

李文正, 焦亚先, 左银辉等. 2014. 沉积速率对渤中坳陷大地热流的影响. 地球物理学报, 57(5):1568-1577, doi:10. 6038/cjg20140520.

Li W Z, Jiao Y X, Zuo Y H, et al. 2014. Effect of deposition rate on geothermal field in Bozhong depression, Bohai Bay Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 57(5):1568-1577, doi:10. 6038/cjg20140520.

沉积速率对渤中坳陷大地热流的影响

李文正^{1,2}, 焦亚先¹, 左银辉^{1,3}, 宋鑫颖¹, 邱楠生¹

1 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249

2 中国石油杭州地质研究院, 杭州 310023

3 成都理工大学能源学院, 成都 610059

摘要 盆地内快速剧烈的构造作用可导致热异常, 在利用盆地热历史揭示深部动力学过程时, 需消除热异常的影响. 本文根据瞬时热传导原理, 校正了渤海湾盆地渤中坳陷低热异常, 准确地约束了盆地深部动力学状态. 对渤中坳陷内 3 口典型井进行热流校正结果表明, 渤中坳陷古近纪以来快速沉积导致其现今($\sim 60.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)未达到热平衡(低热异常). 校正后的热流值平均约为 $67.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 比现今高 $5 \sim 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 利用校正后的热流值计算得到的渤中坳陷的“热”岩石圈的平均厚度约为 70 km, 比修正前的厚度($82 \sim 100 \text{ km}$)减少了 $13 \sim 28 \text{ km}$.

关键词 渤中坳陷; 热流校正; 大地热流; “热”岩石圈

doi:10. 6038/cjg20140520

中图分类号 P314

收稿日期 2013-03-29, 2013-07-19 收修定稿

Effect of deposition rate on geothermal field in Bozhong depression, Bohai Bay Basin

LI Wen-Zheng^{1,2}, JIAO Ya-Xian¹, ZUO Yin-Hui^{1,3}, SONG Xin-Ying¹, QIU Nan-Sheng¹

1 State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

2 PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Hangzhou 310023, China

3 College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract Thermal anomalies can be caused by fast and intensive tectonism in sedimentary basins. And the thermal anomalies should be eliminated when the thermal history is used to provide continuous information on time and space for the geodynamic process at depths. In this paper, based on the dynamic-instantaneous heat conduction theory in solid, geothermal correction of 3 typical wells in Bozhong depression has been modeled. The results indicate that the rapid subsidence in Bozhong depression which started at Paleogene leads to the present geothermal disequilibrium. The average heat flow at present is about $60.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, a higher heat flow $67.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ can be obtained when the geothermal field is on the condition of geothermal equilibrium. The average thermal lithosphere thickness in Bozhong depression is about 70 km, calculated by using the corrected heat flow, which is $13 \sim 28 \text{ km}$ thinner than before ($82 \sim 100 \text{ km}$). The result is consistent with the lithosphere thickness obtained from geophysics and xenoliths.

Keywords Bozhong depression; Thermal correction; Heat flow; Thermal lithosphere

1 引言

沉积盆地的形成与演化是深部岩石圈地球动力学过程的浅部响应,盆地热历史可以为揭示深部动力学过程提供时间和空间上的连续信息。此外,盆地内油气的生成、运移和成藏受盆地的热演化控制;通过对沉积盆地的热史研究,可以为油气的成藏机理、分布及资源评价提供理论依据,指导油气资源的勘探与开发。

盆地内构造演化对地温场有重要影响作用,快速剧烈的构造作用可使盆地内出现热异常,很多学者对此做了大量研究(何丽娟等,1998;王良书等,2002;姚伯初等,2004;邱楠生等,2004;米立军等,2009)。岩浆侵入和断裂活动可造成地温场局部高异常,盆地下伏岩石圈强烈拉张及构造活动造成的高异常甚至可覆盖整个盆地(He et al.,2002);而裂后快速沉积会对盆地浅部温度场起到抑制作用,造成盆地内温度场的非稳态分布、温度降低,进而导致大地热流降低。但是,以往的研究往往忽略了这部分异常对盆地内部热演化造成的影响,这无疑降低了热演化约束深部动力学的准确性。本文利用瞬时热传导机制对快速沉降的渤中拗陷进行热流校正,消除了热异常影响。并在此基础上,探讨其地质意义,以期为深部演化提供更准确的热约束。

2 区域地质概况及现今热状态

渤中拗陷位于华北断块的东部,东临胶辽断隆,是渤海湾盆地陆上三大拗陷(济阳拗陷、黄骅拗陷、辽河拗陷)向海域延伸的汇合区域(米立军和段吉利,2001),面积约 19800 km²。渤中拗陷内构造格局凸凹相间,由 3 个凹陷(庙西凹陷、渤中凹陷和渤东凹陷)和 4 个凸起(渤东低凸起、渤南低凸起、庙西北凸起和庙西南凸起)组成(周心怀等,2010),NNE 向郯庐走滑断裂带穿过渤海湾盆地东南隅——横穿渤中拗陷(图 1)。纵观渤海湾盆地全局地质发展史,从晚元古代至今大体经历了四个不同性质的阶段:中晚元古代至古生代的区域稳定沉积阶段、中生代的隆起褶皱阶段、古近纪的断裂发育阶段和新近纪至今的区域拗陷阶段。古近纪以来渤中拗陷发生了剧烈的断陷拉张,拉张量大,地壳减薄量大(朱伟林等,2009;侯贵廷等,2001;肖国林和陈建文,2003;汤良杰等,2008;漆家福等,1995,2004)。

与此同时渤海湾盆地进入了快速沉降期。其沉积中心不断地迁移,逐渐从盆地边缘迁移到盆地中心的渤中拗陷(郭兴伟等,2007;徐杰等,2004;任凤楼等,2008)。本区新生界地层从下而上依次为:孔店组(Ek)、沙河街组(Es)、东营组(Ed)、馆陶组(Ng)、明化镇组(Nm)及平原组(Qp)。其主力烃源岩层主要为沙河街组和东营组,沙河街组烃源岩处于生烃高峰期,是优质高效的烃源岩;而东营组烃源岩成熟度相对较低(庞雄奇等,2009;邹华耀等,2010;姜福杰等,2010;高喜龙等,2004)。

