

渤海盆地热历史及构造-热演化特征*

胡圣标 张容燕

罗毓晖 蔡东升

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

(渤海石油公司研究院, 天津 300452)

摘 要

渤海盆地大地热流测量和利用磷灰石裂变径迹及镜质体反射率数据进行的盆地热史恢复结果表明: 盆地现今热流值为 $50-75\text{mW/m}^2$, 背景热流值达 63.6mW/m^2 , 而早第三纪沙河街组 and 东营组沉积时 ($25-50\text{Ma}$) 盆地古热流值为 $70-90\text{mW/m}^2$. 盆地构造沉降史分析显示, 盆地(含辽东湾地区和渤海地区)经历了早期的裂谷阶段 ($25-50\text{Ma}$) 和后期的热沉降阶段 ($25-0\text{Ma}$), 其中早期的裂谷阶段包含了两个裂谷亚旋回. 渤海盆地内的后期热沉降叠加了 12Ma 以来由高密度地幔及岩石圈冷却诱发的快速均衡沉降. 渤海盆地现今较低的大地热流值和较高的古热流及典型的裂谷型构造沉降样式等支持了渤海盆地板内裂谷盆地的大地构造属性并为渤海盆地构造-热演化提供了重要认识.

关键词 渤海盆地, 热流, 热史恢复, 构造沉降, 构造-热演化.

1 引 言

地 热 史

渤海盆地位于华北断块区东部、东邻胶辽断隆区, 西为黄骅拗陷的延伸, 北与下辽河拗陷相连, 南与济阳拗陷相接, 是渤海湾含油气盆地的重要组成部分(见图1). 对渤海盆地形成机制及其大地构造与演化属性的认识目前尚存在一定差异, 如地壳双层差异扩张^[1]、裂陷盆地^[2]、拉分盆地^{[1][3]}等.

盆地现今热状态和热历史不仅是研究盆地内烃源层生烃状态的时空分布, 油气运移和储集的重要物理参数, 同时也是盆地构造演化过程的客观反映, 本文在盆地大地热流特征的基础上, 根据利用磷灰石裂变径迹镜质体反射率数据进行的盆地热史恢复结果, 结合盆地构造沉降分析, 讨论了渤海盆地的构造-热演化特征.

2 盆地现今热状态

渤海盆地地温场分析结果^[5]表明, 地温梯度为 $30-37^\circ\text{C}/\text{km}$, 对应热流值为 $50-$

* 国家自然科学基金资助项目(49672169)和中国海洋石油总公司“九五”科技攻关项目(9605-3).

1) 卢华复、胡圣标、王良书等. 渤海盆地热历史、构造-热演化史与断裂活动及油气成藏关系研究. 中国海洋石油总公司“九五”科技攻关项目研究报告, 1998.

本文 1999-05-20 收到修定稿.

63mW/m²的地区占全区总面积的63%;地温梯度为37—45℃/km,对应热流值为63—75mW/m²的地区占全区总面积的26%;地温梯度为45—55℃/km,对应热流值为75—92mW/m²的地区占全区总面积的11%;海域平均地温梯度38℃/km,对应热流值为63.6mW/m²。该热流背景高于前寒武地盾区(约41.8mW/m²)和西侧太行山、燕山山区及鄂尔多斯等构造稳定区^[6],但低于现代大陆裂谷(如贝加尔裂谷:97±22mW/m²)和新生代构造活动区(如美国盆地山脉省、约83mW/m²)^[7];也低于大陆边缘扩张盆地(如南海盆地,中央海盆;平均值为89.9mW/m²(88.5—94.5mW/m²),全盆地平均78.3±22.7mW/m²)^[8]。因此,现今热状态特征表明渤海盆地并非现代裂谷。

盆地内的地温梯度和热流异常的分布主要受隆起与拗陷区热导率横向差异引起的浅层热流再分配和地下水活动的控制。正异常主要出现在隆起区(如海中隆起),它们可能不代表深部热状态,但相对于辽河盆地^[9,10]而言,渤海盆地内地下水活动对热流的干扰明显较小。表现在作为主要含水层的馆陶组砂岩对温度分布控制存在明显差异:下辽河地区馆陶组上、下层位中地温梯度向下增大,渤海地区则相反。

3 盆地热史恢复

3.1 原理方法

在盆地尺度上,热史则可以利用各种古温标(如Ro、裂变径迹、粘土矿物等)来重建。古温标的种类繁多,但利用古温标进行热史恢复的基本方法^[11,12]不外乎以下3类:随机反演法^[13];古地温梯度法和古热流法。这3种方法各有利弊,结合渤海盆地的实际地质条件和古温标数据状况,我们采用古热流法进行热史恢复。

