

doi:10.3799/dqkx.2010.079

# 塔里木盆地中央隆起区现今地温场 分布特征及其与油气的关系

冯昌格<sup>1</sup>, 刘绍文<sup>2\*</sup>, 王良书<sup>1</sup>, 李成<sup>1</sup>

1. 南京大学地球科学与工程学院, 江苏南京 210093

2. 海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏南京 210093

**摘要:** 沉积盆地热状态研究不仅对于理解盆地成因演化具有重要意义, 而且还与油气生成和保存息息相关。根据塔里木盆地中央隆起区近 120 口钻井的试油温度资料和 296 块岩石热导率的测试结果, 获得了该区现今地温梯度、深部温度(1 000~5 000 m埋深及烃源岩顶界面)及大地热流的分布特征。结果表明, 该区热状态整体偏低(平均地温梯度为 23.3 °C/km, 平均大地热流为 47.3 mW/m<sup>2</sup>), 二叠纪的岩浆活动对现今地温场已无影响。不同埋深的地层温度表现出与地温梯度及大地热流相似分布模式, 即隆起区高、凹陷区低, 这一展布特征受基底起伏和形态控制。烃源岩顶部温度表明, 巴楚组、卡拉沙依组和良立塔格组等烃源岩层目前仍处于油气的有利保存状态; 巴楚隆起、卡塔克隆起西北部和古城墟隆起东部的中下寒武统烃源岩则处于良好的油气保存状态, 其他地区处于不利的油气保存状态。特别是, 该区已探明的油气田往往位于相对高温区, 并提出深部热流体的向上运移和聚集过程可能是造成异常高温的因素。这一发现表明盆地现今地温场特征与油气田分布具有良好的对应关系, 可为今后油气勘探提供地热学依据。

**关键词:** 地温梯度; 地温场; 大地热流; 地下温度; 塔里木盆地; 中央隆起。

中图分类号: P314

文章编号: 1000-2383(2010)04-0645-12

收稿日期: 2009-08-26

## Present-Day Geotemperature Field Characteristics in the Central Uplift Area of the Tarim Basin and Implications for Hydrocarbon Generation and Preservation

FENG Chang-ge<sup>1</sup>, LIU Shao-wen<sup>2\*</sup>, WANG Liang-shu<sup>1</sup>, LI Cheng<sup>1</sup>

1. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2. Key Laboratory of Coast and Island Development, M. O. E., School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

**Abstract:** Study of geothermal regime of sedimentary basin is not only vital for understanding the formation and evolution of the basin, but also is of significance for oil and gas generation and preservation in the basin. Temperature data from about 120 exploration wells and measured values of thermal conductivity of 296 rock samples from Tarim basin are used to calculate the present-day geothermal gradient, subsurface formation temperature at the depths of 1 000–5 000 m and the top of source rocks concerned, respectively. The results show that thermal regime of the area is relatively lower with an average geothermal gradient of 23.3 °C/km and heat flow of 47.3 mW/m<sup>2</sup>; suggesting that the Permian intensive magmatism in the Tarim basin has no obvious effect on the present-day temperature field. The general pattern of subsurface temperature distribution at different depths is similar to that of the geothermal gradient and heat flow and is featured by higher parameters in the uplift areas and lower ones in the depressions, indicating the influence of base topography configuration on the temperature field. The source rocks of the Bachu Formation, Kalashayi Formation and Lianglitage Formation in the area are predicted to be within favorable hydrocarbon preservation condition now, while the middle and lower Cambrian source rocks are in the Bachu uplift, northwestern Katake uplift and eastern Guchengxu uplift areas, and the unfavorable preservation condition is inferred in other left region.

基金项目: 国家自然科学基金(Nos. 40504013, 40634021); 中国石油中青年创新基金(No. 07E1033); 高等学校博士点基金项目(No. 20060284040).

作者简介: 冯昌格(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事地热和岩石圈热结构方面的研究。\* 通讯作者: 刘绍文, E-mail: shaowliu@nju.edu.cn

Particularly, it is found that the discovered oil and gas fields are usually accompanied by anomalous high temperature, and the upward migration and accumulation of hot fluid below is speculated to explain this perfect coincidence. The finding of temperature pattern and distribution of oil and gas field can provide some insights for future exploration.