多年来,随着油气勘探开发的进行,积累了大量的地温资料,这为热史的研究提供了基础。不少学者对渤中拗陷进行了现今地温场及热历史的研究(王良书等,2002;胡圣标等,1999,2001;肖永卫等,2001;邱楠生等,2007,2009;陈墨香等,1984,1988;龚育龄,2003;龚育龄等,2003;付明希等,2004;He and Wang,2003;Hu et al.,2007)。研究结果表明,渤海湾盆地背景热流值较高(~63 mW·m⁻²),统计前人的研究成果及公布的大地热流数据结果表明(图 2),济阳拗陷现今大地热流值最高,约 65.6 mW·m⁻²,黄骅拗陷和辽河拗陷大地热流值几近相同(~63.7 mW·m⁻²),远离盆地中心的冀中拗陷与临清拗陷热流值分别为 61.2 mW·m⁻²和 60.4 mW·m⁻²,而位于盆地东部中心、被构造活动带(郯庐断裂)横穿的渤中拗陷热流值仅为 60.9 mW·m⁻²,属于低热流区。

3 热异常校正

3.1 原理及参数

热量的传递方式有传导、对流和辐射三种方式。沉积盆地中的热量传递主要以传导和对流进行,又以传导为主。地表热流是由地幔供热及地壳生热两部分组成的,在漫长的地质演化过程中,温度场时刻变化,盆地的沉积沉降都是动态的(尤其是快速沉降的盆地),因此必须考虑物质运动这部分动能。根据能量守恒定律可得瞬时热传导方程(Incropera and DeWitt,1996)

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p V \cdot \nabla T = \nabla \cdot (K \nabla T) + Q,$$

式中, ∇ 为哈密顿算子, $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$;Q为内热源(只考虑放射性生热); C_p 为岩石热容,J/(kg·K); T 为温度,K; K 为岩石热导率,W/(m·K); ρ 为岩

石密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; V 为沉降速率, m/Ma .

在一些稳定的克拉通盆地内, 如果沉积沉降速率很小时, 一般可忽略物质运动 ($\rho C_p V \cdot \nabla T$) 造成的影响. 但当沉积速率大于 $250 \text{ m}/\text{Ma}$ 时, “热毯”效应会很明显 (Wangen, 1995), 此时必须考虑物质的动能及热传递的效率. 而对于渤中坳陷新生代沉积速率研究表明, 大多数时期沉积速率超过 $250 \text{ m}/\text{Ma}$, 甚至超过 $500 \text{ m}/\text{Ma}$ (朱伟林等, 2009). 因此, 热校正尤显重要.

本文采用瞬时热传导方程来进行热异常校正, 计算过程中所需的岩石热物理参数皆为前人实测值 (见表 1), V 为地质历史时期, 不同时期的沉降速率, 而地层岩石热容沿用一般文献取值, 新生代地层取 $900 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 基底取 $820 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$.

通过此方程, 利用岩石热物理参数, 便可对由快速沉积引起的低热流现象进行校正. 保持坳陷内基底处热流值恒定, 且坳陷停止沉积和沉降, 在现今地温场的基础上, 对坳陷内地层进行热数值模拟. 当地温场不随时间变化 (假设变化率 $\leq 5\%$), 则说明地温场已达到了平衡, 此时的地温场称为平衡态地温场.

表 1 渤中坳陷新生界岩石热物理参数

Table 1 The thermophysical parameters of rocks in Cenozoic in Bozhong depression

地层	生热率 ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)	热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
Nm+Q	1.17	2.12	1762
Ng	1.17	1.89	1762
Ed	1.14	2.03	1678
Es ₁₊₂	1.31	1.95	2220
Es ₃₊₄ +Ek	1.16	2.12	2190
基底	0.97	2.50	2500

注: 岩石热物理参数参考王良书等 (2002)、陈墨香 (1988) 和龚育龄 (2003) 的研究成果以及中海油天津分公司内部资料.

3.2 校正结果

本文在渤中坳陷选取了 3 口典型井 (BZ6-1-1、PL7-1-1 及 BN5 井) 进行热流校正, 这 3 口井分别位于坳陷中心、低凸起及斜坡带上 (图 1). 3 口井的构造沉降情况如图 3a, 位于沉降中心的 BZ6-1-1 井明显比其他两口井沉降量大. BZ6-1-1 井自沙河街组时期至今一直处于快速沉降, 构造沉降量超过 4000 m ; BN5 井与 PL7-1-1 井在东营组时期进入快速沉降, 但其沉降速率与 BZ6-1-1 井相比相对较低.

