

利用 PARKER 变密度多层界面快速反演技术反演渤海地区密度界面^①

韩 波^{②***} 张菲菲^{***} 田振兴^{***}

(* 青岛海洋地质研究所 青岛 266071)

(** 国土资源部海洋油气与地质环境重点实验室 青岛 266071)

摘 要 利用重力资料反演地下密度界面对了解地壳深部结构、区域地质及资源矿产勘探等都是非常重要的。本文基于渤海地区的重力资料,利用 PARKER 变密度多层界面快速反演技术,反演了渤海地区密度界面。共反演了 4 个密度界面,由浅到深分别为第四系 + 新近系和古近系之间的界面,中生界与古近系之间的界面,奥陶系与上覆地层之间的界面,第 4 个密度界面是莫霍面,是区域性重力异常产生的原因。密度界面反演结果和地震解释的界面吻合较好,有部分地区有差异,并不是所有凹陷地区的莫霍面也是凹陷形态,凸起地区的莫霍面也是凸起形态。这是由于盆地边界的断裂控制作用引起密度变化不均匀,从而间接证明莫霍面起伏和地质运动、构造活动等和密度界面变化有紧密关系,密度界面反演工作为地质构造研究提供了基础数据。

关键词 渤海;重力异常;密度界面

0 引 言

本次研究区范围为渤海大部分海域地区,包括渤海湾、莱州湾和渤海中部海域,还包括河北省和山东省的沿海陆地区域。

前人对渤海地区做了大量地质地球物理调查工作。在渤海湾构造研究中,滕吉文等人^[1]利用渤海地球物理场对渤海湾及其周边地区的深部构造进行了综合研究。李延兴等人^[2]根据渤海盆地周围地区 GPS 的观测资料,分析了渤海地区的现今构造运动、内部形变及应变场。栾锡武等人^[3]利用资料讨论了渤海构造收缩和充填问题。周心怀等人^[4]利用地震剖面剖析了渤海海域新生代盆地结构特征,并对渤海湾构造单元进行了划分。徐杰等人^[5]根据新近系-第四系盖层断裂发育的资料,研究了渤海地区的新构造格局。李达等人^[6]从渤海湾盆地的

区域重力场、火山活动、断裂活动等方面指出了渤海湾盆地新构造运动对渤海地区的环境地质意义。在对渤海湾盆地的研究中,宋景明等人^[7]利用渤海湾重力资料,研究了渤海湾盆地断裂展布。徐亚等人^[8]利用综合地球物理方法对渤海残留盆地进行了分析。在渤海湾地区的断裂和居里面研究中,李西双等人^[9]利用渤海地区浅层地震剖面资料,分析了渤海地区的断裂和褶皱,绘制了渤海海域断裂分布图。李文勇等人^[10]利用航空重力资料研究渤海郯庐断裂及围区的构造几何特征。漆家福等人^[11,12]利用磁异常和地震剖面判断断裂结构,探讨渤海郯庐断裂带的结构模型及新生代运动学。汤良杰等人^[13]利用地震剖面研究渤海郯庐断裂构造。宋国奇^[14]研究了郯庐断裂带渤海段的深部构造,探讨了郯庐断裂带的动力学意义。万桂海等人^[15]根据渤海海域新构造运动断层特征,探讨了渤海海域的断裂构造样式和形成机制。解秋红^[16]对渤海及

① 国家自然科学基金青年项目(41206050),973 计划(2013CB429701)和国土资源大调查(1212010511302)资助项目。
② 女,1976 年生,博士,高级工程师;研究方向:海洋地球物理;联系人,E-mail: hanbo3952@ 163. com
(收稿日期:2019-04-23)

邻区地应力场进行了详尽分析,并对渤海及邻区构造的稳定性进行了评价。刘光夏^[17]对渤海第三纪裂谷扩张的地球物理特征进行分析,还计算了渤海地区的地壳厚度和居里等温面,探讨了郯庐断裂带渤海段的深部构造特征^[18,19]。郝书俭等人^[20]利用航磁资料计算了渤海的居里等温面。在利用重磁资料对渤海湾油气的研究中,邓运华^[21]利用重力、磁力、地震资料讨论了渤海大中型潜山油气田形成机理及勘探实践。周心怀等人^[22]根据渤海地区底辟构造探讨了渤海油气地质意义。龚再升等人^[23]研究了郯庐断裂对渤海海域东部油气成藏的控制作用。这些地球物理场研究成果及其深部界面和构造的综合研究成果,为研究渤海地区提供了丰富资料。

