,而中部隆起和勿南沙隆起的残余厚度普遍大于 3 km.该结果与黄海地区相关地震资料圈划的中生界分布及地质认识^[12,35]差别很大,地震解释表明白垩系和部分侏罗系残余地层主要分布于北部拗陷,其他地区仅有零星分布.本文中新生界残余厚度分布与已有地震圈划结果符合较好.文献^[34]结果与本文差别较大原因在于对先验信息的利用上,以高精度资料约束重磁反演解释,对于获取合理地质认识作用明显,效果更好。

4 前新生界残余厚度分布与油气前景分析

将不同时期的残留盆地分布叠加,可以勾绘出南黄海前新生代残留盆地的分布(图 9).研究区前新生界残余厚度分布呈现较明显的 EW 向和 NEE 向构造痕迹,这种宏观特征与该区复杂的构造演化史紧密相关,反映出当时的应力状况.印支运动时期近 SN 向的强烈挤压和扭动作用重塑了南黄海海相沉积的原始地貌,形成了一系列近 EW 向、NEE 向的褶皱与冲断构造^[36].而晚白垩世至渐新世期间,太平洋板块的运动方向由 NNW 向逐渐转为 NWW 向俯冲,中国东部受太平洋板块俯冲作用的影响,应力场逐渐转变为拉张状态,产生一系列的 NE 向构造或一些原有 NE 向构造带再次活动^[37].

从勾绘的残留盆地分布来看,北部拗陷中生界残余厚度较大,分布广泛.研究区已证实的生烃岩为上白垩统泰州组及下第三系阜宁组,有机质丰度属中等-好^[38],阜宁组和戴南组内部砂岩为储层,泥岩既是生烃层又为局部盖层^[39].同时 ZC1-2-1 井在泰州组泥岩裂隙中见到了轻质原油,表明白垩系具有生油、聚油过程^[35].地震资料和沉积相研究也表明,拗陷内有众多形成时间与油气大规模运移时间匹配良好的构造圈闭^[40].由此可知,北部拗陷是一个很有前景的区域,特别是北部凹陷面积大、地层发育、中生界残余厚度大,是一个多油源、深拗陷的有利勘探区,更有可能形成油气资源的突破.此外,该区东北部凹陷中生界残余厚度大,是另一个值得关注的

有利区。

研究区的古生界残余厚度增厚带主要在中部隆起和勿南沙隆起,局部地区厚达 7 km.研究资料表明,该区古生界主要发育两套烃源岩,生烃潜力较大^[14],而且发育多套储层,以及 4 套由泥质岩构成的区域盖层^[40],具备较好的油气成藏条件.同时,中部隆起及勿南沙隆起是下扬子稳定性最大的区块,后期构造变形相对较弱,对油气成藏和保存有利.特别是中部隆起残余厚度巨大,有利于古生古储型内幕原生油气藏的保存.因此,中部隆起的古生界残余厚度增厚带应是该区最有利的远景区之一.勿南沙隆起的古生界残余厚度巨大,且分布广泛,是非常值得关注的勘探远景区。

根据前新生界残余厚度与埋深条件并参考石油地质条件,本文推测了 5 个前新生代油气前景区(图 9).总体来说,北部拗陷的北部和东北部具有有利于中生代油气资源的构造条件存在;中部隆起的残余厚度增厚中心为前新生代油气资源有利区;勿南沙隆起区的古生界残余地层分布广泛且厚度巨大,具有一定的油气潜力。

5 结论与讨论

(1)以地震、钻井等高精度数据作为约束资料,以重磁数据作为主体,通过相应位场剥离和目的层界面反演求取残余厚度的综合地球物理研究思路适用于大面积圈化海区残留盆地宏观分布,在前新生代残留盆地油气资源勘探技术体系中是有效的。

(2)南黄海中生界残留地层主要分布于北部拗陷,南部拗陷局部发育,中部隆起和勿南沙隆起仅零星分布.最大残余厚度在东北部,可达 3.5 km,北部凹陷的增厚中心可达 3 km 以上.古生界残留地层在中部隆起和勿南沙隆起区分布广泛且厚度巨大,局部达 7 km 以上.该区前新生界残余厚度分布呈现较明显的 EW 向和 NE 向构造痕迹,表明后期的应力对残余厚度增厚带分布有一定影响。