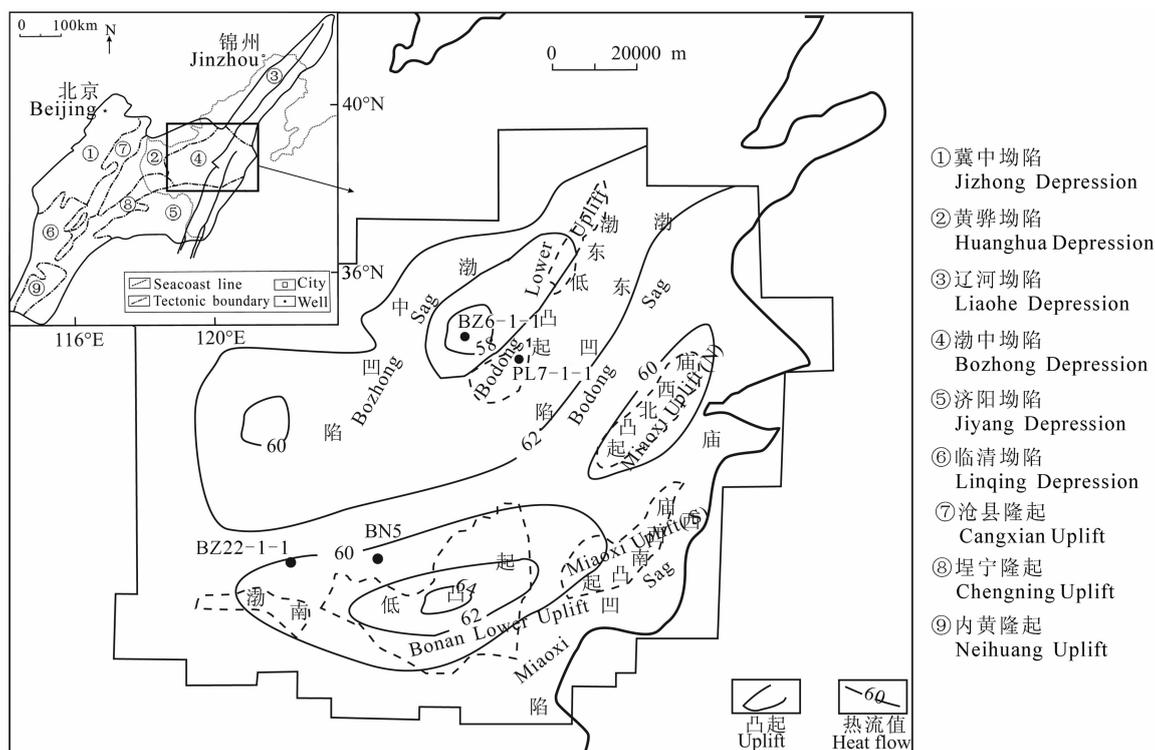


图 1 渤中坳陷热模拟井位及大地热流分布图 (据王良书等 (2002) 和邱楠生等 (2009) 绘制)

Fig. 1 Sketch map of heat flow and locations of thermal modeling wells in Bozhong depression

(The map are plotted based on Wang et al., 2002 and Qiu et al., 2009)

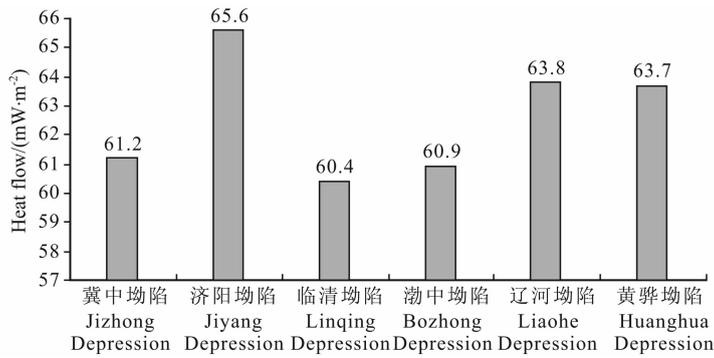


图2 渤海湾盆地各坳陷热流平均值柱状图

Fig. 2 The histogram of the average heat flow in different depression in Bohai Bay Basin

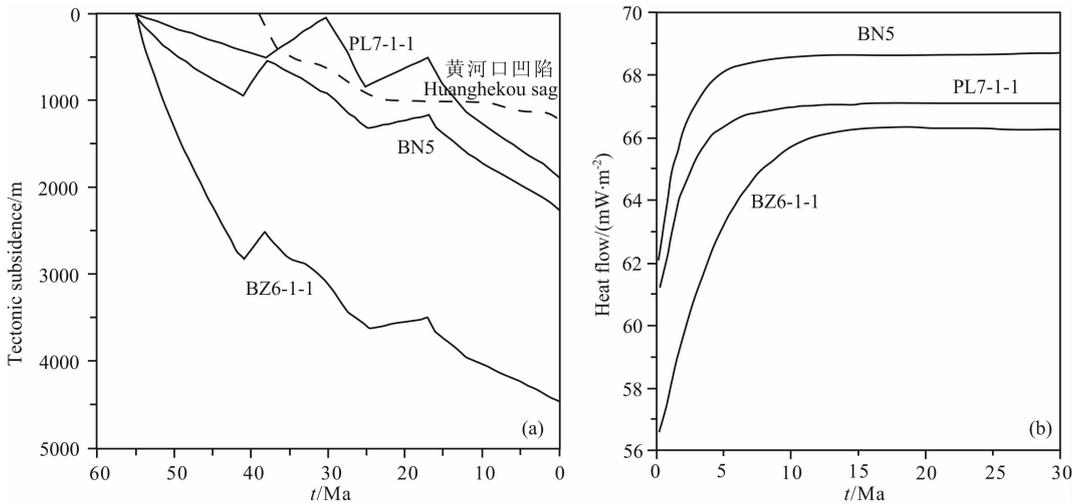


图3 典型井构造沉降演化及热流校正结果

Fig. 3 The evolution of tectonic subsidence and results of thermal correction modeling

以位于坳陷中心的 BZ6-1-1 井为例, 新生界沉积超过 1 万米, 不同地质时期其沉积速率及沉降速率不同(图 3a), 该井的大地热流值为 $56.6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (邱楠生等, 2009). 利用瞬时热传导方程, 保持前新生界基底处热流值恒定, 建立相应的数学模型, 并模拟地温场随时间的变化情况. 热平衡模拟结果表明(图 3b), 随着时间的推移地表热流值在逐渐升高, 速度先快后缓, 大约 10 Ma 内热流值快速升高, 此后缓慢升高. 经过一段时间后, 热流值基本不再变化, 约为 $66.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 这比校正前热流值高了近 $10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$.

同理, 又校正了 PL7-1-1 和 BN5 两口井, 结果如图 3b, 两者的趋势与 BZ6-1-1 井相似. 对于 PL7-1-1 井在现今 $61.2 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 的基础上进行热模拟, 结果表明热流值约为 $67.1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 地温场不再发生变化, 此时热流值比校正前高了 $5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$; 对于 BN5 井, 当地温场不再变化时, 大地热流值从 $62 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 变为了 $68.6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$.

分析上述模拟结果发现, 3 口井的地温场都在一定时期内发生变化, 可推断出在快速沉积的渤中坳陷, 现今的地表热流值($\sim 60.9 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) 还未达到平衡态, 是趋向平衡态的一个过程值, 是不能反映盆地深部热状况的. 造成这种现象的原因是快速沉积及较低的岩石热物理性质, 导致渤中坳陷现今这种内“热”外“冷”的保温杯现象. 热流校正结果显示 3 口井校正后热流值约为 $67.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 比校正前高 $5 \sim 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$.

3.3 沉积速率与热流的关系

一般来说, 对于地温场渐趋平衡的地区, 热流值在纵向上从浅到深是逐渐降低的. 而快速沉积会对盆地浅部温度场起到抑制作用, 造成盆地内温度场的非稳态分布、温度降低, 进而导致热流的纵向分布不符合上述规律.

