

李淑玲, Yaoguo Li, 孟小红等. 2014. 黄骅坳陷横向构造转换带与基底三分结构的重磁证据. 地球物理学报, 57(2): 546-555, doi:10.6038/cjg20140219.

Li S L., Yaoguo Li, Meng X H., et al. 2014. The indication for traversal tectonic transform zones and trichotomous structural basement from gravity and magnetic anomaly in Huanghua depression. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(2): 546-555, doi: 10.6038/cjg20140219.

黄骅坳陷横向构造转换带与基底三分结构的重磁证据

李淑玲^{1,2}, Yaoguo Li², 孟小红¹, 付立新³

1 地下信息探测技术与仪器教育部重点实验室(中国地质大学,北京),北京 100083

2 Department of Geophysics, Colorado School of Mines, Golden, CO80401, USA

3 中国石油大港油田公司,天津 300280

摘要 黄骅坳陷盆地结构及构造单元展布受深断裂及盆地基底的控制与影响,利用重磁异常可以较大范围地揭示出控制盆地构造格局的深断裂及基底结构特征.本文综合考虑研究区盆地基底的宏观磁性差异以及存在的剩磁影响,采用对磁化方向依赖性小的磁异常模量数据,研究了黄骅盆地区域横向构造转换带的展布与磁性基底结构.识别出五条 NW 向与优势构造走向高角度相交的区域横向构造转换带和两条呈“T”型展布的隐伏深断裂;研究区基底具有三分性结构特征,隐伏深断裂可能为三分基底的拼合线;基底结构差异及区域横向构造转换带共同控制了黄骅盆地“南北分区,东西分带”的宏观构造格局及沉积构造单元的展布.

关键词 黄骅坳陷,磁异常模量,横向构造转换带,基底三分结构

doi:10.6038/cjg20140219

中图分类号 P631,P318

收稿日期 2013-11-09,2014-01-14 收修定稿

The indication for traversal tectonic transform zones and trichotomous structural basement from gravity and magnetic anomaly in Huanghua depression

LI Shu-Ling^{1,2}, Yaoguo Li², MENG Xiao-Hong¹, FU Li-Xin³

1 Key Laboratory of Geo-detection, China University of Geosciences (Beijing), Ministry of Education, Beijing 100083, China

2 Department of Geophysics, Colorado School of Mines, Golden, CO80401, USA

3 Dagang Oil Field Company, CNPC, Tianjin 300280, China

Abstract The basin structure and distribution of tectonic units in the Huanghua depression are affected and controlled by deep faults and the basement. These features can be revealed on large scales using gravity and magnetic anomalies. However, the magnetic data processing and interpretation are faced with challenges from macroscopic magnetic differences of the basement and remanence effects present in igneous rocks and the basement. To tackle these challenges, and to develop a new methodology for tectonic structure interpretation from magnetic data when the RTP (reduction to the pole) is not applicable, we present a study on gravity and magnetic

基金项目 国家留学基金、Gravity and Magnetism Research Consortium (GMRC)、国家自然科学基金(41074095)、深部探测技术与实验研究专项(SinoProbe-01-05)、中央高校基本科研业务费专项资金(2652013035)联合资助。

作者简介 李淑玲,女,1971年生,博士,副教授,主要从事地球物理重磁方法、地球物理综合处理解释方面的教学与研究工作。

E-mail: lisl@cugb.edu.cn

amplitude data which is only weakly dependent on the direction of magnetization to delineate traversal tectonic transform zones and analyze trichotomous structure of the basement in the Huanghua depression. The results show that five NW—SE trending tectonic transform zones traverse at high angles to dominate geological structures and “T-shaped” intersection of two hidden deep faults may be the suture zone between three types of basements in this area. These characteristics reveal that a basin structure is featured macroscopically by east-west zoning and north-south partitioning, and that the distribution of the sedimentary tectonic units is controlled by the differences of basement properties and regional tectonic transform zones.

Keywords Huanghua depression, Amplitude of magnetic anomaly, Traversal tectonic transform zone, Trichotomous property of basement

1 引言

黄骅坳陷是我国东部渤海湾地区勘探和开发程度较高的含油气盆地,然而由于历经复杂的构造演化过程,表现为新生代盆地与前新生代残留盆地垂向叠置、盆地基底结构复杂多变的特点.在深部地震资料分辨率较差的情况下,通过重、磁等地球物理综合研究可以揭示盆地的基底结构及区域构造特征(Hao et al., 2008; Xu et al., 2007; Liu et al., 2003; Li et al., 2010).由于盆地基底与沉积盖层在垂向上通常具有明显的密度与磁性差异,此外,延展范围较大的深断裂或大型构造转换带两侧的地层、岩石也往往存在密度、磁性上的差异,或沿构造带岩浆活动强烈,这些均为盆地基底结构与断裂构造的重磁异常研究提供了应用前提.

裂陷盆地中的构造转换带通常起到横向调节伸展变形的作用,是一类沿盆地走向出现的横切、并导致主体构造走向与几何形态发生变化的调整伸展变形的构造.区域性的构造转换带通常由一系列横向的断裂带或隐伏的褶曲带组成,受先期构造与后期裂陷作用共同改造形成,可在横向上将盆地分割成不同的构造单元和沉积单元,构造转换带多位于盆地基底的薄弱带,并受基底结构的控制和影响(Wu and Qi, 1999).前人认为,黄骅坳陷的盆地基底可能由三种不同的基底拼合而成,即鲁西、燕辽和太行结晶地块(Zhou et al., 2004; Hu, 1999; Jia et al., 2001; Li et al., 2000),这种基底结构的三分特征受华北地台形成之初结晶基底的差异性控制.而结晶基底岩系的差异通常会产生区域性的磁性差异,因此聚焦黄骅坳陷具有典型分区特征的重磁异常,可以研究盆地的基底结构及区域横向构造转换带的展布.

目前,磁异常解释大多基于化磁极之后的磁异常,化磁极处理通常采用假设剩磁不存在时的地磁场方向作为磁化方向,当剩磁明显或因构造变动等原因使总磁化方向不同于地磁场方向时,简单地取地磁场方向作为磁化方向进行化磁极处理是不可取的(Li et al., 2010).鉴于黄骅坳陷结晶基底显著的磁性差异及复杂的拼合演化过程,推测强磁性基底具有较强的剩磁影响,复杂的构造变动也可能使区内基底岩石的磁化方向不单一,在此情况下总的磁化方向往往不同于地磁场方向,因此本文采用对磁化方向依赖性小的磁异常模量数据,对盆地基底结构及区域横向构造转换带展布进行地质译解.