以上研究中没有提供渤海地区密度界面反演的平面成果,因此本文利用地质调查获得的重力异常资料,进行了渤海地区重力异常特征分析,收集了前人研究的物性参数,利用 PARKER 变密度多层界面快速反演技术,计算了渤海地区重力密度界面。本文共计算了 4 个密度界面,第 1 个界面为第四系 + 新近系和古近系之间的界面,第 2 个界面为中生界与古近系之间的界面,第 3 个密度界面为奥陶系与上覆地层之间的界面,第 4 个密度界面是上地幔与前古生界之间的界面,是区域性重力异常产生的原因,下面将详细论述。

1 重力异常特征及分区

本次数据来源于国土资源大调查项目,网格间距 10 km。整个渤海及邻域研究区布格重力异常幅值在 -50 ~ 25 mGal 之间变化,根据重力异常走向和重力异常特征可以划分为 3 个重力异常区,分别为北部重力高异常区、中部高低相间重力异常区、南部高低相间重力异常区,如图 1 所示。下面分别介绍重力场特征。

1.1 北部重力高异常区

该区处于研究区的北部,对应燕山褶皱隆起异常区。异常值范围在 -30 ~ 0 mGal 之间,出现了较完整的相对重力高异常圈闭,异常走向为东西(EW)向,在东部地区,异常走向为东北(NE)向。

1.2 中部高低相间重力异常区

该区位于研究区的中部,异常值变化范围为 -50 ~ 0 mGal。根据该区的异常特征,可分为 5 个明显不同的亚区。

1.2.1 沧县重力低异常区

该区对应沧县隆起区,重力异常值范围为 -50 ~ -20 mGal,整体走向为 NE 向,具有一个低值异常圈闭,反映了该区基底埋深较浅。

1.2.2 黄骅重力异常区

该区对应黄骅拗陷,重力异常值在 -20 ~ -10 mGal 之间变化,重力异常走向为 NE 向,与沧县隆起异常区异常走向平行。

1.2.3 埕宁重力异常区

该区位于研究区的南部,对应埕宁隆起区,重力异常值在 -20 ~ -10 mGal 之间变化,重力异常走向为 NE 向。

1.2.4 渤中北部重力低异常区

该区位于渤中拗陷的北部,异常值以低值异常圈闭为主,并与凹陷单元对应良好,异常走向大致为近东北(NEE)向,中部地区有部分异常呈现近 EW 向。该区域凹陷单元沉积层较厚,基底埋深相应较深,而凸起部分基底埋深较浅。

1.2.5 渤中南部重力高异常区

该区位于渤中拗陷的南部,异常值较北部高。西部异常走向为近 EW 向,东部异常走向近南北(SN)向,存在与凸起相对应的高值异常圈闭。而该区的一个高值异常圈闭则对应渤中凹陷,这是因为基底缺失中生代和古生代地层,太古代基底隆起所致。

1.3 南部重力高低相间异常区

1.3.1 济阳重力低异常区

该区主体对应济阳拗陷,重力异常值在 -30 ~ 0 mGal 之间变化,东部重力异常走向近 NE 向,西部具有较完整的低异常圈闭走向近西北(NW)向。

1.3.2 莱州湾重力高异常区

该区主体对应莱州湾,重力异常值在 -20 ~ 25 mGal 之间变化,重力异常走向近北北东(NNE)向,北部具有较完整的低异常圈闭,南部有完整的重力高圈闭,对应着莱州湾。