盆地内地层的埋藏史在各剥蚀层剥蚀厚度已知的情况下,可通过现今残留地层厚度的回剥并结合超压技术予以恢复^[14],剥蚀厚度确定是地史恢复的关键所在。如果盆地内岩浆活动不发育,盆地内地层的热历史(地温史)主要受以下4个因素的控制:1)地层的埋藏史(古埋深);2)盆地底部热流史;3)地层热物性(热导率、比热、密度等)参数的变化及4)

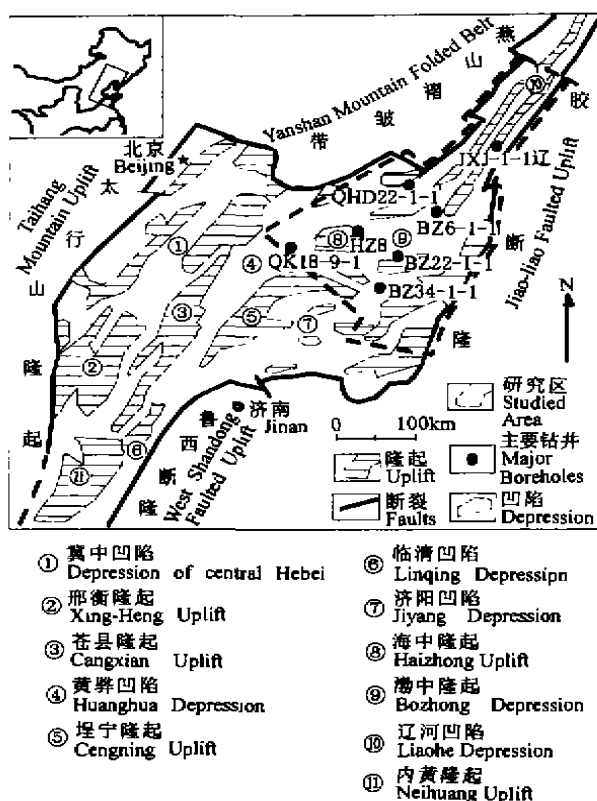


图1 渤海盆地的区域构造背景^[4]

Fig.1 Regional tectonic settings of Bohai Basin^[4]

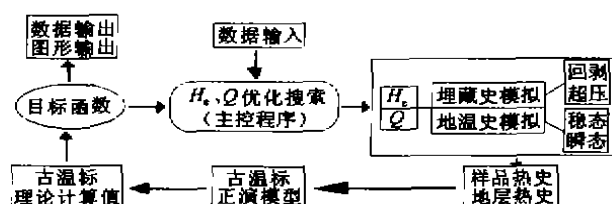


图2 古温标热历史反演的原理流程

Fig.2 Flow chart for the inversion of thermal history reconstruction from thermal indicators

(快速)沉积剥蚀等地质作用的非稳态热效应,其中,后二者又取决于前两个方面的因素,因而前两个方面的因素是地层热史的主导因素,相应地,地层中的古温标也就间接地记录了地层的埋藏史(古埋深或剥蚀厚度)和盆地底部的热流史,古热流法热史恢复原理流程如图2所示。

反演过程中,采用的镜质体反射率正演模型为平行化学反应模型(EASY%Ro)^[15];裂变径迹正演模型为扇形模型^[16]。

首先将模拟的钻井剖面按不整合面分为若干个构造层,每一构造层内保证至多只有两个未知变量:剥蚀厚度 H_e 和剥蚀开始时的热流值 Q_i 。反演时,空间自上而下;时间从今至古,即从最上一个构造层开始反演,由于现今热流和岩石热导率、比热和密度是已知量,反演时间段(t_i)之前 t_{i-1} 段内任意时刻(t)的热流为

$$Q(t) = Q_{i-1}(1 + \beta\Delta t_i), \quad \beta_{i-1} = (Q_i - Q_{i-1})/\Delta t_i.$$

通过二分法和非线性牛顿迭代法对 H_e 和 Q_i 进行迭代,以使第一构造层内实测(用下标o表示)镜质体反射率Ro值和(或)裂变径迹长度分布及径迹年龄与相应的理论计算值(用下标c表示)达到最佳拟合,同时 H_e 和 Q_i 的搜索区间又依据地质参数被限定在适当范围内,当目标函数

$$O = M_{Ro} \sum [(P_o - P_c)/(P_o + P_c)/2]^2 + N_{AFT} \sum [(P_o - P_c)/(P_o + P_c)/2]^2$$