2 区域岩石、地层的物性特征

黄骅坳陷作为中国东部渤海湾盆地的一部分,属于华北克拉通上发育的叠合型盆地,跟随“华北地台”经历了典型的多旋回盆地的演化过程(Xu et al., 2000; Li et al., 1999; Zhai et al., 2001),形成由太古界一下元古界变质岩组成的结晶基底及上覆的巨厚沉积盖层.在三分地块基础上发育起来的结晶基底,对区内盖层沉积与演化、断裂展布与构造格局具有重要的控制和影响作用.黄骅坳陷总体呈 NE 向展布,表现为“南北分区,东西分带”的构造格局,近 EW 向和 NE—NNE 向两组断裂发育.

根据前人在黄骅坳陷及邻区的物性研究成果(Hao et al., 2008; Zhou et al., 2004),以及大港探区内地震资料显示的地质厚度信息,汇总出本区主要地层与基底的密度和磁性特征,见表 1.

从表 1 可看出,黄骅坳陷沉积盖层包括未变质的中上元古界、古生界、中生界和新生界地层,随着地层年代由新到老、密度值由小变大,覆盖地表的第四系松散层密度最低为 2.0 g/cm^3 ,古生界及中上

表 1 黄骅拗陷及邻区地层密度、磁性统计表

Table 1 Density and susceptibility statistics of strata in Huanghua and adjacent areas

| 界 | 地层 | | | 主要岩性 | 密度 (g/cm ³) | 磁化率 1×10 ⁻⁵ SI (k) | 物性特征 | |
|----------|------|------|----------------------|------------------|----------------------------|----------------------------------|----------|---------|
| | 系 | 组 | 厚度(m) | | | | | |
| 新生界 | 第四系 | 平原组 | Qp | 粘土、砂土、冲积层 | 2.05 | 10~20 | 低密度、弱磁性 | |
| | | 明化镇组 | Nm | 疏松泥岩 | 2.11 | 0~150 | | |
| | 第三系 | 馆陶组 | Ng | 0~650 | 砂页岩、砂砾岩 | 2.19 | | 0~80 |
| | | 东营组 | Ed | 0~1600 | 砂岩、泥岩 | 2.2~2.3 | | 5~50 |
| | | 沙河街组 | Es | 0~5600 | 泥岩、砂岩 | 2.45 | | 0~100 |
| | 孔店组 | Ek | 0~3400 | 暗色泥岩、薄层砂岩 | 2.45 | 5~120 | | |
| 中生界 | 白垩系 | K | 0~2000 | 砂质泥岩 | 2.46 | 5~70 | 中密度、较强磁性 | |
| | | | | 安山岩、玄武岩 | 2.5~3.3 | 30~1500 | | |
| | 侏罗系 | J | 灰绿色砂岩 | 2.58 | 30~100 | | | |
| | | | 玄武岩 | 2.6~3.3 | 100~500 | | | |
| | | | 砂页岩 | 2.56 | 0~80 | | | |
| 三叠系 | T | | | 砂岩、泥岩 | 2.60 | 20~200 | | |
| 二叠系 | P | | | 砂岩、泥岩、砾岩 | 2.60 | 20~200 | | |
| 古生界 | 石炭系 | C | | | 灰岩 | 2.70 | 0~30 | 高密度、弱磁性 |
| | 奥陶系 | O | 0~5400 | | 泥岩、灰岩、页岩 | 2.66 | 0~40 | |
| | 寒武系 | Є | | | 灰岩、白云岩 | 2.72 | 0~40 | |
| | 震旦系 | Z | | | | | | |
| 中上元古界 | | | Pt | 碎屑岩、碳酸盐岩、火山岩、泥页岩 | >2.72 | >40 | 高密度、强磁性 | |
| 太古界及下元古界 | 结晶基底 | Ar | 花岗片麻岩、角闪岩、混合岩、黑云母片麻岩 | >2.75 | 935~4770 | | | |

元古界密度值较大,平均密度为 2.70 g/cm³. 此外,沉积盖层内各地层,除部分含火成岩成分的中生界地层表现出一定的磁性外,其他绝大部分的沉积地层表现为无磁性或微弱磁性,前寒武纪结晶基底是引起区域磁异常的主要地质因素.

由太古界及下元古界变质岩系构成的结晶基底总体表现为高密度、强磁性特征. 结晶基底平均密度值约为 2.72 g/cm³,而结晶基底因组成岩系不同导致磁性差异较大,其中强磁性基底以片麻岩为主,岩石的平均磁化率大于 3500×10⁻⁵ SI,中等磁性基底以角闪花岗片麻岩和混合花岗岩为主,平均磁化率为 450×10⁻⁵ SI,弱磁性基底以花岗片麻岩为主,平均磁化率为 50×10⁻⁵ SI. 尽管区内结晶基底岩石的剩磁实测资料较难收集到,但根据结晶基底岩系以片麻岩类为主的岩石磁性规律推测,磁性基底具有较强磁性的同时也会存在明显的剩磁,此推测可从 4.2 节中假设剩磁不存在、磁化方向单一时的化极磁异常与磁异常模量特征的对比差异中找到证据.

3 重磁场特征

3.1 重力异常

图 1 为研究区布格重力异常图,重力异常总体呈 NE 向高低相间的条带,与区内隆拗相间的地质构造格局有很好的对应关系,由西北至东南分别为冀中凹陷负异常区、沧县隆起正异常区、黄骅拗陷—临清凹陷负异常区、埕宁—沙垒田隆起正异常区,及东北角的燕山隆褶正异常区,异常变化范围为 -60~20 mGal. 位于研究区中部的宽缓低负异常圈闭大致勾画出黄骅拗陷北宽南窄的 NE 向展布轮廓,其上高低相间分布的局部异常圈闭与内部凹陷与凸起等构造单元相对应,如板桥凹陷、沧东凹陷、南皮凹陷、歧口凹陷、孔店与北大港构造带等.