对于渤中坳陷, 沉积速率对热流值的抑制作用表现如何, 导致其现今的地温场未平衡? 以下将利用表 1 数据进行热模拟, 说明这一关系.

图 4 为基底沉降速率是 100 m/Ma 时, 以 $80 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 为初始地表热流值, 模拟时间为 4 Ma, 不同沉积速率和时间下模拟的热流纵向分布关系图. 结果表明, 当沉积速率为 100 m/Ma 与 200 m/Ma 时(图 4a, 4b), 热流值随深度变化呈近线性关系, 基底与地表热流值相差约 $2.5 \sim 3.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 与实际情况相符. 但当沉积速率大于 300 m/Ma 时, 沉积速率对热流的抑制作用较为突出. 一方面, 热流随深度不再呈线性关系变化; 另一方面, 虽然地层厚度增大(4~5 km), 地表热流值与基底热流值相差却越来越小(相差 $0.5 \sim 1.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)(图 4d, 4e), 甚至基底热流值大于地表热流值, 地温场异常较为突出(图 4e).

因此, 在快速沉积的盆地, 地温场不平衡是存在的. 对于渤中坳陷, 当沉积速率超过 300 m/Ma 时, 会导致地温场的异常扰动, 热平衡被破坏, 造成低热异常, 且沉积速率越大, 热异常越明显, 这与 Wangen(1995)得到的沉积速率界限超过 250 m/Ma 相符. 不同沉积盆地的沉积速率界限不同, 还与沉

积物岩石热物理参数及沉降速率相关, 当沉积速率一定时, 沉降速率越大, 热异常越显著.

4 讨论

对于渤海湾盆地而言, 新生代以来其沉积中心是不断变迁的, 盆地内其他各坳陷在演化过程中, 是否也出现过地温场未平衡, 还有待进一步分析.

4.1 地质事件对地温场的影响

现今热状态未达到平衡并非是渤中坳陷所独有的现象. 南海盆地现今平均热流值高达 $78.3 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (何丽娟等, 1998), 而南海南部大曾母盆地平均热流值更高达 $97 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (姚伯初等, 2004). 南海盆地晚期深部强烈拉张引发的热异常至今未恢复, 新生代的新构造运动引发的岩浆、断裂活动形成的附加热流是南海盆地现今热异常的根本原因(米立军等, 2009). 位于中国西部的柴达木盆地中、新生代沉积较厚, 而现今热流值较高, 平均 $52.6 \pm 9.6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 现今地温分布异常的根本原因是盆

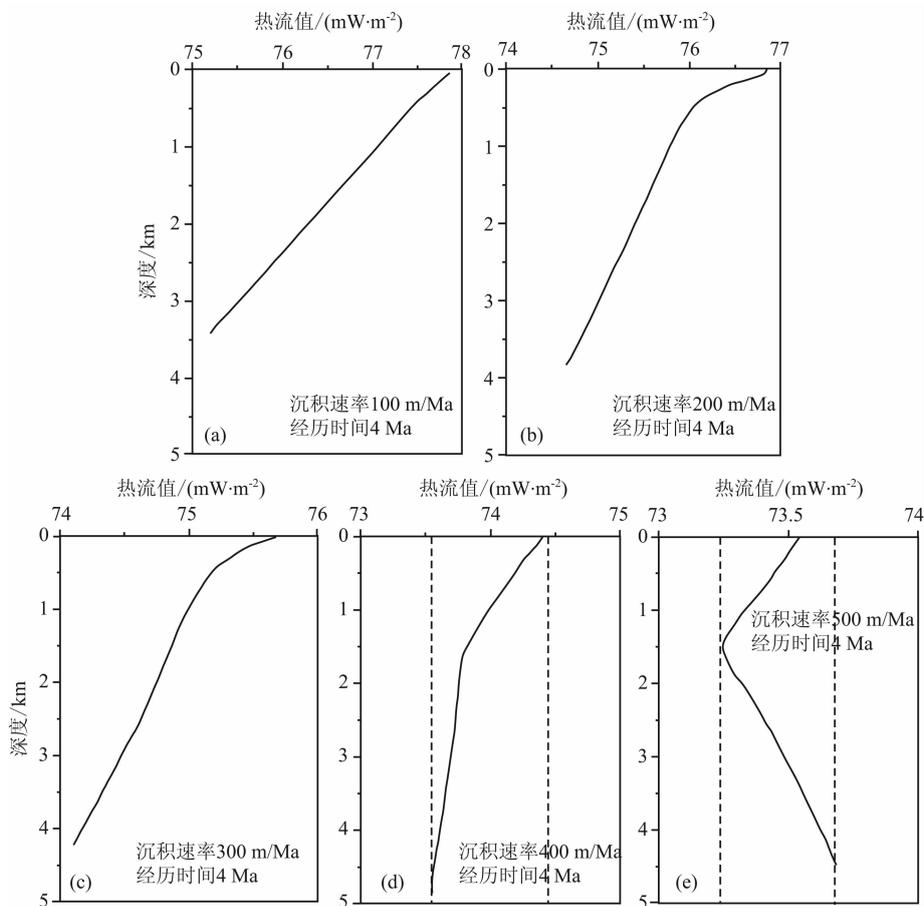


图 4 不同沉积速率模拟的热流纵向分布关系对比(沉降速率为 100 m/Ma)

Fig. 4 The vertical distribution of the heat flow modeling results in the different sedimentation rates and the same subsidence rate of 100 m/Ma

地第三纪末(N_2^3)以后发生的新构造运动、地下水活动和岩浆活动(邱楠生等,2004). 在地质历史时期,一些构造活动强烈的盆地或坳陷(凹陷),地温场一直处于平衡-破坏相互演化的过程. 如渤海湾盆地黄河口凹陷在距今 40—30 Ma 时属于快速沉降阶段,而后沉降缓慢(图 3a)(汤良杰等,2008);相应地,沉积速率除了在 40—30 Ma 时较大外,其余较低(~ 100 m/Ma)(徐佑德,2009). 根据动态-瞬时固体热传导方程,利用上述其临区渤中坳陷的岩石热物理参数,模拟结果表明黄河口凹陷在馆陶组末期(~ 15 Ma)时,地温场就已达到平衡. 黄河口凹陷在沙河街组沉积时期为地温梯度 $50\sim 40$ $^{\circ}\text{C}/\text{km}$,逐渐降低至现今 33 $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (邱楠生等,2007). 当时较高的地温梯度是盆地断裂拉张的结果,随后进入稳定热沉降阶段,地温场逐渐平衡. 盆地热历史可为浅部和深部动力学过程提供连续的约束信息,而在反映动力学过程时,盆地热状态必须是平衡的、稳定的,必须在剔除由构造事件引起的热异常(如岩浆喷发、断裂活动,快速的隆升或沉降等)之后,才能用来准确地揭示浅部和深部动力学连续演化的信息.