**Key words:** geothermal gradient; geothermal fields; heat flow; subsurface temperature; Tarim basin; central uplift.

## 0 引言

中央隆起区位于塔里木盆地中部,为—总体呈近东西向展布,且略向南凸出的弧形构造,它可进一步分为巴楚隆起、卡塔克隆起、塘古孜巴斯拗陷和古城墟隆起 4 个二级构造单元(图 1)。中央隆起区是塔里木盆地腹地油气勘探的发祥地及长期的勘探生产基地,同时也是现今勘探的重点区块。自塔里木石油会战以来中央隆起区一直受到石油界领导和专家的重视,并取得了重大的研究进展。截至 2005 年底,在其西段的巴楚—麦盖提地区,相继发现了巴什托、亚松迪、鸟山和和田河 4 个油气田(藏);中段的塔中地区发现了塔中 4 油气田、塔中 I 号奥陶系碳酸盐岩凝析气田等油气田及一批含油气构造,其中塔中 I 号坡折带探明及控制油气储量约  $2.106 \times 10^8$  t;东段的塔东地区总体勘探程度较低,其中,塔东 2 井获低产稠油,古隆 1 井获低产气流(何治亮等,2006;李素梅等,2008)。2002 年中石化第三次资源评价结果表明中央隆起区油气总资源量为  $62.01 \times 10^8$  t,该区为塔里木盆地各构造单元油气资源最为丰富的地区。因此,塔里木盆地的中央隆起区将是现在及今后油气勘探的重点地区,与油气相关的各项研究亟待进一步的深入和拓展。

盆地地温场是盆地现今热状态的体现,它受深部岩石圈热动力学过程及浅部的盆地构造演化等双重地球动力学过程控制(Ziegler and Cloetingh, 2004; Allen and Allen, 2005)。相应地,研究沉积盆

地的地温场特征能为探讨盆地成因演化动力学过程提供地热学依据和约束。此外,地温场演化对盆地的油气生成和聚集等资源运聚过程有着重要作用(Tissot *et al.*, 1987; Doré, 1993; Barker, 1996; Förster and Merriam, 1999)。研究中央隆起区的地温场,不仅可以为油气资源的评价和盆地模拟提供依据,还可进一步为塔里木盆地的构造—热演化过程和成因动力学分析提供地热学约束。前人在塔里木盆地现今地温场方面的工作基本上可归结为全盆地和局部构造部位这两个尺度。前者的代表性工作诸如张惠蓉和刘国壁(1992)基于 37 口探井的地温资料,讨论了塔里木盆地地温特征与油气的关系。王良书等(1995)和王钧等(1995)分别报道了塔里木盆地现今大地热流数据和分布规律。后者的代表性成果,例如魏大卫(1992)报道了塔里木盆地北部库车—轮台地区的 6 个大地热流数据,其值为  $43 \sim 44$  mW/m<sup>2</sup>;谢德宜(1993)研究了塔里木盆地北部的地温特征,表明满加尔拗陷的地温梯度接近 20 °C/km;王良书等(2003, 2005)详细探讨了库车前陆盆地现今大地地温梯度和大地热流展布特征。此外,邱楠生(2002)补测了塔中地区 10 块岩石热导率数据,进而讨论了塔里木盆地区的热导率、生热率等岩石热物性参数的展布特征。

整体而言,全盆地尺度上的前人相关工作虽初步勾勒了中央隆起区地温场特征,但缺乏精细研究;而区域尺度上的研究则主要集中于塔北—库车地区,专门针对中央隆起区的工作尚未见诸报道。上述现状制

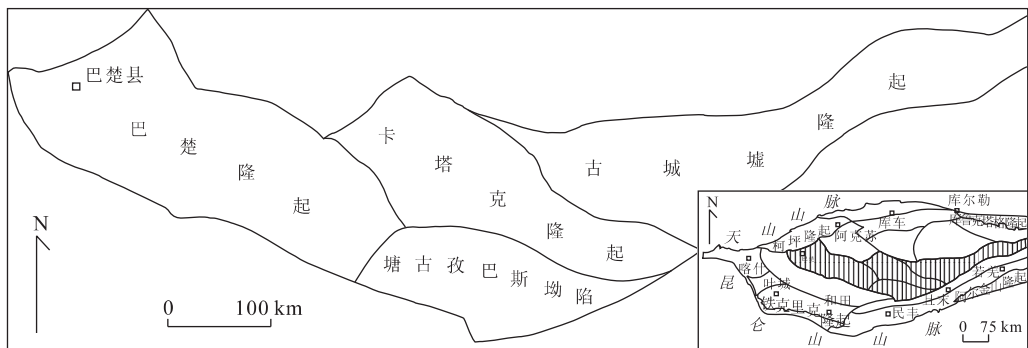


图 1 塔里木盆地中央隆起区构造区划

Fig. 1 Tectonic sketch showing subdivision of the central uplift area in Tarim basin