3.2 航磁异常

图 2 为黄骅拗陷及邻区航磁异常图,区内航磁异常的优势走向为 NE 向,异常变化幅度为 -1100~

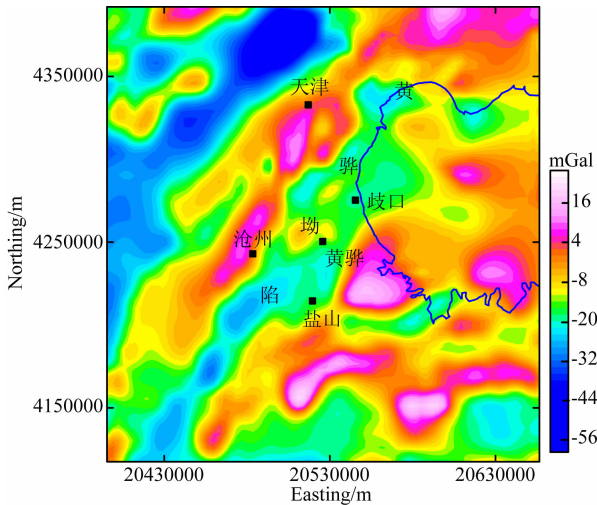


图1 黄骅坳陷及邻区布格重力异常图

Fig. 1 Bouguer gravity anomalies of Huanghua depression and adjacent areas

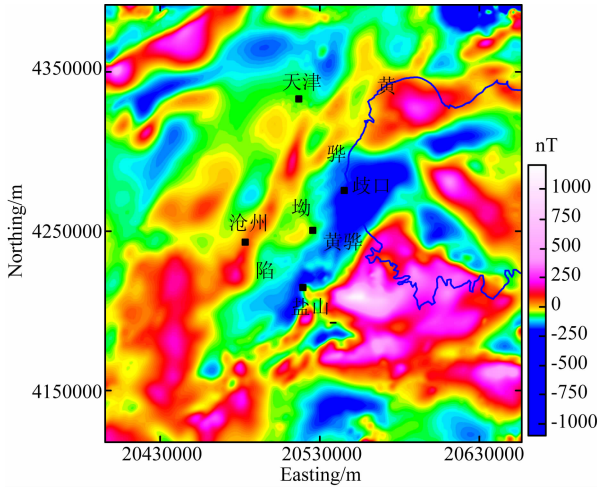


图2 黄骅坳陷及邻区航磁异常

Fig. 2 Total-field magnetic anomalies of Huanghua depression and adjacent areas

1200 nT.

根据磁异常的总体面貌,以黄骅坳陷为中心自西向东分为五大异常区:西北部的冀中低值负异常区、西部的沧县高值正异常区、中部的黄骅低值负异常区、东部及东南部的沙垒田—埕宁高值正异常区、北部的燕山正负异常交替变化区.位于研究区中部呈NE向长轴状展布的低负异常大致勾画出黄骅盆地中区和南区的分布范围,北区则以高值正磁异常为主.坳陷周缘四个区域的异常面貌差异明显,西侧的沧县隆起高值正异常明显分为两段,沧州以南异常呈宽缓的NS走向,幅值较高;沧州以北异常走向为NE向且高值异常范围变窄,其北端与黄骅坳陷北区的高值正异常相接.黄骅坳陷以北的燕山地区

仅出现在研究区的东北角,异常走向为NE和近EW向,异常变化较剧烈;坳陷以东及东南部的沙垒田—埕宁隆起区异常面貌复杂,磁异常走向表现出宏观NE向和局部NW向相叠合的特征,沙垒田和埕宁隆起大规模高值正异常被小范围NW向负异常相隔,异常强度最高可达1200 nT.沙垒田以北异常走向转为近EW向和NEE向.总之,黄骅坳陷及邻区磁异常面貌呈现东西分带、南北分段特征.

4 综合处理与解释

4.1 磁异常模量计算

如果缺少实测的磁异常三分量数据,可通过频率域内实测总场磁异常矢量转换为异常三分量的方法(Pedersen,1978)来计算磁异常模量,见(1)式.

$$B_a = \| \mathbf{B}_a \| = \sqrt{B_{ax}^2 + B_{ay}^2 + B_{az}^2}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{B}_a 、 B_a 分别为磁异常矢量、异常模量, B_{ax} 、 B_{ay} 、 B_{az} 分别为磁异常 \mathbf{B}_a 在 x 、 y 、 z 三个方向的分量.

从(1)式可以看出,异常模量 B_a 与磁异常矢量 \mathbf{B}_a 相比具有较少依赖于磁化方向的特点(Haney et al.,2003; Stavrev and Gerovska,2000).为更直观地显示这一特点,我们设计了简单的立方体模型,将不同磁化方向的正演总场异常与异常模量进行对比.

立方体模型尺寸为 $200\text{ m} \times 200\text{ m} \times 200\text{ m}$,顶面埋深 -200 m ,平面中心位置 $(500\text{ m}, 500\text{ m})$,磁化率 $k=0.1$,地磁场强度 40000 nT ,磁偏角 $D=0^\circ$,磁倾角 $I=0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$,磁异常与异常模量的平面计算范围为 $1000\text{ m} \times 1000\text{ m}$,网格间距 20 m ,总点数为2601.

图3为不同磁化方向下的立方体模型正演所得的总场异常与异常模量值,从水平磁化、斜磁化至垂直磁化时的异常与模量对比特征可以看出,不同磁化方向下的磁异常模量与异常矢量相比对磁化方向具有较小的依赖性,模量特征可以较好地反映模型体的平面位置.

研究区区域地质及物性资料显示,该区结晶基底由三类磁性不同的变质岩系组成,区域性的岩石磁性差异往往会在区域磁异常中具有明显的分区特征,由片麻岩组成的强磁性基底可能具有明显的剩磁影响.然而鉴于较难收集到研究区基底岩石的剩磁测定资料,可从化极磁异常与磁异常模量的对比角度,来分析研究区受剩磁影响及磁化方向特征.如化极结果与磁异常模量特征存在很大差异,间接表明存在剩磁影响或构造变动使磁化方向不同于现代

地磁场方向,此情况下不适宜进行化极处理,磁异常解释可基于对磁化方向依赖性小的磁异常模量数据.

根据如上磁异常模量的计算原理,由总场磁异常计算的研究区磁异常模量见图 4. 磁异常模量的总体特征显示出东西分带、南北分段的特点,模量异常的优势走向为 NNE—NE 向,以黄骅坳陷中部沿歧口—黄骅—盐山一线分为东西两大区域,西区异常模量值偏低且小型圈闭异常发育,局部异常走向多变,但总体面貌呈现南北分区的特点,沧州以北模量值普遍低于 100 nT,以南高于 100 nT. 东区异常模量值较高,歧口—黄骅—盐山东侧的高值异常圈

闭分布范围大,模量值高达 1300 nT,其南北两侧的高值异常表现为 NW 和近 EW 走向.

4.2 磁异常模量与化磁极异常的对比

我们假设剩磁不存在,取研究区的地磁场方向(磁倾角和磁偏角分别为 59° 和 -6°)作为磁化方向进行化磁极处理,化极磁异常见图 5. 磁异常总体面貌在化极前后变化不大,除黄骅坳陷负异常区分隔为两个负异常圈闭外,其周缘的主体异常形态与范围没有明显变化,异常仅向北发生迁移.