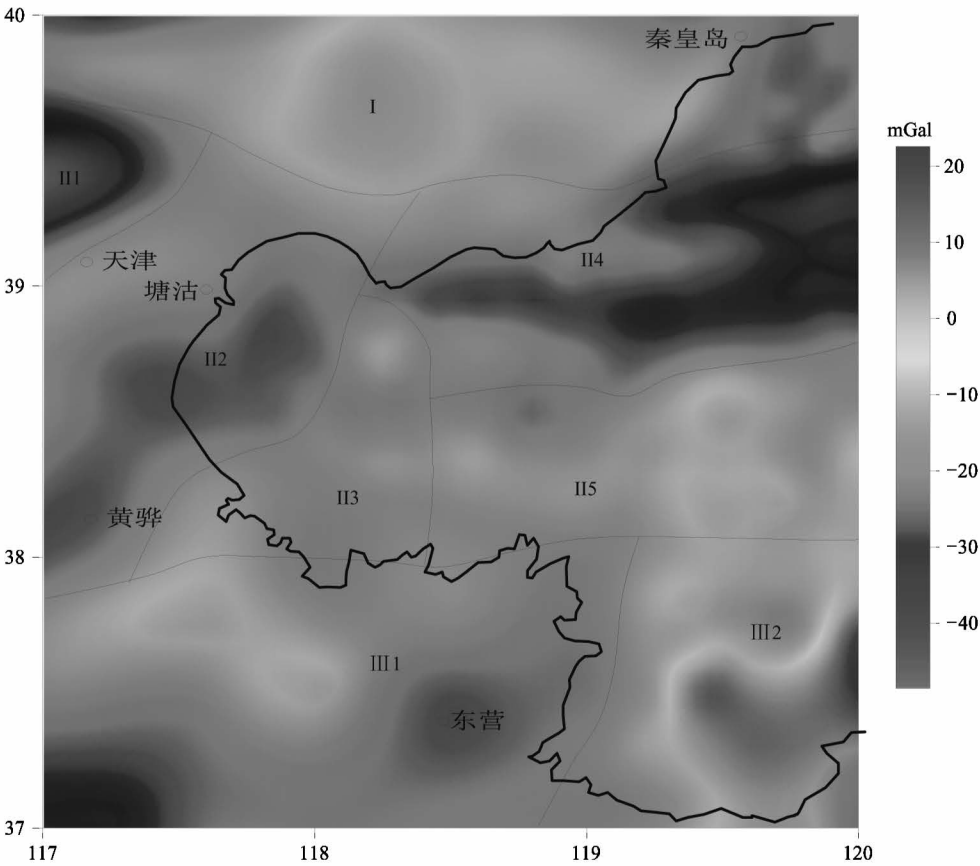


图 1 渤海地区布格重力异常及其分区图

2 渤海地区密度特征

根据宋景明等人^[7]的资料,本文整理了渤海地区的密度特征(见表 1)。如表 1 所示,渤海湾的中上元古界及太古界的平均密度大于 2.70 g/cm³,上古生界的平均密度为 2.61 g/cm³,中生界的平均密度为 2.54 g/cm³,新生界古近系的平均密度为 2.43 g/cm³,第四系与古近系平均密度为 2.18 g/cm³。

经过整理文献,本次得到渤海地区 4 个主要密度界面,第 1 个界面为第四系 + 新近系和古近系之间的界面,其密度差约为 0.2 ~ 0.3 g/cm³;第 2 个界面为中生界与古近系之间的界面,其密度差约为 0.15 g/cm³;第 3 个密度界面为奥陶系与上覆地层之间的界面,其密度差约为 0.1 g/cm³ 左右;第 4 个密度界面是莫霍面,其密度差在 0.35g/cm³ 左右,是区域性重力异常产生的原因。

表 1 渤海地区岩石密度统计表

地层系统			密度(g/cm ³)	
界	代号	组	范围	平均
Cz	Qp	平原组	2.05 ~ 2.10	2.18
	N ₂ m	明化镇组	2.05 ~ 2.21	
	N ₁ g	馆陶组	2.10 ~ 2.25	
	E ₃ d	东营组	2.21 ~ 2.34	
	E ₂₋₃ s	沙河街组	2.33 ~ 2.45	
	E ₁ k	孔店组	2.33 ~ 2.45	
Mz	K		2.46 ~ 2.58	2.54
	J			
Pz	P		2.59 ~ 2.68	2.61
	C			
	O		2.66 ~ 2.74	2.70
	Є			
Pt ₂₋₃			2.70 ~ 2.80	2.70 ~ 2.80
Ar			2.71 ~ 2.90	