4.2 热异常对烃源岩成熟度演化的影响

温度是烃源岩的演化最主要的控制因素,盆地内地温场的变化直接影响烃源岩的成熟度. 图 5 为渤中坳陷 BZ22-1-1 井热平衡前(实线 *a*)后(实线 *b*)的镜质体反射率(R_o)拟合与实测值结果. 在现今地温场下,实测 R_o 值与拟合值吻合得较好(实线 *a*),现今 R_o 值亦未超过 1.3% ;实线 *b* 为热平衡恢复后的拟合结果, R_o 拟合值明显的比实测值偏高,烃源岩成熟度变高,大量生烃期可能发生提前. 这充分地说明了渤中坳陷低热流异常对烃源岩成熟的影响.

郯庐断裂带横穿渤中坳陷(图 1),其活动对两边分布的烃源岩的成熟度演化具有控制作用(肖永卫等,2001). 深部地质特征研究表明,古近纪晚期郯庐断裂带的深切使得底部岩浆上涌(薄景山等,1997),使得地层经历一次热流高峰($70\sim 90$ $\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$)(Hu et al.,2001),这为烃源岩的演化提供了大量的热源,促进了烃源岩在东营组沉积时期及馆陶组沉积期的快速演化(Zuo et al.,2011). 古近纪以来,随着渤海湾盆地快速拉张断裂成盆,渤中坳陷逐渐成为拉张断裂中心及沉降中心. 渤中坳陷接受了大量沉积,一方面使得地层埋深增大,各烃源岩层温度升高,加速成熟度演化;且剧烈的拉张使得

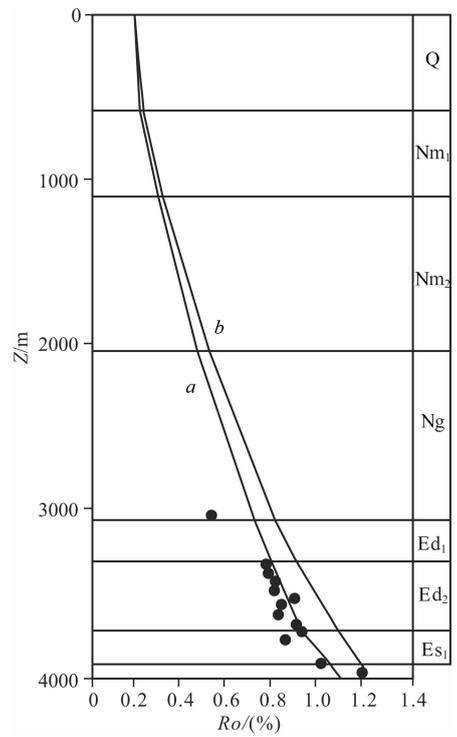


图 5 渤中坳陷 BZ22-1-1 井拟合(实线)和实测(\cdot)镜质体反射率比较

a, *b* 线分别为热校正前后的镜质体反射率拟合结果.

Fig. 5 The comparison between fitted (the solid line) and measured R_o values (\cdot) of well BZ22-1-1 *a* and *b* show the results of fitted R_o values before and after thermal correction.

地壳减薄,深部热源不断高效地对地层进行“烘烤”,热量充足,使得新生界沉积的烃源岩层快速演化. 另一方面,快速的沉积堆积了大量的“冷”的物质,不断地消耗着来自深部的热量,是否也抑制着烃源岩成熟度的演化? 使得东营组大部分烃源岩成熟较低?

4.3 “热”岩石圈厚度的校正

地热学中把以热传导为主的岩石圈层与以热对流为主的下伏软流层之间的界面定义为“热”岩石圈界面,即热岩石圈厚度指以热传导方式进行传热的固体岩石圈层(Morgan,1984). 根据一维热传导方程即可得到地温随深度变化的分布曲线,其与上地幔干玄武岩固相线或地幔绝热线的交点即为“热”岩石圈厚度.

$$T_i^F = T_i^{\pm} + (q_i^{\pm} \cdot Z_i)/K_i - (A_i \cdot Z_i^2)/(2K_i),$$

式中, i 为构造层层数,取自然数; Z_i 为第 i 层的厚度, km; T_i^{\pm} 、 T_i^F 分别为第 i 构造层上、下界面的温度, $^{\circ}\text{C}$; A_i 为第 i 层的岩石生热率, $\mu\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$; K_i 为第 i 层岩石热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$.

对于地幔绝热线, 本文取 $T_1 = 1200 + 0.5Z$ 和 $T_2 = 1300 + 0.4Z$ 这两条绝热线分别作为“热”岩石圈底面温度的上限和下限 (Artemieva and Mooney, 2001). 实际计算过程的参数见表 2. 其中沉积盖层以下, 上地壳生热率采用指数衰减模型: $A = A_0 \times \exp(-Z/D)$ (Ketcham, 1996), D 为放射性元素富集的特征厚度, A_0 为近地表生热率, 取 $1.24 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$. 此外, 计算“热”岩石圈厚度还需要地表热流值, 地表温度一般取 15°C .

表 2 渤中坳陷各构造层岩石生热率和热导率

Table 2 Rock heat production rate and thermal conductivity of each tectonic layer in Bozhong depression

构造层	平均厚度 (km)	热导率 ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$)	生热率 ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)
Qp	0.53	2.12	1.17
Nm	1.67	2.12	1.17
Ng	2.38	1.89	1.17
Ed	2.55	2.03	1.14
Es ₁₊₂	0.89	1.95	1.31
Es ₃₊₄ + Ek	1.27	2.12	1.16
基底	2.70	2.50	0.97
上地壳	3.00	2.30	1.24
下地壳	10.00	2.50	0.31
岩石圈地幔	/	3.40	0.03

注: 地壳分层厚度据朱伟林等 (2009), 刘光夏等 (1996), 刘国栋和刘昌铨 (1982); 地壳内各构造层的岩石热导率和生热率据王良书等 (2002), 陈墨香 (1988), 龚育龄 (2003), 刘绍文等 (2005); 岩石圈地幔热导率和生热率参照 Rudnick 等 (1998) 的成果.