磁异常模量(图 4)与化磁极异常(图 5)的对比结果显示,黄骅坳陷及邻区的模量异常与化极异常特征存在明显差异. 首先,二者的差异在黄骅坳陷区

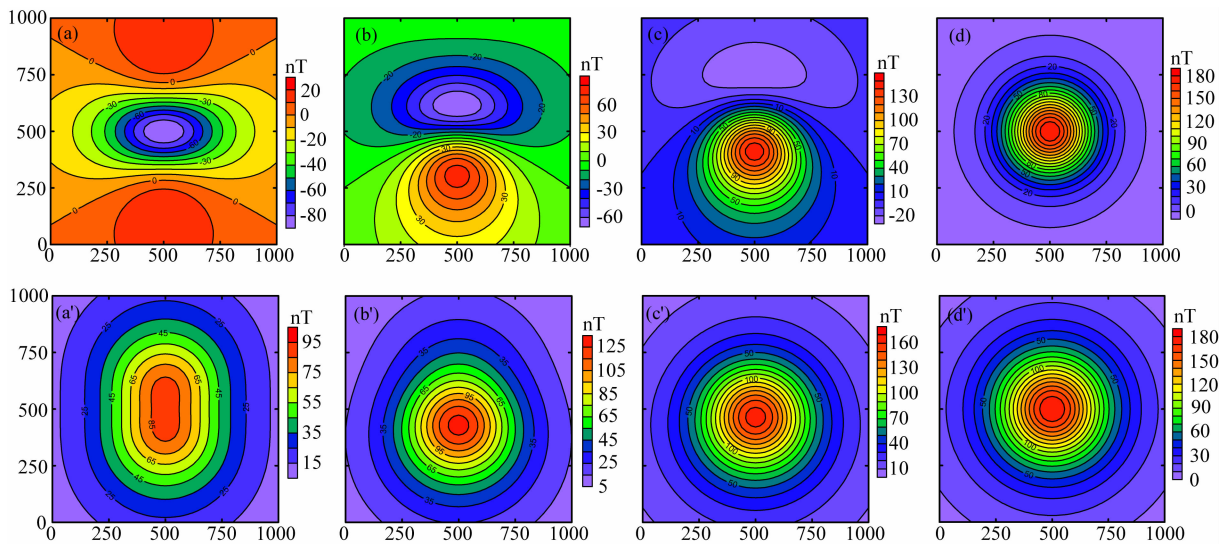


图 3 不同磁化方向下的磁异常与异常模量

(a—d) 分别为磁化倾角 0° , 30° , 60° , 90° 的正演磁异常。(a'—d') 分别为磁化倾角 0° , 30° , 60° , 90° 的正演磁异常模量.

Fig. 3 Total-field anomalies and their amplitude data from forward modeling with different magnetization directions

(a—d) Magnetic anomalies for inclination 0° , 30° , 60° , and 90° ; (a'—d') Corresponding amplitude data.

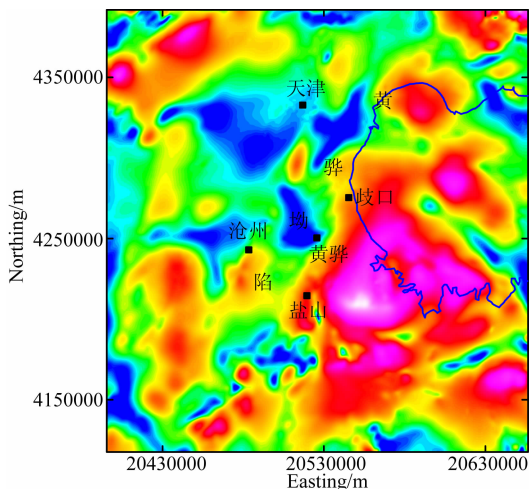


图 4 黄骅坳陷及邻区磁异常模量图

Fig. 4 Amplitude data calculated from total-field anomalies of Huanghua depression and adjacent areas

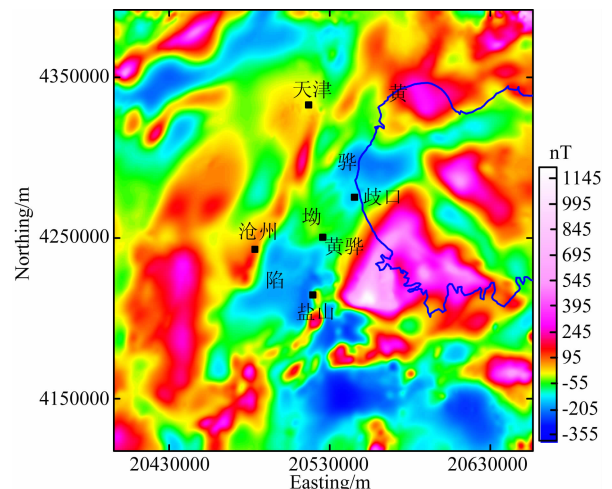


图 5 采用地磁场方向化极后的磁异常图

Fig. 5 Magnetic anomalies after reduction to the pole by erroneously assuming the total magnetization direction is the same as the direction of inducing field

最为明显,异常模量的总体面貌呈现东西分带、南北分区的特点,完全不同于化磁极异常中的 NE 向宽缓负异常形态.在异常模量图中(图 4),海岸线西段至歧口—黄骅—盐山一线成为模量异常东西分带的界线,此处的模量异常表现为梯级带异常特征.拗陷东区模量异常幅值较高,约为 100~300 nT;拗陷西区模量值偏低,在 100 nT 左右的背景异常上 NE 向排列着四个高低相间的模量异常圈闭,局部模量值较高的区域集中在沧州以南和增福台附近,表现出南北分区的特点.而化极磁异常则表现为以海岸线西段至歧口—黄骅一线为中心的 NE 向宽缓低值负异常带.此外,黄骅拗陷邻区的模量特征与化极异常也存在较大差异.东侧的埕宁隆起及以北地区的高值模量异常范围显著增大,150 nT 模量等值线圈闭的范围与化极异常中埕宁隆起高值磁异常范围相比,向北、西、南三侧明显外扩,其中北、西两侧的范围扩大直接改变了黄骅拗陷东区的异常形态特征,最典型的地区包括歧口—黄骅—盐山一线.黄骅拗陷西侧的沧县隆起区模量异常值总体降低,且南北分区更为明显,其南段模量异常呈 NS 走向,模量值变化为 100~200 nT,北段异常呈 NNE 走向,模量变化范围约为 0~100 nT,天津西南侧的低值圈闭范围较大;其次,黄骅拗陷北侧的燕山地区,高值模量圈闭与化极异常中较大范围的高值正异常相比范围明显缩小.