3 密度界面反演方法及步骤

由地质地球物理特征可知,研究区共有 4 个密

度界面,分别是新近系底(古近系顶)、古近系底、奥陶系顶及莫霍面。根据前人资料以及地震解释^[8],反演以上 4 个密度界面。将上面 3 层利用重力剩余场同步反演,莫霍面利用重力区域场进行反演。

3.1 反演场的获得

由于地表岩体和其他因素对密度界面有不同的影响,密度反演之前先将重力数据做了 1 阶 20 km 半径趋势化分析。

随后对所得区域场进行 1 阶 200 km 半径的趋势化分析,利用所得剩余场用于反演古近系顶、底、奥陶系顶层位,利用所得区域重力场反演了莫霍深度面。

为使反演采用的重力场(重力剩余场、重力区域场)与目标重力场在同一个基准面上,要将反演用的重力场(重力剩余场、重力区域场)通过利用初始模型正演结果与场值之间的差值进行调整。

3.2 初始模型的建立

利用收集资料获得的奥陶系顶和莫霍面的等深图^[17,18]数字化得到研究区内奥陶系顶和莫霍面初始模型。

利用收集资料的地震解释结果^[8]构制了古近系顶、底的初始模型。

3.3 密度模型的建立

根据地质资料可以得到研究区地层密度的变化范围,反演剩余密度由式(1)计算得到。

$$\Delta\sigma_T = \sigma_T - \sigma_{T_g} \tag{1}$$

反演莫霍面所选密度为海底面与莫霍面之间所有地层的平均密度与地幔密度之差。

3.4 界面反演

对重力场进行趋势化分析得到重力剩余场和区域场,使用改进的 PARKER 变密度多层界面快速反演技术,利用重力剩余场对上面 3 个密度界面进行多界面联合迭代反演,并利用重力区域场反演莫霍面。

3.5 绘制地层深度图

利用反演结果编制了 4 个界面的等深图。

4 密度界面反演结果

使用改进的 PARKER 变密度多层界面快速反

— 640 —

演技术,利用重力数据反演了古近系顶、古近系底、奥陶顶以及莫霍面 4 个密度模型,反演模型如图 2 和图 3 所示。

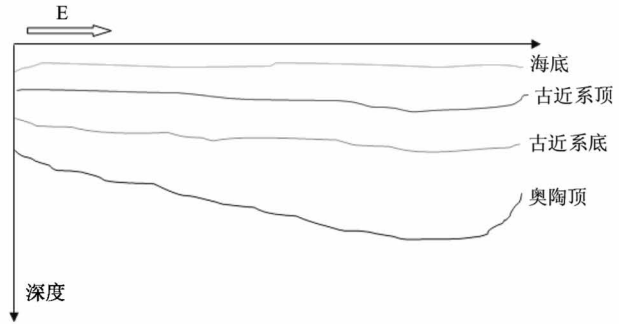


图 2 渤海地区密度界面反演模型

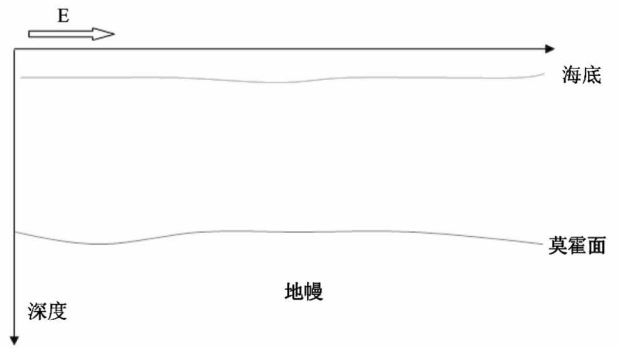


图 3 渤海地区莫霍面反演模型

本次研究使用的重力资料可以基本反映渤海地区基本构造格架。渤海地区密度界面的反演结果与已知地质资料^[17,18]和地震结果基本吻合^[8],说明本反演结果是可信的。反演结果如图 4 ~ 图 7 所示。