(3)南黄海是一个多旋回的复合盆地,北部拗陷区以中生代陆相烃源岩为主,该区北部和东北部中生界残余厚度较大,是一个较好的油气有利区.中部隆起和勿南沙隆起的古生界残余厚度巨大,受后期改造和变形较弱,保存条件比较完整,且上覆盖层比较稳定,其增厚带是非常值得关注的勘探远景区。

致 谢 本文得益于刘光鼎院士的学术思想,在此,对刘院士表示衷心的感谢! 研究中得到广州海洋地

质调查局王嘹亮、姚永坚教授以及青岛海洋地质研究所张训华、陈建文研究员等大力的帮助,在此一并致谢!

参考文献(References)

- [1] 刘光鼎. 试论残留盆地. 勘探家, 1997, **2**(3): 1~4
Liu G D. Preliminary discussion on residual basins. *Petroleum Exploration* (in Chinese), 1997, **2**(3): 1~4
- [2] 刘光鼎. 中国油气资源企盼二次创业. 地球物理学进展, 2001, **16**(4): 1~3
Liu G D. The second exploration of the oil and gas resources in China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2001, **16**(4): 1~3
- [3] 马永生. 中国海相油气田勘探实例之六: 四川盆地普光大气田的发现与勘探. 海相油气地质, 2006, **11**(2): 36~40
Ma Y S. Cases of discovery and exploration of marine fields in China (part 6): Puguang gas field in Sichuan basin. *Marine Origin Petroleum Geology* (in Chinese), 2006, **11**(2): 36~40
- [4] 刘光鼎. 前新生代海相残留盆地. 地球物理学进展, 2001, **16**(2): 1~7
Liu G D. Pre-Cenozoic marine residual basins. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2001, **16**(2): 1~7
- [5] 刘光鼎. 我国油气资源勘探开发中存在的主要问题及对策. 地球物理学进展, 2005, **20**(1): 1~3
Liu G D. Main problems and countermeasures existed in exploring oil and gas resources in China. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, **20**(1): 1~3
- [6] 刘光鼎, 陈洁. 中国前新生代残留盆地油气勘探难点分析及对策. 地球物理学进展, 2005, **20**(2): 273~275
Liu G D, Chen J. Analysis of difficulties in gas-petroleum prospecting in Chinese Pre-Cenozoic relic basin and the corresponding solutions. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005, **20**(2): 273~275
- [7] 刘光鼎, 张丽莉, 祝靓. 试论复杂地质体的油气地震勘探. 地球物理学进展, 2006, **21**(3): 683~686
Liu G D, Zhang L L, Zhu L Y. Seismic prospecting for oil and gas on the complex geological bodies. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2006, **21**(3): 683~686
- [8] 秦蕴珊, 赵一阳, 赵丽蓉等. 黄海地质. 北京: 海洋出版社, 1989
Qin Y S, Zhao Y Y, Zhao L R, et al. *Geology of Yellow Sea* (in Chinese). Beijing: Ocean Press, 1989
- [9] 蔡乾忠. 黄海含油气盆地地质与大地构造环境. 海洋地质动态, 2002, **18**(11): 8~12
Cai Q Z. Regional geology and geotectonic environment of petroliferous basins in the Yellow Sea. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2002, **18**(11): 8~12
- [10] 赖万忠. 黄海海域沉积盆地与油气. 海洋地质动态, 2002, **18**(11): 13~16
Lai W Z. Sedimentary basins and petroleum of the Yellow Sea. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2002, **18**(11): 13~16