基于如上差异,结合本区结晶基底存在较大磁性差异的物性认识,以及可能经历的三分基底拼合的复杂演化历程,认为黄骅拗陷及邻区磁异常不同程度地受剩磁影响或因构造变动等因素使总的磁化

方向发生变化.此时如果基于假设剩磁不存在且采用单一磁化方向的化极结果进行地质解释可能会产生较大误差,因此本文采用磁异常模量数据进行横向构造转换带的识别与基底结构探讨.

4.3 区域横向构造转换带识别

黄骅盆地主要由一系列近 NE 向的沉积凹陷与凸起构成,在横向上同时出现近 NW 向的盖层断裂带及基底隆升带组成的区域性构造转换带,该系列转换带控制了盆地的差异性伸展与沉降,从而与 NE 向伸展构造体系一起将整个盆地分割为不同单元、不同层次、不同性质的断块体(Wu and Qi, 1999).由于区域横向构造转换带两侧的伸展与沉降幅度不同,使其两侧地层产状或岩石物性(如密度或磁性)产生差异,或者沿转换带伴有次生雁列断层、褶皱或岩浆活动,区域性构造转换带引起的重磁异常特征较为明显,如沿主体异常走向的异常分区、与主体异常走向高角度相交的线性梯度带、主体异常轴向的错断或圈闭异常的突变等往往是横向构造转换带的重要标志.

为识别黄骅拗陷内区域横向转换构造带及隐伏深断裂,本文首先基于布格重力异常的线性特征勾画出控制黄骅盆地主体构造走向的东西边界断裂.此后利用滤波、延拓等方法对重磁异常进行多尺度分离,并计算不同尺度的磁异常模量.此后基于较大尺度的区域磁异常模量和区域重力异常的梯度特征及线性构造增强效果,识别出 5 条与黄骅拗陷 NE 向优势构造近垂直相交的区域横向构造转换带,以及两条呈“T”型展布的隐伏深断裂,见图 6.

图 6a 为向上延拓 10 km 的区域重力异常,图

表 2 黄骅拗陷横向构造转换带划分表

Table 2 Subdivision of traversal tectonic transform zones

| 构造转换带 | 重磁异常特征 | 重磁梯度与线性构造增强特征 |
|------------|---|--|
| 汉沽构造转换带 | 构造带两侧重磁异常分区明显,北侧为高重力异常、低磁模量异常;南侧为低重力异常、高磁模量异常; | 构造带两侧重磁梯度异常走向不同,北侧以 NE 为主,南侧 EW 向明显; |
| 海河—新港构造转换带 | 构造带处于黄骅拗陷北部低重力异常轴线明显错动的部位,两侧的磁模量异常特征也明显不同,是拗陷中区与北区的主要分界; | 构造带两侧重磁梯度异常特征不同,北侧重力梯度大、走向清晰,南侧无明显异常;磁模量梯度异常在构造转换带附近呈近 EW—NEE 走向,其南侧 NS 走向明显; |
| 羊三木构造转换带 | 构造带处于两侧重力异常圈闭的过渡带,此处的低磁模量异常(黄骅西侧)与高磁模量异常(歧口东侧)分区明显,成为黄骅拗陷中部划分中区与南区的构造带; | 构造带两侧重磁梯度异常差异明显,南侧重力梯度异常在拗陷内呈近 EW 向,拗陷东部呈环状,北侧异常不明显;磁模量梯度异常表现为北侧以 NS 走向为主,南侧的 NS 向和 EW 向异常在拗陷及东侧埕宁隆起区交叉形成网状圈闭异常; |
| 南皮构造转换带 | 构造带处于南皮拗陷低重力异常圈闭宽窄变化处,其东侧延伸至两个高重力异常的分界处;此外,构造带南北两侧的磁模量异常主体特征差异明显; | 构造带两侧重磁梯度异常特征不同,北侧重力梯度异常复杂,南侧单一(NE 向为主);此外,南北两侧磁模量梯度异常相比,南侧亦相对简单,以 NE 向为主; |
| 东光构造转换带 | 构造带南北两侧重力异常特征明显不同,北侧为 NE 向两高夹一低的线性异常,南侧为宽缓低重力异常.构造带处的磁模量异常在西端呈现异常轴线错动、东端为高低磁模量异常分区; | 构造带南北两侧重磁梯度异常总体面貌不同,北侧重磁梯度异常明显且面貌复杂,南侧梯度异常更为简单. |