图 4 显示古近系顶的反演结果在 1 ~ 4 km 左右变化,低值地区有 3 处,1 处在渤海北部秦皇岛地区附近海域,1 处在莱州湾南部东营地区附近海域,1 处在渤海湾西部、黄骅地区附近,变化比较平缓。高值地区有 2 处,1 处在塘沽地区附近海域,1 处在渤中拗陷内,反演结果和地震解释的界面吻合较好。在渤中拗陷内的厚度相对比较大,最大达 4 km 左右,厚度中心位于渤中拗陷内呈 NE 向展布,变化较为平缓。

图 5 显示古近系底的反演结果在 1.6 ~ 8 km 之间变化,低值地区有 3 处,1 处在渤海北部秦皇岛地区附近海域,1 处在渤海湾西部、黄骅地区附近,1 处在莱州湾南部东营地区附近海域,变化比较平缓。高值地区有 2 处,1 处在塘沽地区附近海域,1 处在

渤中坳陷内,反演结果和地震解释的界面基本吻合。

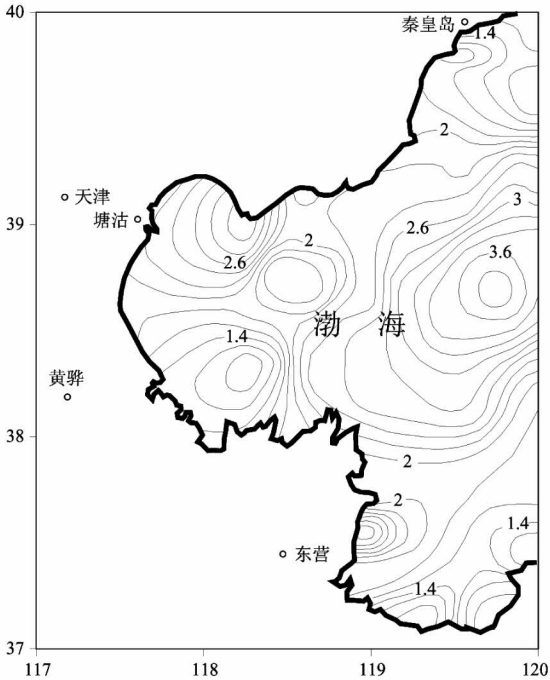


图 4 渤海地区古近系顶界面深度图(单位:km)

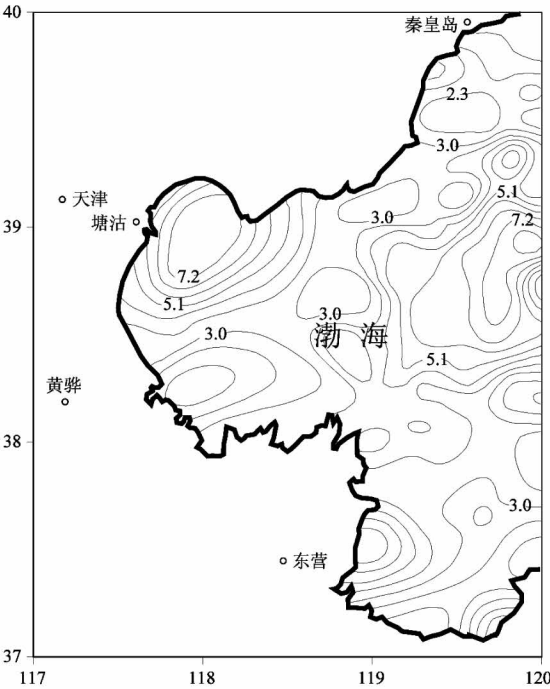


图 5 渤海地区古近系底界面深度图(单位:km)

图 6 显示奥陶顶部的反演结果在 1.8 ~ 13 km 之间变化,低值地区有 3 处,1 处在渤海北部秦皇岛地区附近海域,1 处在渤海湾西部、黄骅地区附近,1 处在莱州湾南部东营地区附近海域,变化比较平缓。