达到最小值, H_e 和 Q_i 即同时被确定,此时地史模拟器和地温史模拟器会自动计算出反演时间段及以后各时刻各地层(包括下伏各构造层)的地温史和埋藏史。目标函数中M和N分别取决于Ro和磷灰石裂变径迹(AFT)数据质量的加权系数($M + N = 1$)。热流史反演的过程中,各构造层间(上构造层对下伏构造层)以及同一构造层内的所有样品间是相互联系和制约的。同时,地史与热史反演又是完全耦合的,这就进一步减少了热史反演的多解性。反演过程采用的计算机软件是借鉴国外同类软件,并通过与澳大利亚La Trobe大学裂变径迹实验室和英国帝国理工学院Kerry博士的合作,在中文Windows平台上开发的“油气盆地热史恢复模拟系统”。

3.2 数据参数

热史反演中要求的数据包括基本参数和基础数据两类。

基本参数 包括岩性参数和现今盆地热流。其中岩性参数包括所含岩性的热导率、生热率、比热、密度、压实系数和初始孔隙度,研究区的灰岩、白云岩、砂岩、页岩及火山岩的热导率、比热及压实系数系根据研究区钻井实测数据统计获得,个别参数则利用国内外文献数据。

基础数据 包括地质数据文件、Ro数据文件及磷灰石裂变径迹数据文件。地质数据文件依据钻井综合录井剖面逐层建立各层底界埋深、厚度、各类岩性的百分比等数据。Ro数据取自渤海石油公司或合作的外国石油公司共41口钻井的测试数据。全部Ro数据经过了氢指数校正^[17];磷灰石裂变径迹数据为与澳大利亚La Trobe裂变径迹实验室合作

完成的 10 口井共 43 个样品数据,反演过程中的拟合参数包括封闭径迹长度和径迹年龄两项及其标准偏差,所有钻井地层分层深度和样品采样深度均作了钻井平台高度校正,统一校正至海底。

3.3 热史恢复结果

根据盆地内钻井岩芯或岩屑样品磷灰石裂变径迹分析数据^[1]和大量 R_o 数据,结合埋藏史恢复开展的钻井热史恢复结果表明,盆地于 25Ma 前曾经历了较高的热流(70—90mW/m²)阶段。高热流期时,渤中凹陷、海中隆起等地区热流较高,辽东湾锦州 27 地区热流较低(见图 3)。结合盆地内该时期产出的多期碱性玄武岩,可以比较肯定的是渤海盆地在 25Ma 前确实经历了波及地幔的裂谷过程。

古热流法反演出的古热流代表的是与埋藏史相伴随或相对应的有效或等效热流,即产生实测古温标值所需的实际热流量,它是地层所经历的各种地质过程热效应的综合体现。除单纯的传导热流外,在局部地区可能包含或叠加有火山岩浆活动、地下水活动等的热效应以及浅层热流再分配引起的热流区域变化。这正是古热流变化的原因所在,现今渤海盆地热流的分布亦如此,只是岩浆活动的影响已不复存在。自 25Ma 以来,渤海盆地在热状态上表现为持续的冷却。

4 盆地构造沉降史分析

盆地的构造沉降史的研究可以获得盆地演化中的地球动力学信息^[18,19]。盆地的沉降量由负载沉降和构造沉降两部分构成。其中负载沉降由沉积物和水体的重量引起;构造沉降则可能由浅部水平动力作用,如水平拉张、走滑拉分、挤压等,或深部垂向动力作用,如地幔隆升、岩浆底辟、地壳或地幔拆沉等诱导。

渤海盆地构造沉降分析结果见图 4。由图 4 可见,渤海盆地自沙河街组四段沉积以来的构造沉降(S)特征表现为:渤海地区和辽东湾地区 12Ma 以前的构造沉降史是基本统一的,均包含早期(25—50Ma)两次由快速初始构造沉降和短暂热沉降组成的裂谷作用亚旋回(I₁和 I₂)和后期的大规模热沉降阶段(II),所不同的是渤海地区自 12Ma 以来即出现了类似于前陆盆地的快速构造沉降,而辽东湾地区直至第四纪(2Ma)才被这一过程所波及。盆地热史恢复结果与构造沉降所揭示的渤海盆地演化阶段具有很好的对应关系。只是