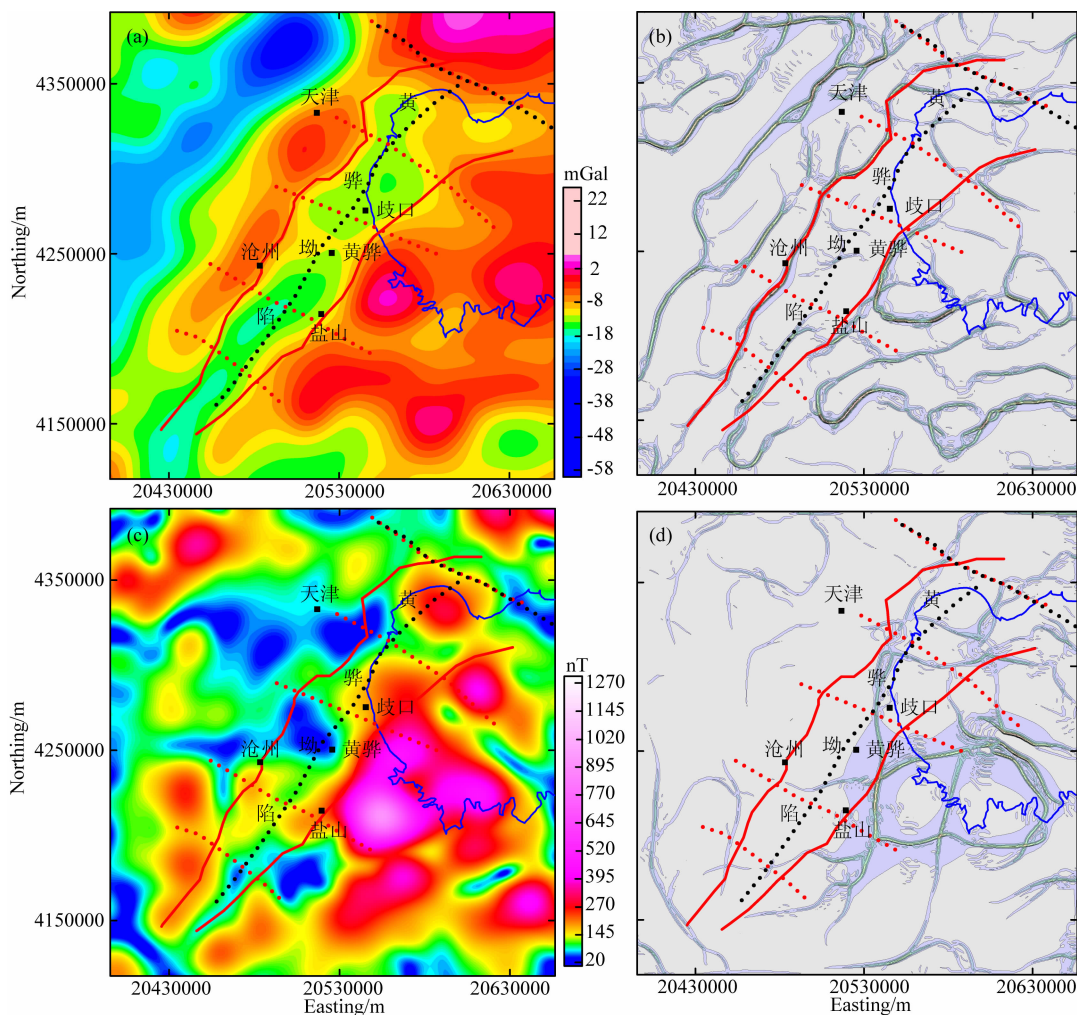


图 6 (a)向上延拓 10 km 的重力异常. (b)区域重力异常水平梯度的线性构造增强特征. (c)正则化滤波提取的区域磁异常模量. (d)区域磁异常模量水平梯度的线性构造增强特征
图中红色实线为边界断裂,红色虚线为横向构造转换带,黑色虚线为深断裂.

Fig. 6 (a) Gravity anomalies after upward continuation by 10 km. (b) Enhanced horizontal gradient modulus of gravity anomalies in (a). (c) Amplitude data calculated from regional magnetic anomalies after regularized filtering. (d) Enhanced horizontal gradient modulus of magnetic anomalies in (c)

Red lines denote faults delineating the boundary of Huanghua depression. Dotted red lines denote the locations of a series of tectonic transform zones. Dotted black lines indicate deep faults.

6b 为线性构造增强后的重力异常水平梯度特征. 图 6c 为基于正则化滤波尺度 25km 的区域磁异常计算的异常模量, 图 6d 为该模量经线性构造增强后的水平梯度特征. 综合分析图 6a—6d 中反映构造转换带的主要重磁标志(见表 2), 并参考黄骅盆地平衡剖面计算的区域性构造转换带及两侧的伸展量与沉降幅度(Wu and Qi, 1999), 由北至南划分出五条横切整个盆地 NW 走向的区域横向构造转换带: 汉沽构造转换带、海河—新港构造转换带、羊三木构造转换带、南皮构造转换带、东光构造转换带.

此外, 根据磁异常模量东西分带的特点(图 6c—

6d 和图 8), 推测黄骅盆地中部存在 NE 向的隐伏深断裂, 其北端重磁异常分区边界处存在 NW 向隐伏深断裂, 两条深断裂与区域横向构造转换带共同控制了黄骅盆地“东西分带、南北分区”的构造格局.

为了解区域横向构造转换带、深断裂与盆地浅部构造单元的展布关系, 我们将识别出的区域横向构造转换带、深断裂与反映浅部构造信息的剩余磁异常模量和总场异常模量的水平梯度异常进行叠合分析, 见图 7. 图 7a 为正则化滤波提取的剩余磁异常模量与如上构造的叠合结果, 图中显示黄骅坳陷及邻区剩余异常模量的分区边界与 5 条横向构造转

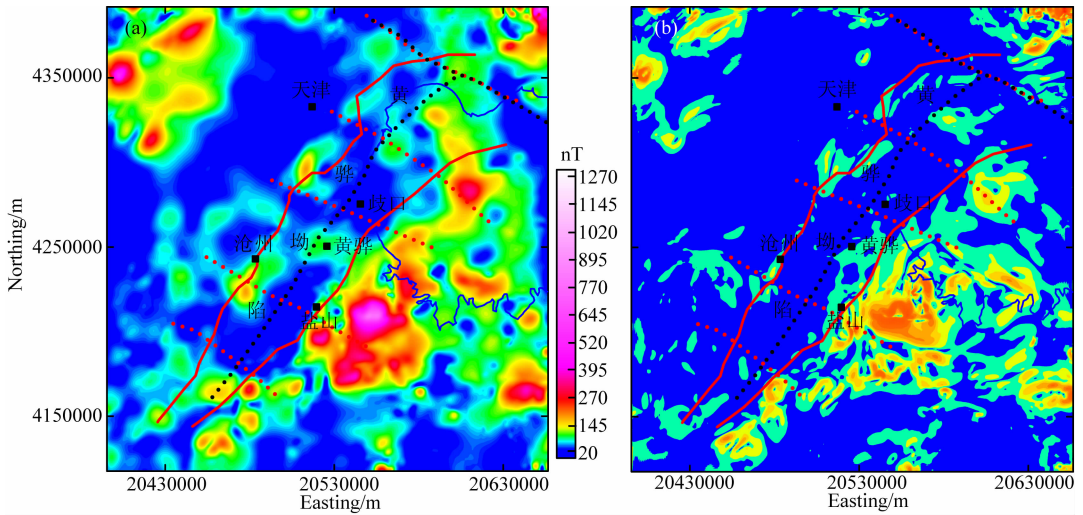


图 7 (a)正则化滤波提取的剩余磁异常模量;(b)总场异常模量的水平梯度

图中红色实线为边界断裂,红色虚线为横向构造转换带,黑色虚线为深断裂。

Fig. 7 (a) Amplitude data calculated from residual magnetic anomalies through regularized filtering;

(b) Horizontal gradients of amplitude calculated from total-field anomalies

Red lines show faults delineating the boundary of Huanghua depression. Dotted red lines show the locations of tectonic transform zones. Dotted black lines show deep faults.