- [11] 蔡峰, 孙萍. 黄海海域的中朝造山带与沉积盆地. 海洋科学, 2006, **30**(7): 69~75
Cai F, Su P. Sino-Korean orogenic belt and sedimentary basin in the Yellow Sea. *Marine Sciences* (in Chinese), 2006, **30**(7): 69~75
- [12] 戴春山, 李刚, 蔡峰等. 黄海前第三系及油气勘探方向. 中国海上油气(地质), 2003, **14**(4): 225~231
Dai C S, Li G, Cai F, et al. The pre-Tertiary and its hydrocarbon exploration targets in Yellow Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2003, **14**(4): 225~231
- [13] 李廷栋, 莫杰, 许红. 黄海地质构造与油气资源. 中国海上油气(地质), 2003, **17**(2): 79~83
Li T D, Mo J, Xu H. Geological structure and petroleum resources in Yellow Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2003, **17**(2): 79~83
- [14] 李刚, 陈建文, 肖国林等. 南黄海海域的海相中-古生界油气远景. 海洋地质动态, 2003, **19**(8): 12~16
Li G, Chen J W, Xiao G L, et al. Petroleum prospect of marine Paleozoic in the South Yellow Sea. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2003, **19**(8): 12~16
- [15] 冯志强, 姚永坚, 曾祥辉等. 对黄海中-古生界地质构造及油气远景的新认识. 中国海上油气(地质), 2002, **16**(2): 367~373
Feng Z Q, Yao Y J, Zeng X H et al. New understanding of Mesozoic-Paleozoic tectonics and hydrocarbon potential in Yellow Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2002, **16**(2): 367~373
- [16] 姚永坚, 冯志强, 王嘹亮等. 南黄海构造样式的特征及含油气性. 海洋地质动态, 2002, **18**(11): 30~32
Yao Y J, Feng Z J, Wang L L et al. Characteristics of structural styles and petroliferous property in South Yellow Sea. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2002, **18**(11): 30~32
- [17] 吴志强. 黄海地层岩石物理特征及其对地震勘探技术的挑战. 中国海上油气(地质), 2003, **17**(6): 407~411
Wu Z J. Petrophysical properties of Yellow Sea sediments and their challenges to seismic survey. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 2003, **17**(6): 407~411
- [18] 徐亚, 郝天眺, 戴明刚等. 渤海残留盆地分布综合地球物理研究. 地球物理学报, 2007, **50**(3): 868~881
Xu Y, Hao T Y, Dai M G, et al. Integrated geophysics research on distribution of residual basins of Bohai Sea. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, **50**(3): 868~881
- [19] 王家林, 王一新, 万明浩. 石油重磁解释. 北京: 石油工业出版社, 1991
Wang J L, Wang Y X, Wan M H. *Gravity and Magnetic Interpretation for Petroleum Exploration*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1991
- [20] Spector A, Grant F S. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 1970, **35**(2): 293~302
- [21] Mallat S, Zhong S. Characterization of signals from multiscale edges. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1992, **14**(7): 710~732