约了我们对中央隆起区热状态的认识,进而影响到对该区油气资源的评价和勘探.近年来,随着油气勘探的进展,该区积累了大量新的地温资料和岩石物性参数,从而使该区开展详细的地温场研究成为可能.本文在前人测试的部分岩石热导率数据基础上(王钧等,1995;王良书等,2005),又进一步补测了中央隆起区不同层系和岩性的220块岩石热导率数据,进而结合新近收集的120多口井的近660个试油测压静温数据,详细讨论了中央隆起区的现今地温场特征及其与油气的关系.这一研究进一步加深了该区地温特征的认识,并为油气勘探提供了地热学依据.

## 1 数据处理和分析

沉积盆地现今地温场特征研究主要基于各类测温数据和岩石热物性参数(如生热率、热导率和密度等)等基础数据.我们收集了中央隆起区探井的各类钻孔温度数据,考虑到这些温度数据的有效性和可靠性,用于本次塔里木盆地中央隆起区地温场分析的钻孔温度数据主要有两类:(1)系统测温数据;(2)试油温度数据.与此同时,在收集前人热导率数据的基础上,我们还采集了该区一些代表性钻孔的岩心样品,进行热导率测试.下面将对地温数据和热导率等做详细说明.

### 1.1 地温数据类型

系统连续测温是指在钻孔停钻之后静井若干天甚至半年以上获得的测井温度数据,由于静井时间长,钻孔地层温度趋于平衡,因此它可以很好地反映其地层温度.本次研究中,我们收集了该区5口钻井的系统测温数据(图2).从系统测温曲线可看出,其上端与横坐标交点所对应的井温都接近本地区的地表年平均气温,且井温随深度增加而近乎线性升高,呈现出良好的线性规律(图2),这是稳态地温的反映.试油温度是在探井或生产井中含油层段进行试油点测静压时获得的静温数据.静井时间一般也都较长,此类井温数据也可用来反映静压油层温度.本文利用了120口井的近660个试油静温数据.从这些试油温度随深度变化图可以看出,温度随深度的增加而线性升高,并与系统连续测温数据有较好的对应,因此也表现出典型的传导型地温场特点(图2).钻孔温度数据中这类数据量相当多,它们构成了盆地地温场研究的主要数据基础.

### 1.2 地温数据的处理

对于有系统连续测温数据的钻井,其地温梯度

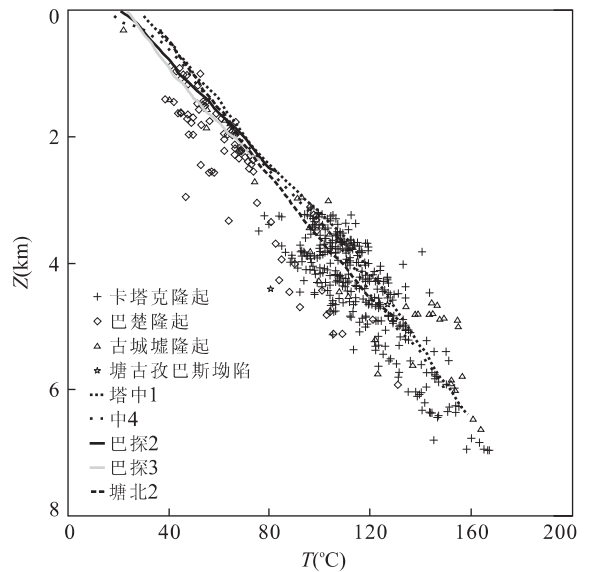


图2 中央隆起区各类温度与深度关系

Fig. 2 Relationship between temperature data of different types and depth in the central uplift area

线性温度为系统连续测温数据;散点为试油静温数据

由线性回归拟合.若温度存在显著分段性,则分段拟合后取平均值,作为该钻井的平均地温梯度.同样地,对试油温度数据较多且相对连续的钻井,也采取线性拟合求取其地温梯度.