以上述热模拟的 3 口井 (BZ6-1-1、PL7-1-1 及 BN5 井) 现今实测平均热流值, 根据一维热传导方程, 利用表 2 中的参数, 计算得到这 3 口井的“热”岩石圈厚度分别为 100、84、82 km. 相应地利用校正后的热流值 ($66.4, 67.1, 68.6 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$), 计算得到的岩石圈厚度却基本相同, 分别为 72、71 及 68 km (图 6 为 BZ6-1-1 井校正前后的“热”岩石圈厚度的情况), 也就是说渤中坳陷“热”岩石圈真实的厚度推测约 70 km, 或者更低. 修正后的“热”岩石圈厚度与地球物理学家利用地震反射波偏移成像技术, 对渤海湾地区岩石圈厚度进行研究, 所揭示出的华北克拉通东部岩石圈厚度 60~80 km 相符 (Chen et al., 2006, 2009; 陈凌等, 2010), 亦与 Xu (2007) 利用岩石捕虏体得出华北克拉通东部现代岩石圈的厚度小于 80 km, 减薄中心岩石圈厚度约 50 km 相一致. 校正前后岩石圈厚度相差 13~28 km, 这对于渤中地区本来就薄的岩石圈来说,

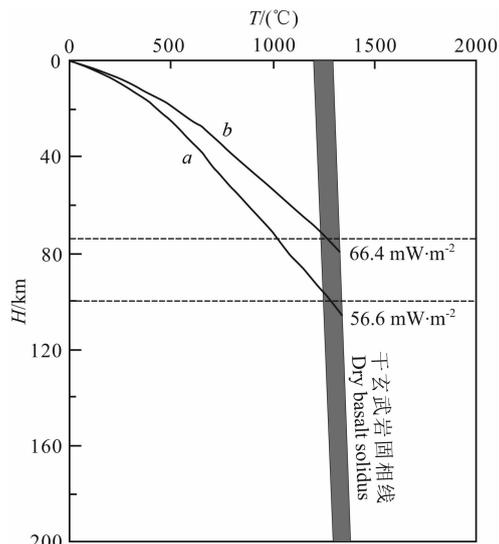


图 6 BZ6-1-1 井热流校正前 (a) 后 (b) “热”岩石圈厚度对比
Fig. 6 The comparison of thermal lithosphere thickness before (a) and after (b) thermal correction in BZ6-1-1 well

无疑是一个重要信息, 对于我们研究地壳深部成因具有深刻的影响意义.

5 结论

渤中坳陷古近纪以来快速的沉积导致其地层现今未达到热平衡, 造成了渤中坳陷现今内“热”外“冷”的保温杯现象. 通过对坳陷内 3 口典型井的热数值模拟, 得到校正后的平均热流值约为 $67.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, 比现今高 $5 \sim 10 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$. 利用校正后的热流值计算得到的渤中坳陷的“热”岩石圈的平均厚度为 70 km, 比校正前的厚度 (82~100 km) 减少了 13~28 km, 这一结果与利用地球物理及地幔包体得到的岩石圈厚度吻合. 未达到热平衡状态的热流值, 不能揭示其深部热动力学状态, 所以在用沉积盆地热状态约束地球深部作用时, 必须剔除浅部影响, 如快速沉积、岩浆上涌等作用, 这样才能更准确地反映出地球深部热状况, 为其提供时间和空间上的连续信息.

致谢 本文的研究过程中, 得到了中国科学院地质与地球物理研究所黄芳和刘琼颖的大力帮助, 在此表示衷心的感谢.

References

- Artemieva I M, Mooney W D. 2001. Thermal structure and evolution of Precambrian lithosphere: a global study. *Journal of Geophysical Research*, 106(B8): 16387-16414.