- [22] Fedi M, Quana T. Wavelet analysis for the regional-residual and local separation of the potential field anomalies. *Geophysical Prospecting*, 1998, **46**:507~525
- [23] 侯遵泽, 杨文采. 中国重力异常的小波变换与多尺度分析. *地球物理学报*, 1997, **40**(1):85~95
Hou Z Z, Yang W C. Wavelet transform and multi-scale analysis on gravity anomaly of China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1997, **40**(1):85~95
- [24] 高德章, 侯遵泽, 唐 建. 东海及邻区重力异常多尺度分解. *地球物理学报*, 2000, **43**(6):842~849
Gao D Z, Hou Z Z, Tang J, et al. Multiple analysis of gravity anomalies on East China Sea and adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, **43**(6):842~849
- [25] 杨文采, 施志群, 侯遵泽等. 离散小波变换与重力异常多重分解. *地球物理学报*, 2001, **44**(4):534~541
Yang W C, Shi Z Q, Hou Z Z, et al. Discrete wavelet transform for multiple decomposition of gravity anomalies. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(4):534~541
- [26] 梁锦文. 位场小波分析的物理解释. *地球物理学报*, 2001, **44**(6):865~870
Liang J W. A physical interpretation of wavelet analysis for potential fields. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2001, **44**(6):865~870
- [27] 徐 亚, 郝天珧. 提升小波:可用于重磁资料处理的新方法. *地球物理学进展*, 2004, **19**(1):36~39
Xu Y, Hao T Y. Lifting scheme: a promising method in gravity and magnetic data processing. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2004, **19**(1):36~39
- [28] 林振民, 阳 明. 具有已知深度点的条件下解二度单一密度界面反问题的方法. *地球物理学报*, 1985, **28**(3):311~322
Lin Z M, Yang M. A computer method for gravity interpretation of two-dimensional density contrast interface with some known depths. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1985, **28**(3):311~322
- [29] 汪汉胜, 陈 雪, 杨洪之. 深部大尺度单一密度界面重力异常迭代反演. *地球物理学报*, 1993, **36**(5):643~650
Wang H S, Chen X, Yang H Z. An iterative method for inversion of deep-large-scale single density interface by using gravity anomaly data. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1993, **36**(5):643~650
- [30] Leão J W, Menezes P T, Beltrão J F, et al. Gravity inversion of basement relief constrained by the knowledge of depth at isolated points. *Geophysics*, 1996, **61**(6):1702~1714
- [31] Silva J B, Costa D C, Barbosa V C. Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth. *Geophysics*, 2006, **71**(5):J51~J58
- [32] 沿海大陆架及毗邻海域油气区石油地质志编写组. 中国石油地质志卷十六—沿海大陆架及邻海域油气区(上). 北京:石油工业出版社, 1990
Editor committee of "Petroleum Geology of China: Oil&Gas Bearing Areas on the Continental Shelf and Its Neighboring Regions". *Petroleum Geology of China Vol 16: Oil& Gas Bearing Areas on the Continental Shelf and Its Neighboring Regions(Part 1)*. Beijing: Petroleum Industry Press, 1990
- [33] 王 巍, 陈 高, 王家林等. 苏北—南黄海盆地区域构造特征分析. *地震学刊*, 1999, (1):47~55
Wang W, Chen G, Wang J L et al. Analysis for regional structural characteristics of North Jiangsu-South Yellow Sea Basin. *Journal of Seismology* (in Chinese), 1999, (1):47~55
- [34] 郝天珧, 杨长春, 王真理等. 海区前新生代残留盆地油气研究的综合地球物理技术. *地球物理学进展*, 2008, **23**(3):731~742
Hao T Y, Yang C C, Wang Z L et al. Comprehensive geophysical technology on oil&gas resources of pre-cenozoic residual basin in Chinese marine area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2008, **23**(3):731~742
- [35] 李 刚, 张 燕, 陈建文等. 黄海海域陆相中生界地震反射特征及靶区优选. *中国海洋大学学报*, 2004, **34**(6):1069~1074
Li G, Zhang Y, Chen J W et al. Seismic reflection characteristics and selection of hydrocarbon prospective areas in the terrestrial Mesozoic strata of the Yellow Sea. *Periodical of Ocean University of China* (in Chinese), 2004, **34**(6):1069~1074
- [36] 万天丰. 中国大地构造学纲要. 北京:地质出版社, 2004
Wan T F. *China Tectonics Compendium*(in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 2004
- [37] 郝天珧, 刘建华, SuhMancheol等. 黄海及其邻区深部结构特点与地质演化. *地球物理学报*, 2003, **46**(6):803~808
Hao T Y, Liu J H, Suh M et al. Deep structure characteristics and geological evolution of the Yellow Sea and its adjacent regions. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2003, **46**(6):803~808
- [38] 许东禹, 刘锡清, 张训华等. 中国近海地质. 北京:地质出版社, 1997
Xu D Y, Liu X Q, Zhang X H, et al. *Offshore Geology of China Seas* (in Chinese). Beijing: Geological Publishing House, 1997
- [39] 肖国林. 南黄海盆地油气地质特征及其资源潜力再认识. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, **22**(2):81~87
Xiao G L. Reassessment of petroleum geological features and potential reserves in the South Yellow Sea Basin. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 2002, **22**(2):81~87
- [40] 张家强. 南黄海中、古生界油气勘探前景. *海洋地质动态*, 2002, **18**(11):25~27
Zhang J Q. Petroleum prospect of Paleozoic in the South Yellow Sea. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 2002, **18**(11):25~27