而对试油温度数据较少的钻井,则采用如下方法来计算地温梯度.首先确定恒温带的深度和温度.本文研究中,新疆地区恒温带的深度 $Z_0$ 取20 m,温度 $T_0$ 为12 °C(王良书等,2003).如某一深度 $Z$ 的地温为 $T$ ,则该测温点的地温梯度为:

$$G = \frac{T - T_0}{Z - Z_0}, \quad (1)$$

在计算时,将同一口井不同深度上的地温梯度加以算术平均,即为该井的地温梯度平均值.然后按每口井的地温梯度平均值来折算不同深度的温度:

$$T = G \times Z + T_0, \quad (2)$$

式中, $G$ 为地温梯度(°C/km); $Z$ 为给定的计算深度(km); $T_0$ 为恒温带温度; $T$ 为给定深度 $Z$ 处的温度值.利用这一方法,我们获得了中央隆起区1 000~5 000 m埋深处的深部地温及烃源岩顶面温度.

### 1.3 岩石热导率

岩石热导率( $k$ )是表征岩石传热性质的参数,是计算大地热流时不可缺少的热物性数据.在结合前人测试的76个岩石热导率值的基础上(王钧等,1995;王良书等,2005),我们进一步补测了220个岩石热导率值(表1).在选取用于热导率测试的钻孔及岩心时,充分考虑了这些钻孔的平面分布、岩心的

表 1 中央隆起区的岩石热导率统计

Table 1 Compilation of thermal conductivity of rocks in the central uplift area

| 地层 | 岩性    | 数目 | 均值±标准偏差(W/m·K) | 地层 | 岩性    | 数目 | 均值±标准偏差(W/m·K) |
|----|-------|----|----------------|----|-------|----|----------------|
| N  | 泥岩*   | 31 | 1.778±0.372    | C  | 灰岩    | 27 | 2.246±0.528    |
| N  | 砂岩*   | 55 | 1.680±0.618    | C  | 白云岩   | 2  | 2.311±0.713    |
| E  | 泥岩*   | 17 | 1.883±0.447    | C  | 砾岩    | 1  | 3.832          |
| E  | 砂岩*   | 41 | 1.961±0.522    | D  | 泥岩    | 1  | 2.721          |
| K  | 泥岩    | 2  | 2.229±0.088    | D  | 砂岩    | 9  | 3.015±0.626    |
| K  | 砂岩*   | 45 | 1.565±0.662    | S  | 泥岩    | 17 | 2.212±0.356    |
| T  | 泥岩*   | 14 | 1.934±0.481    | S  | 砂岩    | 27 | 3.051±0.563    |
| T  | 砂岩    | 3  | 1.411±0.54     | S  | 砾岩    | 2  | 2.042±0.763    |
| T  | 灰岩    | 2  | 3.013±0.283    | S  | 玄武岩   | 1  | 1.572          |
| P  | 泥岩    | 6  | 1.958±0.520    | O  | 泥岩    | 9  | 2.410±0.687    |
| P  | 砂岩    | 14 | 1.880±0.548    | O  | 砂岩    | 1  | 4.911          |
| P  | 灰岩    | 1  | 2.173          | O  | 灰岩    | 61 | 2.797±0.771    |
| P  | 砾岩    | 3  | 1.018±0.135    | O  | 白云岩   | 14 | 3.532±0.817    |
| P  | 火山角砾岩 | 1  | 1.780          | €  | 泥岩    | 4  | 4.199±0.061    |
| P  | 凝灰岩   | 1  | 1.471          | €  | 灰岩    | 2  | 3.744±1.044    |
| P  | 玄武岩   | 2  | 1.344±0.074    | €  | 白云岩   | 21 | 4.031±0.464    |
| C  | 泥岩    | 38 | 2.183±0.454    | Z  | 花岗闪长岩 | 3  | 2.215±0.190    |
| C  | 砂岩    | 19 | 2.533±0.727    | Z  | 英安岩   | 2  | 2.215±0.060    |