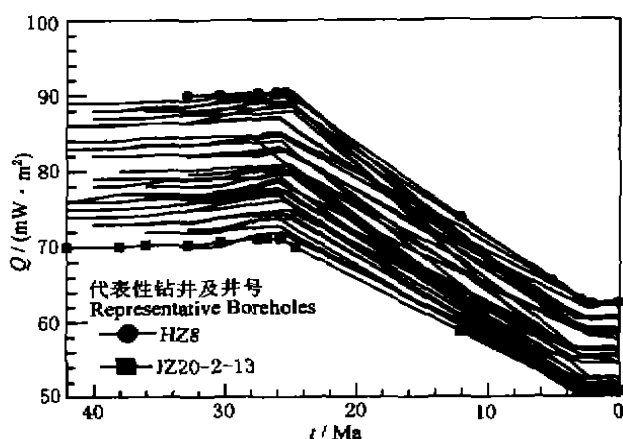


图 3 渤海盆地钻井热流史

Fig.3 Heat flow history for boreholes in Bohai Basin

1) 何建坤,刘建华. 渤海盆地深部地球物理场特征的地震层析成像研究. 中国海洋石油总公司“九五”科技攻关项目研究报告,1998.

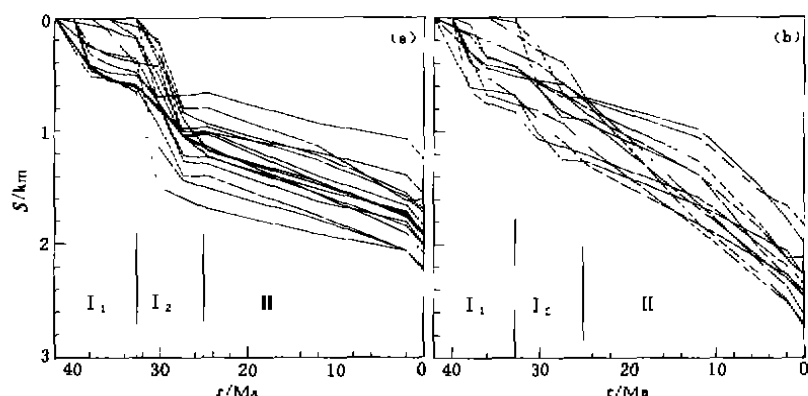


图4 渤海盆地钻井构造沉降史

(a) 辽东湾地区, (b) 渤海地区.

Fig.4 Subsidence history for borehole in Bohai Basin

(a) East Liao Bay; (b) Bohai area.

12Ma 以来渤海地区在热沉降基础上叠加的快速构造沉降难以解释, 因为既不存在前陆盆地发展的区域构造背景, 也无与快速构造沉降相伴随的高地热状态, 但深部地球物理探测获得渤海盆地地下伏软流圈中存在异常高地幔速度¹⁾表明较高密度地幔物质的存在. 此外盆地地下伏岩石圈的持续冷却可以导致岩石圈物质密度增加, 它们可能引起快速的均衡沉降, 于是解释了盆地演化后期的快速构造沉降过程, 因为地壳均衡不仅能导致的快速构造沉降, 且不会引起高的地幔及地表热异常.

5 结论与讨论

根据渤海盆地现今热状态特征、盆地热史恢复结果及构造沉降分析, 关于渤海盆地构造-热演化的基本认识如下:

5.1 渤海盆地现今背景热流值为 63.6mW/m^2 . 该值较全球大陆地区平均热流 61mW/m^2 略高, 与外围华北盆地 (平均热流值 63.6mW/m^2) 无明显区别, 远低于现代大陆裂谷区和大陆边缘扩张盆地等构造活动区, 但高于构造稳定区. 显然渤海盆地非现代活动裂谷盆地.

5.2 在 25Ma 前盆地曾经历较高热流 ($70\text{--}90\text{mW/m}^2$) 阶段. 结合盆地演化早期 (沙河街—东营组沉积期) 的快速旋回性构造沉降特征及该时期火山活动特征 (碱性玄武岩), 可以较为肯定的是渤海盆地在该时期经历了裂谷发展阶段. 因此, 渤海盆地应为一古裂谷盆地, 现在有待确定的是裂谷的动力机制问题.