- Bo J S, Tao X X, Zhou H. 1996. Formation and evolution of Bohai rift system. *Seismological Research of Northeast China* (in Chinese), 12(3): 7-14.
- Chen L, Zheng T Y, Xu W W. 2006. A thinned lithospheric image of the Tanlu Fault Zone, eastern China; constructed from wave equation based receiver function migration. *Journal of Geophysical Research*, 111, B09312, doi: 09310. 01029/02005JB003974.
- Chen L. 2009. Lithospheric structure variations between the eastern and central North China Craton from S and P receiver function migration. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 173 (3-4): 216-227.
- Chen L, Wei Z G, Cheng C. 2010. Significant structural variations in the Central and Western North China craton and its implications for the craton destruction. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 17(1): 212-228.
- Chen M X, Huang G S, Wang J A, et al. 1984. A preliminary research on the geothermal characteristics in the Bohai Sea. *Scientia Geologica Sinica* (in Chinese), (4): 392-401.
- Chen M X. 1988. Geothermics of North China (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Fu M X, Hu S B, Wang J Y. 2004. The transformation of Mesozoic thermal regime in the east of North China and its tectonic significance. *Science in China (D)* (in Chinese), 34(6): 514-520.
- Gao X L, Xiao X M, Zhao B Q, et al. 2004. Petroleum generation history of Lower Tertiary source rocks from the Bozhong Depression of the Bohaiwan Basin. *Acta Sedimentologica Sinica* (in Chinese), 22(2): 359-364.
- Gong Y L, Wang L S, Liu S W, et al. 2003. The characteristics of terrestrial heat flow in the Jiyang Depression. *Science in China (D)* (in Chinese), 33(4): 384-391.
- Gong Y L. 2003. The thermal structure and thermal evolution of Bohai Bay basin, Eastern China [Ph. D. thesis] (in Chinese). Nanjing: Nanjing University.
- Guo X W, Shi X B, Qiu X L, et al. 2007. Cenozoic subsidence in Bohai Bay basin: characteristics and dynamic mechanism. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 31(3): 273-280.
- He L J, Xiong L P, Wang J Y. 1998. The geothermal characteristics in South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 12(2): 87-90.
- He L J, Xiong L P, Wang J Y. 2002. Heat flow and thermal modeling of the Yinggehai Basin, South China Sea. *Tectonophysics*, 351(3): 245-253.
- He L J, Wang J Y. 2003. Cenozoic thermal history of the Bohai Bay Basin: constraints from heat flow and coupled basin-mountain modeling. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(9-11): 421-429.
- Hou G T, Qian X L, Cai D S. 2001. The tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 37(6): 845-851.
- Hu S B, Zhang R Y, Luo Y H, et al. 1999. Thermal history and tectonic-thermal evolution of Bohai basin, East China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 42(6): 748-755.
- Hu S B, Paul B O S, Asaf R, et al. 2001. Thermal history and tectonic subsidence of the Bohai Basin, northern China: a Cenozoic rifted and local pull-apart basin. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 126(3-4): 221-235.
- Hu S B, He L J, Wang J Y. 2001. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition). *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 44(5): 611-626.
- Hu S B, Fu M X, Yang S, et al. 2007. Palaeogeothermal response and record of Late Mesozoic lithospheric thinning in the eastern North China Craton. // Zhai M G, Windley B F, Kusky T M eds. *Mesozoic Sub-Continental Lithospheric Thinning Under Eastern Asia*. London (Spec): Geological Society, 280: 267-280.
- Incropera F P, DeWitt D P. 1996. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 4th ed. New York: John Wiley and Sons.
- Jiang F J, Pang X Q, Jiang Z X et al. 2010. The quality evaluation and hydrocarbon-eapulsion characters of source rocks in the 3rd member of Shahejie Formation in the Bohai sea. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 31(6): 906-912.
- Ketcham R A. 1996. Distribution of heat producing elements in the upper and middle crust of southern and west central Arizona: Evidence from the core complex. *Journal of Geophysical Research*, 101(B6): 13611-13632.
- Liu G D, Liu C Q. 1982. Crust upper mantle structures in northern region of North China and its relationships to Cenozoic tectonic activities. *Science in China (B)* (in Chinese), 12(12): 1132-1140.
- Liu G X, Zhao W J, Ren W J, et al. 1996. A study of the crustal thickness beneath the Bohai Sea. *Geophysical and Geochemical Exploration* (in Chinese), 20(4): 316-317.
- Liu S W, Wang L S, Gong Y L, et al. 2005. Lithospheric thermal-rheological structure and their geodynamic significance in the Jiyang depression. *Science in China (D)* (in Chinese), 35(3): 203-214.
- Mi L J, Duan J L. 2001. Characteristics of middle and shallow strata oil-gas reservoirs and oil-gas accumulation rule in the middle area of Bohai. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 22(2): 32-37.
- Mi L J, Yuan Y S, Zhang G C, et al. 2009. Characteristics and genesis of geothermal field in deep-water area of the northern South China Sea. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 30(1): 27-32.
- Morgan P. 1984. The thermal structure and thermal evolution of the continental lithosphere. // Pollack H N, Murthy V R eds. *Structure and Evolution of the Continental Lithosphere*. Physics and Chemistry of the Earth. 107-193.
- Pang X Q, Guo Y H, Jiang F J, et al. 2009. High-quality source rocks and their distribution prediction in the Bohai Sea waters. *Oil and Gas Geology* (in Chinese), 30(4): 393-397.
- Qi J F, Lu K Z, Zhang Y W, et al. 1995. Relationship between tectonics and hydrocarbon in Bohai Bay basin province. *Journal*

- of the University of Petroleum, China (in Chinese), 19(1): 7-13.
- Qi J F. 2004. Two tectonic systems in the Cenozoic Bohai Bay basin and their genetic interpretation. *Geology in China* (in Chinese), 31(1): 15-22.
- Qiu N S, Hu S B, He L J. 2002. The Theory and Application of Thermal Regime Study of Sedimentary Basins (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 92-109.
- Qiu N S, Su X G, Li Z Y, et al. 2007. The Cenozoic tectono-thermal evolution of depressions along both sides of mid-segment of Tancheng-Lujiang Fault Zone, East China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 50(5): 1497-1507.
- Qiu N S, Wei G, Li C C, et al. 2009. Distribution features of current geothermal field in the Bohai Sea waters. *Oil and Gas Geology* (in Chinese), 30(4): 412-419.
- Ren F L, Liu Z Q, Qiu L G, et al. 2008. Space-time discrepancy of depressional evolution in the Bohai Bay Basin during Cenozoic. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 40(3): 546-557.
- Rudnick R L, McDonough W F, O'Connell R J. 1998. Thermal structure, thickness and composition of continental lithosphere. *Chemical Geology*, 145(3-4): 395-411.
- Tang L J, Wan G M, Zhou X H, et al. 2008. Cenozoic geotectonic evolution of the Bohai basin. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 14(2): 191-198.
- Tian Y, Zhao D P, Sun R M, et al. 2009. Seismic imaging of the crust and upper mantle beneath the North China Craton. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 172(3-4): 169-182.
- Wang L S, Liu S W, Xiao W Y, et al. 2002. The characteristics of terrestrial heat flow in the Bohai Bay Basin. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 47(2): 151-155.
- Wangen M. 1995. The blanketing effect in sedimentary basins. *Basin Research*, 7(4): 283-298.
- Xiao G L, Chen J W. 2003. Oil and gas in Neogene of the Bohai Sea area. *Marine Geology Letters* (in Chinese), 19(8): 1-6.
- Xiao Y W, Wang L S, Li H, et al. 2001. Geotemperature field in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 15(2): 105-110.
- Xu J, Ma Z J, Deng Q D, et al. 2004. Regional tectonic conditions for intensive subsidence of the middle Bohai sea since Oligocene. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 25(5): 11-16.
- Xu Y D. 2009. Relationship between tectonic evolution of the Tan-Lu Fault Zone and adjacent basins [Ph. D. thesis] (in Chinese). Hefei: Hefei University of Technology.
- Xu Y G. 2007. Diachronous lithospheric thinning of the North China craton and formation of the Daxin'anling-Taihuangshan gravity lineament. *Lithos*, 96(1-2): 281-298.
- Yao B C, Wan L, Liu Z H. 2004. Tectonic dynamics of Cenozoic sedimentary basins and hydrocarbon resources in the South China Sea. *Journal of China University of Geosciences (Earth Science)* (in Chinese), 29(5): 543-549.
- Zhou X H, Yu Y X, Tang L J, et al. 2010. Cenozoic offshore basin architecture and division of structural elements in Bohai sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 22(5): 285-289.
- Zhu W L, Mi L J, Gong Z S, et al. 2009. Hydrocarbon Reservoirs and Exploration in the Bohai Sea (in Chinese). Beijing: Science Press.
- Zou H Y, Zhou X H, Bao X H, et al. 2010. Controlling factors and models for hydrocarbon enrichment/depletion in Paleogene and Neogene, Bohai sea. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 31(6): 885-893.
- Zuo Y H, Qiu N S, Zhang Y, et al. 2011. Geothermal regime and hydrocarbon kitchen evolution of the offshore Bohai Bay Basin, North China. *AAPG Bulletin*, 95(5): 749-769.