高值地区有 3 处,1 处在塘沽地区附近海域,1 处在渤中坳陷内,1 处在莱州湾南部,反演结果和地震解释的界面基本吻合。埋深在渤中坳陷内达到最大,可达 13 km 左右。

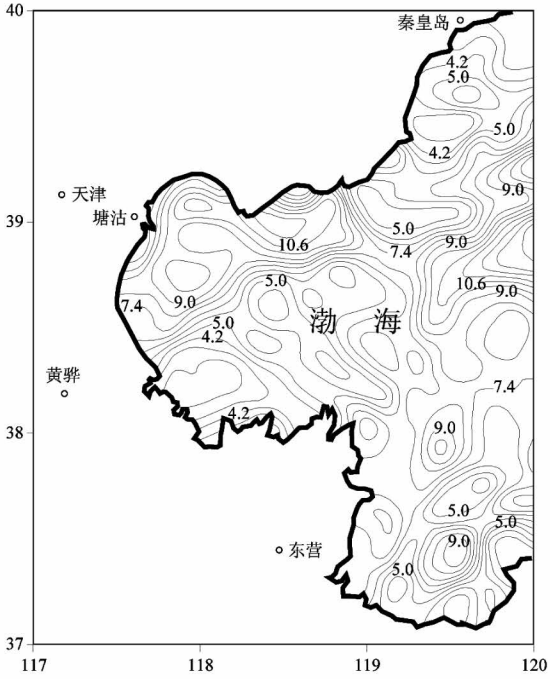


图 6 渤海地区奥陶系顶界面图(单位:km)

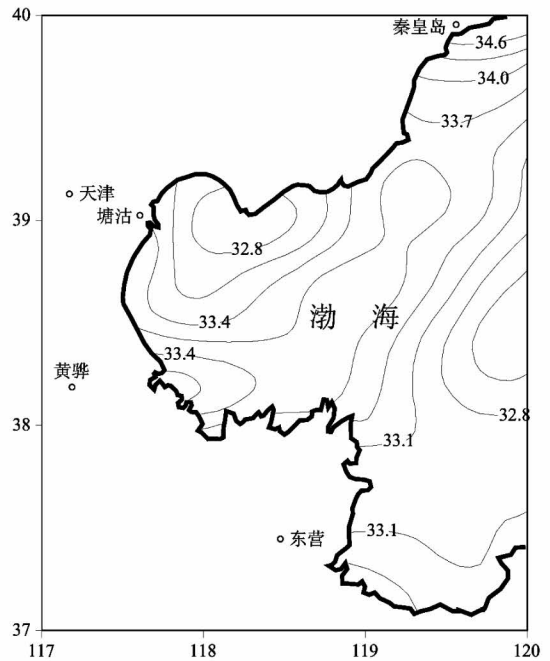


图 7 渤海地区莫霍面深度等深图(单位:km)

图 7 显示莫霍面在海域变化相对较为宽缓,在 32.5 ~ 34.6 km 之间变化,基本走向为 NE 向,极小

值有 2 处,1 处在渤海湾北部塘沽地区,莫霍面走向 NE 向,1 处在渤中地区,莫霍面走向 NE 向;极大值在渤海北部秦皇岛地区,莫霍面走向 NE 向,基本可以与前人资料吻合。

从古近系顶部反演结果和古近系底部反演结果可以看到,有 2 处低值区是重合的,一处位于渤海湾西部的黄骅地区附近,从古近系顶界面和古近系底界面反演结果推算,黄骅地区附近的古近系厚度大约有 1.4 km,地层厚度略厚,呈现一个凸起的地层。另一处位于莱州湾南部东营地区附近海域,从古近系顶界面和古近系底界面反演结果推算,东营地区附近海域的古近系厚度大约有 0.8 km,地层厚度略薄,也呈现一个凸起的地层。

从古近系顶部反演结果和古近系底部反演结果还可以看到,有 2 处高值区也是重合的,一处在渤海湾西部塘沽地区附近,从古近系顶界面和古近系底界面反演结果推算,塘沽地区附近的古近系厚度大约有 3.6 km,地层厚度厚,呈现一个凹陷的地层。另一处位于渤海东部的渤中凹陷附近,从古近系顶界面和古近系底界面反演结果推算,渤中凹陷地区附近的古近系厚度大约有 3.4 km,地层厚度厚,呈现一个凹陷的地层。