5.3 渤海盆地自沙河街组四段沉积开始以来的构造沉降特征表现为: 渤海地区和辽东湾地区 12Ma 以前的构造沉降史是基本统一的, 均包含早期 (25—50Ma) 两次裂谷亚旋回和后期的热沉降阶段, 所不同的是渤海地区自 12Ma 以来即出现了可能与地幔均衡作用相关的快速沉降, 而辽东湾地区直至第四纪 (2Ma) 才被这一过程所波及. 12Ma 以来在较“冷”的热状态条件下的快速构造沉降支持和印证了深部地球物理探测获得的结果.

5.4 综上所述,本文关于渤海盆地构造-热演化的认识支持了渤海盆地属于板内裂谷盆地的认识,并且说明了地幔均衡可能是盆地演化后期(12Ma 以来)的重要动力源。但从断裂组合样式(花状构造)和盆地形态(近菱形)等特征看,断裂走滑及与之相伴随的拉分似乎是渤海盆地形成与演化过程中不容忽视的动力源之一。

课题研究过程中得到汪集旻院士的关怀和支持,渤海石油公司生产科武文来同志,分析测试中心张静亚同志给予大力帮助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 刘池洋. 从渤海湾盆地的地壳厚度演化论地壳差异扩张原理. 见: 华北克拉通沉积盆地形成与演化及其油气赋存. 西安: 西北大学出版社, 1990
LIU Chi-Yang. The Principle of different extension from evolution of crustal thickness in Bohai Bay basins. In: Formation, Evolution and Gathering of Oil-gas in North China Cratonic Basin. Xi'an: Northwest University Press, 1990
- 2 漆家福, 陈发景. 下辽河-辽东湾新生代裂陷盆地的构造分析. 北京: 地质出版社, 1995
QI Jia-Fu, CHEN Fa-Jing. Tectonic Analyses of Cenozoic Rifted Basin in Lower Liaohe-East Liao Bay Basin. Beijing: Geological Publishing House, 1995
- 3 李继亮, 从柏林. 试论渤海的形成与演化. 见: 华北断块区的形成与演化. 北京: 科学出版社, 1981
LI Ji-Liang CONG Bo-Lin. The formation and evolution of Bohai Sea. In: The Formation and Evolution of North China Fault Block. Beijing: Science Press, 1981
- 4 田在艺, 张庆春. 中国含油气沉积盆地论. 北京: 石油工业出版社, 1996
TIAN Zai-Yi, ZHANG Qing-Chun. Oil-gas Bearing Basins in China. Beijing: Petroleum Industry Press, 1996
- 5 陈墨香, 黄歌山, 汪缉安等. 渤海地温场特征的初步研究. 地质科学, 1984, (4): 392—400
CHEN Mo-Xiang, HUANG Ge-Shan, WANG Ji-An, et al. Primary study of geothermal characteristics of Bohai Basin. *Scientia Geologica Sinica* (in Chinese), 1984, (4): 392—400
- 6 中国科学院地质研究所地热组. 中国第一批大地热流数据. 地震学报, 1979, 1(1): 1—12
Geothermal Group, Chinese Academy of Sciences. The first group of heat flow data in China. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1979, 1(1): 1—12
- 7 Morgan P. Heat flow in rift zone, continental and oceanic rifts. *Geody. Ser.*, 1982, (8): 357—362
- 8 何丽娟, 熊亮萍, 汪集旻. 南海盆地地热特征. 中国海上油气, 1998, (2): 87—90
HE Li-Juan, XIONG Liang-Ping, WANG Ji-Yang. Geothermal characteristics of South China sea. *China Offshore Oil and Gas* (in Chinese), 1998, (2): 87—90
- 9 汪集旻, 汪缉安, 王永玲. 下辽河盆地大地热流. 地质科学, 1986, (1): 16—29
WANG Ji-Yang, WANG Ji-An, WANG Yong-Ling. Territory heat flow in Lower Liaohe Basin. *Scientia Geologica Sinica*, 1986, (1): 16—29
- 10 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流分布特征初探 [博士论文]. 北京: 中国科学院地质研究所, 1989
HUANG Shao-Peng. Distribution of heat flow in the continental area of China [Ph. D Thesis]. Beijing: Institute of Geology, Chinese Academy of Sciences, 1989
- 11 胡圣标, 张容燕. 油气盆地地热史恢复方法. 勘探家, 1998, 3(4): 56—61
HU Sheng-Biao, ZHANG Rong-Yan. Methods of thermal history reconstruction in oil-gas basin. *Petroleum Explorationist*, 3(4): 56—61
- 12 胡圣标, 汪集旻. 沉积盆地地热体制研究的基本原理和进展. 地学前缘, 1995, 2(4): 171—179
HU Sheng-Biao, WANG Ji-Yang. Principle and Progress of geothermal regime study in sedimentary basin.