附中文参考文献

- 薄景山, 陶夏新, 周宏. 1996. 渤海裂谷系的形成和演化. *东北地震研究*, 12(3): 7-14.
- 陈凌, 危自根, 程骋. 2010. 从华北克拉通中、西部结构的区域差异性探讨克拉通破坏. *地学前缘*, 17(1): 212-228.
- 陈墨香. 1988. 华北地热. 北京: 科学出版社.
- 陈墨香, 黄歌山, 汪缉安等. 1984. 渤海地温场特点的初步研究. *地质科学*, (4): 392-401.
- 付明希, 胡圣标, 汪集场. 2004. 华北东部中生代热体制转换及其构造意义. *中国科学(D辑)*, 34(6): 514-520.
- 高喜龙, 肖贤明, 赵必强等. 2004. 渤海湾盆地渤中凹陷下第三系烃源岩生烃史. *沉积学报*, 22(2): 359-364.
- 龚育龄. 2003. 中国东部渤海湾盆地地热结构和热演化[博士论文]. 南京: 南京大学.
- 龚育龄, 王良书, 刘绍文等. 2003. 济阳拗陷大地热流分布特征. *中国科学(D辑)*, 33(4): 384-391.
- 郭兴伟, 施小斌, 丘学林等. 2007. 渤海湾盆地新生代沉降特征及其动力学机制探讨. *大地构造与成矿学*, 31(3): 273-280.
- 何丽娟, 熊亮萍, 汪集场. 1998. 南海盆地地热特征. *中国海上油气(地质)*, 12(2): 87-90.
- 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 2001. 渤海湾盆地中、新生代构造演化研究. *北京大学学报(自然科学版)*, 37(6): 845-851.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集场. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版). *地球物理学报*, 44(5): 611-626.
- 胡圣标, 张荣燕, 罗毓晖等. 1999. 渤海盆地热历史及构造-热演化特征. *地球物理学报*, 42(6): 748-755.
- 姜福杰, 庞雄奇, 姜振学等. 2010. 渤海海域沙三段烃源岩评价及排烃特征. *石油学报*, 31(6): 906-912.
- 刘国栋, 刘昌铨. 1982. 华北北部地区地壳上地幔构造及其与新生代构造活动的关系. *中国科学(B辑)*, 12(12): 1132-1140.
- 刘光夏, 赵文俊, 任文菊等. 1996. 渤海地壳厚度研究. *物探与化探*, 20(4): 316-317.
- 刘绍文, 王良书, 龚育龄等. 2005. 济阳拗陷岩石圈热-流变学结构及其地球动力学意义. *中国科学(D辑)*, 35(3): 203-214.
- 米立军, 段吉利. 2001. 渤中凹陷中浅层油气成藏特点及其聚集规律. *石油学报*, 22(2): 32-37.
- 米立军, 袁玉松, 张功成等. 2009. 南海北部深水地区地热特征及其成因. *石油学报*, 30(1): 27-32.

- 庞雄奇, 郭永华, 姜福杰等. 2009. 渤海海域优质烃源岩及其分布预测. 石油与天然气地质, 30(4): 393-397.
- 漆家福. 2004. 渤海湾新生代盆地的两种构造系统及其成因解释. 中国地质, 31(1): 15-22.
- 漆家福, 陆克政, 张一伟等. 1995. 渤海湾盆地地区新生代构造与油气的关系. 石油大学学报(自然科学版), 19(1): 7-13.
- 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 2004. 沉积盆地热体制研究的理论与应用. 北京: 石油工业出版社, 92-109.
- 邱楠生, 苏向光, 李兆影等. 2007. 郯庐断裂中段两侧坳陷的新生代构造-热演化特征. 地球物理学报, 50(5): 1497-1507.
- 邱楠生, 魏刚, 李翠翠等. 2009. 渤海海域现今地温场分布特征. 石油与天然气地质, 30(4): 412-419.
- 任凤楼, 柳忠泉, 邱连贵等. 2008. 渤海湾盆地新生代各坳陷沉降的时空差异性. 地质科学, 40(3): 546-557.
- 汤良杰, 万桂梅, 周心怀等. 2008. 渤海盆地新生代构造演化特征. 高校地质学报, 14(2): 191-198.
- 王良书, 刘绍文, 肖卫勇等. 2002. 渤海盆地大地热流分布特征. 科学通报, 47(2): 151-155.
- 肖国林, 陈建文. 2003. 渤海海域的上第三系油气研究. 海洋地质动态, 19(8): 1-6.
- 肖卫卫, 王良书, 李华等. 2001. 渤海盆地地温场研究. 中国海上油气(地质), 15(2): 105-110.
- 徐杰, 马宗晋, 邓起东等. 2004. 渤海中部渐新世以来强烈沉陷的区域构造条件. 石油学报, 25(5): 11-16.
- 徐佑德. 2009. 郯庐断裂带构造演化特征及其与相邻盆地的关系 [博士论文]. 合肥: 合肥工业大学.
- 姚伯初, 万玲, 刘振湖. 2004. 南海海域新生代沉积盆地构造演化的动力学特征及其油气资源. 中国地质大学学报, 29(5): 543-549.
- 周心怀, 余一欣, 汤良杰等. 2010. 渤海海域新生代盆地结构域构造单元划分. 中国海上油气, 22(5): 285-289.
- 朱伟林, 米立军, 龚再升等. 2009. 渤海海域油气成藏与勘探. 北京: 科学出版社.
- 邹华耀, 周心怀, 鲍晓欢等. 2010. 渤海海域古近系、新近系原油富集/贫化控制因素与成藏模式. 石油学报, 31(6): 885-893.

(本文编辑 何燕)