在渤海莫霍面深度图中,黄骅地区的莫霍面深度为 33.1 ~ 33.4 km,莫霍面呈现一个凹陷的地层,东营地区的莫霍面深度为 32.8 ~ 33.1 km,莫霍面呈现一个凸起的地层,塘沽地区的莫霍面深度为 33.1 ~ 33.4 km,莫霍面呈现一个凸起的地层,渤中凹陷地区莫霍面深度为 32.5 ~ 32.8 km,莫霍面呈现一个凸起的地层。

由反演结果可以看到,渤海黄骅地区莫霍面呈现一个凹陷形态,渤海东营地区的莫霍面呈现一个凸起形态,渤海塘沽地区莫霍面呈现一个凸起形态,渤中凹陷地区莫霍面呈现一个凸起形态。由此可以看出,并不是凹陷地区的莫霍面也是凹陷形态,凸起地区的莫霍面也是凸起形态,莫霍面起伏和地质运动、构造活动等有关系。

5 结 论

从反演结果可以看出,新近系-第四系在渤中坳

陷内的厚度相对比较大,最大达 4 km 左右,厚度中心位于渤中坳陷内呈 NE 向展布,变化较为平缓。通过对比,古近系顶的反演结果和地震解释的界面吻合较好。

古近系顶部反演结果和古近系底部反演结果中,有 2 处低值区是重合的,一处位于渤海湾西部的黄骅地区附近,呈现一个凸起的地层。另一处位于莱州湾南部东营地区附近海域,呈现一个凸起的地层。还有 2 处高值区是重合的,一处在渤海湾西部塘沽地区附近,呈现一个凹陷的地层。另一处位于渤海东部的渤中坳陷附近,呈现一个凹陷的地层。

奥陶顶部的反演结果为其厚度变化比较平缓,走向以 NE-NNE 向为主。在秦皇岛地区附近海域、黄骅地区附近、莱州湾附近海域这些凹陷的区域,沉积层厚度较大,反演结果和地震解释的界面吻合较好。

渤海湾的莫霍面在海域变化宽缓,基本走向为 NE 向,深度在 32.5 ~ 34.6 km 之间变化,靠近陆区的莫霍面深度值大,反演结果基本可以与已有资料吻合,但并不是所有凹陷地区的莫霍面也是凹陷形态,凸起地区的莫霍面也是凸起形态,莫霍面起伏和地质运动、构造活动等有关系。

密度界面反演结果基本与地震解释的界面吻合,有部分地区有差异,这是由于盆地边界的断裂控制作用,在边界处复杂的构造变动、断层等地质现象会使其密度与周围地层的密度存在显著差异,导致密度界面反演结果的偏差。但是这些差异可能就是发现地质问题的新的依据,密度界面反演工作可以为地质构造研究提供基础数据,具有重要地质意义。

参考文献

[1] 滕古文, 张中杰, 张秉铭, 等. 渤海地球物理场与深部潜在地幔热柱的异常构造背景[J]. 地球物理学报, 1997, 40(4): 468-480

[2] 李延兴, 徐杰, 张静华, 等. 渤海盆地及邻区现今构造运动的基本特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2007, 27(6): 1-8