换带及深断裂吻合较好。图 7b 为总场异常模量的水平梯度特征,图中 NE 向高值梯度异常与黄骅坳陷边界断裂位置一致,坳陷内梯度异常显示横切 NE 向主体异常的横向分区,异常分区边界与横向构造转换带的展布位置较吻合。此外,图 7a 和图 7b 的异常面貌均宏观显示三分性特征,除沿沧县隆起一线零星分布小型相对高值异常外,黄骅坳陷及西部地区剩余异常模量及水平梯度异常平静且幅值低;黄骅坳陷以东地区剩余异常模量及水平梯度幅值高且变化大。此外,研究区东北角的燕山地区梯度异常变化剧烈。如上剩余异常模量及总场异常模量的梯度特征显示出的宏观三分性,为分析研究区基底结构及区域转换构造带的成因提供了线索。

4.4 基底三分结构探讨

前寒武纪结晶基底是构成本区区域磁异常的主要地质因素,据区域磁异常的模量特征可以大致了解结晶基底的磁性结构差异及展布特征。

图 8 为基于正则化滤波提取的区域磁异常计算的磁异常模量。区域磁异常模量总体面貌呈现明显的分区性,推测与三类磁性不同的结晶基底岩系有关,黄骅坳陷夹持于太行基底、鲁西基底和燕辽基底的拼合处。西部太行基底区的磁异常模量总体沿 NNE 和近 SN 向延伸,模量异常宽缓,幅度为 0~120 nT;东部鲁西基底区模量值高且变化剧烈,变化幅度为 150~1300 nT,异常无明显走向;东北部的燕辽基底区,异常近 WE 走向且变化相对平缓,

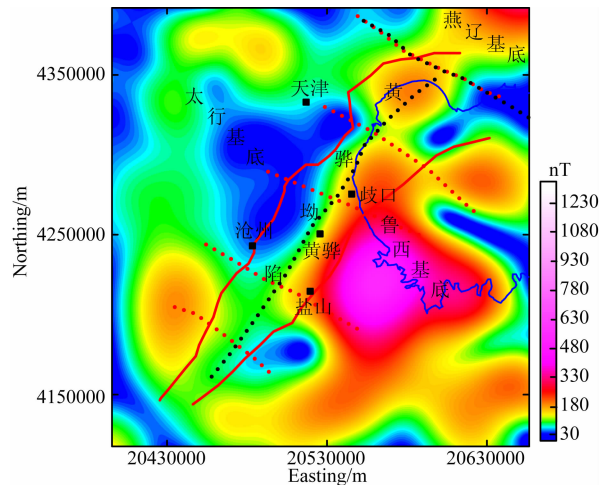


图 8 正则化滤波提取的区域磁异常模量

图中红色实线为边界断裂,红色虚线为横向构造转换带,黑色虚线为深断裂。

Fig. 8 Amplitude data calculated from regional total-field anomalies with regularized filtering

Red lines show the faults delineating the boundary of Huanghua depression. Dotted red lines show the locations of a series of tectonic transform zones. Dotted black lines show deep faults.

模量值低于 220 nT。

据黄骅坳陷结晶基底三分性的分区特征,推测“T”型展布的深断裂可能为三分基底的拼合线。此外,在东西分区的背景之上,沿 NE 向叠加了一系列较小规模的异常,异常分区边界多呈 NW 向,推测存在多条 NW 向基岩断裂,其位置与区域横向构造转换带相当,这与区域横向构造转换带往往发生在

盆地基底的薄弱地带有关(Wu and Qi, 1999), 见图 8.

4.5 横向构造转换带与基底结构对沉积作用的控制

黄骅拗陷的基底结构、深断裂及区域横向构造转换带共同控制了盆地的构造格局及沉积作用. 据地震、重磁等综合地球物理资料揭示的黄骅拗陷新生代与前新生代沉积地层的埋深与厚度特征(Li et al., 2010), 与深断裂及区域横向构造转换带构造的叠合结果可以清晰地反映这一控制与影响作用, 见图 9.

图 9a 为地震资料提取的第三系基底埋深, 反映了第三纪沉积盆地的沉积范围和盆内东西分带、南北分块的构造格局, 各沉积单元与横向构造转换带和深断裂所分割围限的范围相一致. 汉沽构造转换带与海河—新港构造转换带之间为黄骅拗陷北区的沉积范围, 沉积地层厚度小, 基底埋深浅; 海河—新港构造转换带与羊三木构造转换带控制了中区的沉积范围, 同时被 NE 向深断裂分为东西两区, 其中位于东区的歧口凹陷是最大的沉积单元, 沉积厚度达 12500 m; 此外, 羊三木构造转换带与南皮构造转换带之间控制了南区的沉积范围, 同时被 NE 向深断裂分为西部的南皮凹陷和东部的盐山凹陷两个沉积单元. 图 9b 为重磁反演的地震资料控制区前新生代界残留地层厚度, 盆地地区残留地层厚度变化大, 具有多个沉积区域, 呈现出东西两带、南北三区的特点, 其中残留地层厚度较大的区域主要集中在羊三木构造

带与南皮构造带之间的南区, 黄骅以南和以北各有一处较大范围的沉积区域, 黄骅至盐山的沉积区主体位于 NE 向深断裂的东侧. 羊三木构造带与海河—新港构造带之间的中区残留地层厚度较小, 局部较厚的沉积区多处于 NE 向深断裂西侧, 深断裂以东的歧口及东部地区地层厚度小. 此外, 海河—新港构造带以北的北塘地区残留地层厚度较大. 如上被横向构造转换带与深断裂分割的多个沉积单元展布特征, 充分体现了深部构造对浅部构造单元的控制与影响作用.

5 结论与认识

基于研究区结晶基底的区域磁性差异及前人对三分基底拼合的构造演化认识, 通过磁异常模量特征与化磁极异常的对比, 推测研究区磁异常受剩磁影响或构造变动等因素使磁化方向不单一. 在此情况下, 采用对磁化方向依赖性小的磁异常模量数据, 结合重力数据, 对黄骅拗陷横向构造转换带及盆地基底结构进行了研究.

识别出研究区内与优势构造走向高角度相交的五条 NW 向的区域横向构造转换带, 构造转换带主要位于基底薄弱部位, 直接影响着盆地构造单元与沉积单元的展布.

磁异常模量特征反映研究区基底具有三分性结构, 推测呈“T”型展布的两条深断裂为三分基底的

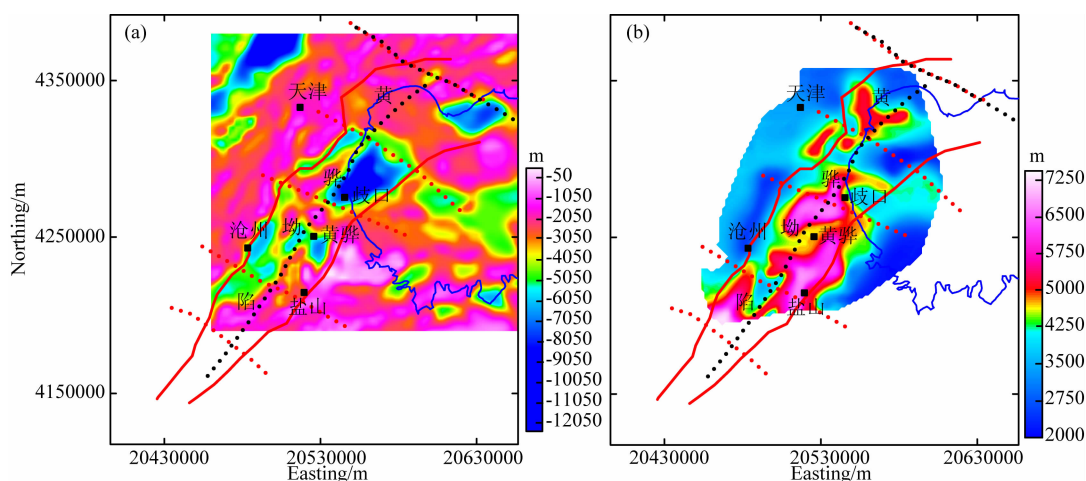


图 9 (a)第三系基底埋深与深部断裂构造叠合图; (b)前新生代地层厚度与深部断裂构造叠合图(Li et al., 2010)

图中红色实线为边界断裂, 红色虚线为横向构造转换带, 黑色虚线为深断裂.