标\*者为统计的塔里木盆地的结果。

岩性、地层代表性等方面,力求使获得的热导率对研究这一区域的地温展布特征具有良好的代表性。

测量热导率所用仪器为德国 TCS 公司生产的岩石热导仪,测量范围为 0.2~25.0 W/m·K,测量精度为 3%,具体测量方法见 Popov *et al.* (1999)。热导率是在岩样干燥状态下测量的,因此需要进行相关的校正来获取原位热导率。对于孔隙度较大的碎屑岩而言,饱水校正极其必要。本文对埋深小于 5 km 的泥岩和砂岩均采用几何平均(geometric mean)方法作了孔隙饱水校正(Woodside and Messmer, 1961a, 1961b);而对于埋深大且致密坚硬的石灰岩、白云岩等碳酸岩而言,由于岩石本身已相当致密,孔隙度小,饱水校正对岩石热导率的影响不大,可以忽略(王钧等,1995),因此石灰岩和白云岩样品未进行饱水校正。在构建研究区的地层热导率柱时,由于缺少部分层位代表性岩性以及古近系和新近系的岩石热导率值,我们采用了塔里木盆地其他构造单元的这一层系和相同岩性的热导率值作为近似代表。

#### 1.4 大地热流

大地热流是表征由地球内部向地表传输并在单位面积上散发的热量。它是地球内部各种动力学过程的能量平衡在地表最直接的反映,蕴涵着丰富的地球动力学信息。由傅里叶定律可知,热流值等于地温梯度与地层热导率之乘积:

$$Q = -k \frac{dT}{dZ}, \quad (3)$$

式中, $Q$ 为大地热流(或称地表热流)值( $mW/m^2$ ); $k$ 为热导率( $W/m \cdot K$ ); $dT/dZ$ 为地温梯度( $^{\circ}C/km$ );负号表示热流方向与地温梯度方向相反。

从(3)式可以看出,由良好的测温数据所得到的地温梯度与实测的岩石热导率是获得高质量大地热流的关键。对具有系统连续测温资料的钻井,在计算热流时,先求出不同地层中各岩性的平均热导率,再根据岩性所占百分比并结合加权平均的方法求取各地层的平均热导率,然后采用地层厚度调和平均的方法求取相应井段的平均热导率,该段平均热导率与地温梯度的乘积即为该井的热流值。而对于那些只有几个零星的试油温度数据的钻孔,我们利用 Bullard(1939)提出的热阻法(thermal resistance method)或称 Bullard 法来估算相应的大地热流。利用稳态系统测温资料和实测热导率计算得到的热流值称为热流实测值,此类热流数据质量较高;利用试油温度资料和非测温井段地层热导率数据得到的热流值称为估算热流值,这类热流的质量相对前者要差一些,但仍可用于揭示区域热状态特征。

## 2 结果

### 2.1 地温梯度分布特征

地温梯度计算结果表明,中央隆起区现今地温梯度变化范围为 17.0~29.3  $^{\circ}C/km$ ,平均为

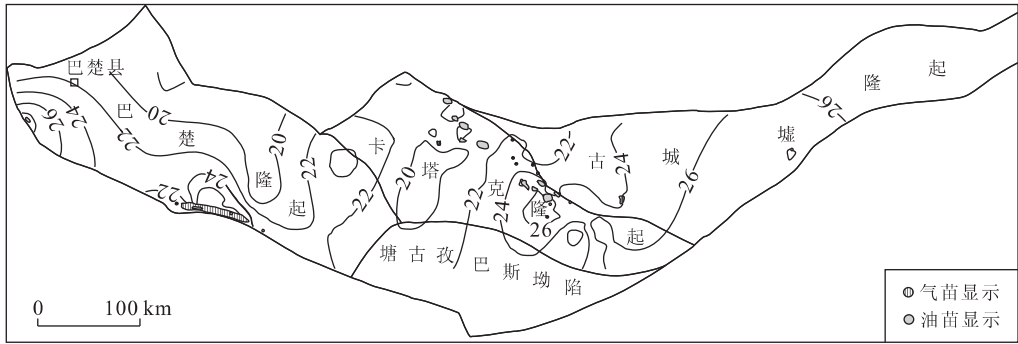


图3 塔里木盆地中央隆起区现今地温梯度等值线(单位:  $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )

Fig. 3 Present-day geotemperature gradient contour map in the central uplift of the Tarim basin