[3] 栾锡武, 刘凤, 孙钿奇, 等. 渤海构造收缩与沉积充填[J]. 现代地质, 2011, 25(3): 429-439

[4] 周心怀, 余一欣, 汤良杰, 等. 渤海海域新生代盆地结构与构造单元划分[J]. 中国海上油气, 2010, 22(5): 285-289

- [5] 徐杰,周本刚,计凤桔,等. 渤海地区新构造格局[J]. 石油学报, 2011, 32(3):442-449
- [6] 李达,张志珣,张维冈,等. 渤海海域及邻区新构造运动特征与环境地质意义[J]. 海洋地质动态, 2009, 25(2):1-7
- [7] 宋景明,何毅,陈爱青. 对渤海湾盆地断裂体系的认识[J]. 石油地球物理勘探, 2009, 44(增刊 1):154-157
- [8] 徐亚,郝天珧,戴明刚,等. 渤海残留盆地分布综合地球物理研究[J]. 地球物理学报, 2007, 50(3):868-881
- [9] 李西双,刘保华,赵月霞,等. 渤海海域晚更新世—全新世的活动构造[J]. 海洋学报, 2010, 32(5):52-59
- [10] 李文勇,周坚鑫,熊盛青,等. 从航空重力看郯庐断裂系(渤海)及其围区构造几何学特征[J]. 地球学报, 2010, 31(4):549-556
- [11] 漆家福,周心怀,王谦身. 渤海海域中郯庐深断裂带的结构模型及新生代运动学[J]. 中国地质, 2010, 37(5):1231-1242
- [12] 漆家福,邓荣敬,周心怀,等. 渤海海域新生代盆地中的郯庐断裂带构造[J]. 中国科学 D 辑:地球科学, 2008, 38(增刊):19-29
- [13] 汤良杰,陈绪云,周心怀,等. 渤海海域郯庐断裂带构造解析[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2011, 33(1):170-176
- [14] 宋国奇. 郯庐断裂带渤海段的深部构造与动力学意义[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009, 30(6):663-667
- [15] 万桂梅,汤良杰,周心怀,等. 渤海海域新近纪_第四纪断裂特征及形成机制[J]. 石油学报, 2010, 31(4):591-595
- [16] 解秋红. 渤海及邻区地应力场分析及构造稳定性评价[D]. 青岛:中国海洋大学海洋地球科学学院, 2011
- [17] 刘光夏. 渤海第三纪裂谷扩张的地球物理分析[J]. 西北地震学报, 1996, 18(3):18-24
- [18] 刘光夏,任文菊,吴岫云,等. 渤海地壳厚度研究[J]. 物探与化探, 1996, 20(4):316-317
- [19] 刘光夏,赵文俊,张先. 郯庐断裂带渤海段的深部构造特征——地壳厚度和居里面的研究结果[J]. 长春地质学院学报, 1996, 26(4):388-391
- [20] 郝书俭,王春华. 渤海水域居里面分析[J]. 地震地质, 1982, 4(1):39-43
- [21] 邓运华. 渤海大中型潜山油气田形成机理与勘探实践[J]. 石油学报, 2015, 36(3):253-261
- [22] 周心怀,余一欣,汤良杰,等. 渤海地区底辟构造及其油气地质意义[J]. 石油学报, 2009, 30(4):518-521
- [23] 龚再升,蔡东升,张功成. 郯庐断裂对渤海海域东部油气成藏的控制作用[J]. 石油学报, 2007, 28(4):1-10

Inversion of density interface with PARKER variable technology in Bohai region by gravity data

Han Bo^{***}, Zhang Feifei^{***}, Tian Zhenxing^{***}

(* Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071)

(** Key Laboratory of Marine Oil and Gas and Geological Environment, Ministry of Land and Resources, Qingdao 266071)

Abstract

Inversion of underground density interface using gravity data is very important for understanding deep crustal structure, regional structure and metal mineral exploration. The density interfaces of Bohai Sea are inverted by PARKER variable density multilayer interface fast inversion technology with the gravity data of Bohai Sea. There are 4 density calculated interfaces. The first interface is the interface between Quaternary + Neogene and Paleogene, the second interface is the interface between the Mesozoic and Paleogene, the third density interface is the interface between the Ordovician and the overlying strata, and the fourth density interface is Moho, which is the reason for the regional gravity anomalies. The inversion result of density interface basically coincides with the interface of seismic interpretation, and there are differences in some areas. Not all the Moho surfaces in the depression area are also the depression shape, and the Moho surfaces in the uplift area are also the bulge shape, which is caused by the fracture control of the basin boundary and the uneven density change, thus indirectly proving that the Moho surface undulation, geological movement, structural activity, etc. The density interface is closely related to the change of density interface. The inversion of density interface provides data basis for the study of geological structure.

Key words: Bohai Sea, gravity anomaly, density interface