Fig. 9 (a) Tectonic transform zones and deep faults superimposed on the map of Tertiary basement; (b) Tectonic transform zones and deep faults superimposed on the map of residual thickness distribution of pre-Cenozoic group (Li et al., 2010).

Red lines show the faults delineating the boundary of Huanghua depression. Dotted red lines show the locations of a series of tectonic transform zone. Dotted black lines show deep faults.

拼合线,区域上与聊兰断裂北支及张家口—蓬莱断裂系天津段相对应。这种基底结构的差异及受其控制和影响的区域横向构造转换带,对黄骅盆地“南北分区,东西分带”的宏观构造格局具有重要的控制作用。

致谢 感谢科罗拉多矿业学院地球物理系(Department of Geophysics at Colorado School of Mines)和重磁电研究中心(CGEM)为第一作者提供的访问交流机会。

References

- Du X D, Lu K Z, Fu L X. 2000. Evolution and tectonic characteristics of the Mesozoic basin in Dagang prospect area. *Experimental Petroleum Geology* (in Chinese), 22(2): 125-130.
- Haney M M, Johnston C, Li Y G, et al. 2003. Envelopes of 3D and 3D magnetic data and their relationship to the analytic signal: Preliminary results. 73rd Annual International Meeting, SEG. Expanded Abstracts, 592-595.
- Hao T Y, Xu Y, Zhou L H, et al. 2008. Integrated geophysical research on macroscopic distribution of Pre-Cenozoic residual basins—A case in Dagang area. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 51(2): 491-502.
- Hu G M. 1999. Precambrian basement structure and continental platform evolution in the north margin area of the China platform. *Contributions to Geology and Mineral Resources Research* (in Chinese), 9(3): 1-9.
- Jia S X, Zhang X K, Fang S M. 2001. Research on the crustal structure and evolution of different blocks in north China rift-depression basin. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 8(2): 259-266.
- Li Y G, Shearer S, Haney M, et al. 2010. Comprehensive approaches to 3D inversion of magnetic data affected by remanent magnetization. *Geophysics*, 75(1): L1-L11.
- Li S L, Meng X H, Fu L X, et al. 2010. Research on pre-Cenozoic residual basin structure and basement property of Huanghua Depression. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 53(9): 2204-2212.
- Li J H, Qian X L, Huang X N, et al. 2000. Tectonic framework of North China Block and its carbonization in the early Precambrian. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 16(1): 1-10.
- Li H G, Du X D, Lu K Z, et al. 1999. Evolution and structural characteristics of the Mesozoic era in the central-west. *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 23(3): 1-5.
- Liu L F, Hao T Y, Jiang W W, et al. 2003. Comprehensive geophysics research in Dagang prospecting area. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 18(2): 317-322.

- Pedersen L B. 1978. Wavenumber domain expressions for potential fields from arbitrary $2-2\frac{1}{2}$ - and 3-dimensional bodies. *Geophysics*, 43(3): 626-630.
- Stavrev P, Gerovska D. 2000. Magnetic field transforms with low sensitivity to the direction of source magnetization and high centricity. *Geophysical Prospecting*, 48(2): 317-340.
- Wu G H, Qi J F. 1999. Characteristics and origin of first order transfer zones in Huanghua basin. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 20(2): 125-128.
- Xu Y, Hao T Y, Dai M G, et al. 2007. Integrated geophysics research on distribution of residual basins of Bohai Sea. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 50(3): 868-881.
- Zhai M G, Guo J H, Zhao T P. 2001. Study advances of Neoproterozoic-Paleoproterozoic tectonic evolution in the North China Craton. *Progress in Precambrian Research* (in Chinese), 24(1): 17-27.
- Zhou L H, Li S Z, Zhao G C, et al. 2004. Gravity and magnetic features of crystalline basement in the central and Eastern North China Craton. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 19(1): 91-99.

附中文参考文献

- 杜旭东, 陆克政, 付立新. 2000. 大港探区中生代盆地构造特征及演化. *石油实验地质*, 22(2): 125-130.
- 郝天珧, 徐亚, 周立宏等. 2008. 前新生代残留盆地宏观分布的综合地球物理研究——以大港地区为例. *地球物理学报*, 51(2): 491-502.
- 胡桂明. 1999. 华北陆台北缘前寒武纪基底构造与陆台演化. *地质找矿论丛*, 9(3): 1-9.
- 嘉世旭, 张先康, 方盛明. 2001. 华北裂陷盆地不同块体地壳结构及演化研究. *地学前缘*, 8(2): 259-266.
- 李淑玲, 孟小红, 付立新等. 2010. 黄骅坳陷前新生代残留盆地结构与基底性质研究. *地球物理学报*, 53(9): 2204-2212.
- 李江海, 钱祥麟, 黄雄南等. 2000. 华北陆块基底构造格局及早期大陆克拉通化过程. *岩石学报*, 16(1): 1-10.
- 李洪革, 杜旭东, 陆克政等. 1999. 渤海湾地区中西部中生代构造特征及演化. *石油大学学报(自然科学版)*, 23(3): 1-5.
- 刘丽峰, 郝天珧, 江为为等. 2003. 大港探区综合地质地球物理研究. *地球物理学进展*, 18(2): 317-322.
- 邹光辉, 漆家福. 1999. 黄骅盆地一级构造变换带的特征与成因. *石油与天然气地质*, 20(2): 125-128.
- 徐亚, 郝天珧, 戴明刚等. 2007. 渤海残留盆地分布综合地球物理研究. *地球物理学报*, 50(3): 868-881.
- 翟明国, 郭敬辉, 赵太平. 2001. 新太古—古元古代华北陆块构造演化的研究进展. *前寒武纪研究进展*, 24(1): 17-27.
- 周立宏, 李三忠, 赵国春等. 2004. 华北克拉通中东部基底构造单元的重磁特征. *地球物理学进展*, 19(1): 91-99.

(本文编辑 何燕)