- Frontier of Geology* (in Chinese), 1995, 2(4):171—179
- 13 Xue Ai-Min. The combinative analysis method of thermal history inversion with apatite fission tracks. *Chinese J. Geophys.*, 1994, 37(2):287—293
- 14 Luo X R, Vasseur G. Modeling of pore pressure evolution associated with sedimentation and uplift in sedimentary basins. *Basin Research*, 1995, (7):35—52
- 15 Sweeney J J, A K Burnham. Evaluation of simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics. *AAPG Bulletin*, 1990, (10):1559—1570
- 16 Laslett G M, Green P F, Duddy L R. Thermal annealing of fission tracks on apatite 2: quantitative analysis, *Chem. Geol. (Isot. Geosci. Sect.)*, 1987, 65:1—13
- 17 Lo H B. Corrections for the suppression of vitrinite reflectance in hydrogen-rich kerogens: Preliminary guidelines. 9th Ann. Meeting of the Society for Organic Petrology, 1993
- 18 何登发. 中国西北地区沉积盆地成盆动力学演化与含油气系统旋回 [博士后论文]. 北京: 中国科学院地球物理研究所, 1997
- HE Deng-Fa. Basin formation dynamics and oil-gas system episode in area of Northwest China [Post doctoral Thesis]. Beijing: Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1997
- 19 Allen P A, Allen J R. *Basin Analysis: Principles and Application*. London: Blackwell Scientific Publications, 1990

THERMAL HISTORY AND TECTONIC-THERMAL EVOLUTION OF BOHAI BASIN, EAST CHINA

HU SHENG-BIAO ZHANG RONG-YAN

(Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

LUO YU-HUI CAI DONG-SHENG

(Research Institute, Bohai Oil Corporation, Tianjing 300452, China)

Abstract

Heat flow measurements and thermal history reconstruction, from inversion of apatite and vitrinite reflectance data, indicate that Bohai Basin is characterized by lower present-day heat flow varying between 50 and 75mW/m² with a background heat flow value of 63.6mW/m², and that the basin experienced a much higher heat flow (70—90mW/m²) period prior to about 25Ma. Structural subsidence analysis shows that the subsidence of Bohai Basin, consisted of East Liao Bay and Bohai areas, can be divided into two phases: earlier(25—50Ma) initial (rift) and later (since 25Ma) thermal subsidence. The earlier rift phase is composed of two sub-rift episodes with quick subsidence, and the later thermal subsidence was superimposed with rapid subsidence related to crustal isostasy induced by higher density mantle and cooling of the lithosphere. The lower present-day heat flow and the higher palaeo-heat flow corresponding to structural subsidence stage as well as the typical rift subsidence style

in Bohai Basin support its feature of intraplate, rift basin, and provided with some insight to the tectonic-thermal evolution of the basin.

Key Words Bohai Basin, Heat flow, Thermal history reconstruction, Structural subsidence, Tectonothermal evolution.

作者简介 胡圣标, 1963 年生, 1991 年获地热及构造地质学博士学位, 中国科学院地质与地球物理研究所副研究员, 主要从事盆地和造山带大地热流, 岩石圈热结构及热史恢复方面的研究。

欢迎订阅《地球物理学报》第 42 卷增刊

《地球物理学报》是中国优秀科技期刊, 在首届全国优秀科技期刊评比(1992 年)以及第二届全国优秀科技期刊评比(1996 年)中均荣获全国优秀科技期刊一等奖。

《地球物理学报》在学术上瞄准国际地学前沿, 突出我国地学特色, 着眼于创新, 注意基础研究与应用相结合, 面向国民经济建设主战场, 为开发资源、能源, 减轻地震、地质等自然灾害和认识地球并为保护地球环境服务。

为了适应地球物理事业的发展, 为了满足广大地球物理工作者的需要, 《地球物理学报》将出版第 42 卷增刊。"1999 年天文因素与自然灾害研讨会"中的部分优秀论文也将刊载在第 42 卷增刊中。本卷增刊内容既有理论方法的成果, 又有观测、实验方面的研究成果, 内容丰富, 约 35 余万字, 每册 33 元(含邮资)。

请订阅本刊的单位和个人, 不要漏订 42 卷增刊, 并欢迎新订户。需订者请与本刊编辑部联系。地址: 北京 9701 信箱, 邮政编码: 100101, 电话: 64889049, 64889101