$23.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ . 不同构造单元的地温梯度也各不相同。巴楚隆起平均地温梯度为  $23.6^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 卡塔克隆起区的平均地温梯度为  $23.4^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 古城墟隆起平均地温梯度为  $24.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ; 塘古孜巴斯凹陷的平均地温梯度为  $20.0^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。显然, 凹陷区的地温梯度小于隆起区的梯度, 地温梯度这一格局主要受基底起伏的控制, 基底隆起处地温梯度高, 基底坳陷区的梯度偏低。图3中各个构造单元的地温梯度分布更是展示了基底起伏的控制作用。钻井及地震资料表明, 卡塔克隆起基底东南高、西北低(贾承造, 1997), 我们获得的地温梯度也反映出这一趋势: 从西北部低梯度( $20\sim 22^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )增大到东南部的高梯度( $24\sim 26^{\circ}\text{C}/\text{km}$ )。同样地, 地质及地震资料表明古城墟隆起为一个不断向南抬升的古隆起构造(贾承造, 1997), 地温梯度呈现出北低南高, 地温梯度从北部的  $22^{\circ}\text{C}/\text{km}$  增加到南部的  $26^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 基底隆起最高的塔东2号高点处的地温梯度最高; 巴楚隆起基底隆起最高的西北部地温梯度最低, 甚至低于  $20^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 这与该区基底出露、热流迅速传递和散失有关。东部的中部向斜区地温梯度较低( $20\sim 22^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), 其他地区地温梯度较高( $22\sim 28^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ), 这一趋势同样受基底起伏格局控制。此外, 通过对比中央隆起区已探明的油气田分布和现今地温梯度展布, 发现油气田都位于研究区内的相对高温区域。这一发现为油气勘探提供了一些地热学依据, 其后章节会详细讨论这一对应关系。

## 2.2 1000~5000 m埋深处的地温分布特征

利用获得的地温梯度及公式(2), 本文获得了研究区1000~5000 m埋深处的深部地温展布特征。图4a给出了1000 m深度的温度分布情况。如图4所示, 中央隆起区1000 m深度的地温介于  $30\sim 41^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均为  $35^{\circ}\text{C}$ 。其中, 不同构造单元的温度展布也各具特色。卡塔克隆起的温度整体从西北

向东南方向逐步增加, 如西北部温度在  $30^{\circ}\text{C}$ 左右, 而其东南部的温度高达  $38^{\circ}\text{C}$ ; 古城墟隆起的温度则表现为从北向南逐步增加的趋势, 巴楚隆起也呈现类似趋势。这一地温展布趋势主要受其基底起伏格局的影响。2000~5000 m深度的温度展布格局与1000 m深处的分布模式基本类似, 只是温度大小及变化幅度不一。2000 m埋深的地温介于  $48\sim 71^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均为  $58^{\circ}\text{C}$ ; 3000 m埋深的地温介于  $65\sim 100^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均为  $81^{\circ}\text{C}$ ; 4000 m埋深的地温介于  $83\sim 129^{\circ}\text{C}$ 之间, 平均为  $105^{\circ}\text{C}$ ; 5000 m埋深的地温介于  $101\sim 159^{\circ}\text{C}$ , 平均为  $128^{\circ}\text{C}$ (图4b)。整体而言, 与地温梯度一样, 深部地温的分布特征主要受基底起伏的影响, 表现为基底埋深浅的地区温度高, 而基底埋深大的地区温度低, 充分体现了基底构造格局对现代地温分布的控制作用。

## 2.3 烃源岩顶界面温度分布

中央隆起区主要发育有中下寒武统( $\text{C}_1\sim \text{C}_2$ )、上奥陶统良立塔格组( $\text{O}_3l$ )和石炭系巴楚组( $\text{C}_1b$ )以及卡拉沙依组( $\text{C}_{1-2}k$ )等多套烃源岩(李丕龙, 2007)。众所周知, 烃源岩的成烃能力与所经受的温度息息相关。世界各主要油田的统计资料表明石油“液态窗”的天然记录温度范围绝大多数在  $60\sim 150^{\circ}\text{C}$ , 也即所谓的生油门限温度。一般地, 若烃源岩温度低于  $60^{\circ}\text{C}$ , 则称其处于未成熟阶段; 若温度介于  $60\sim 150^{\circ}\text{C}$ , 则处于成熟阶段; 若温度高于  $150^{\circ}\text{C}$ , 则称其为高一过成熟阶段。油气生成与烃源岩在地质历史上所经历的热演化有关, 对于存在显著抬升和剥蚀且后期埋藏不深的烃源岩层, 其生烃状态和能力主要由所经历的古地温决定; 而对于持续深埋的烃源岩层, 由于地温仍不断增加, 现今地温状态(也即历史最高古地温)决定其生烃能力。根据中央隆起区现今地温梯度和烃源岩顶面埋深, 本文讨论了该区几套烃源岩的现今顶界面地温分布特

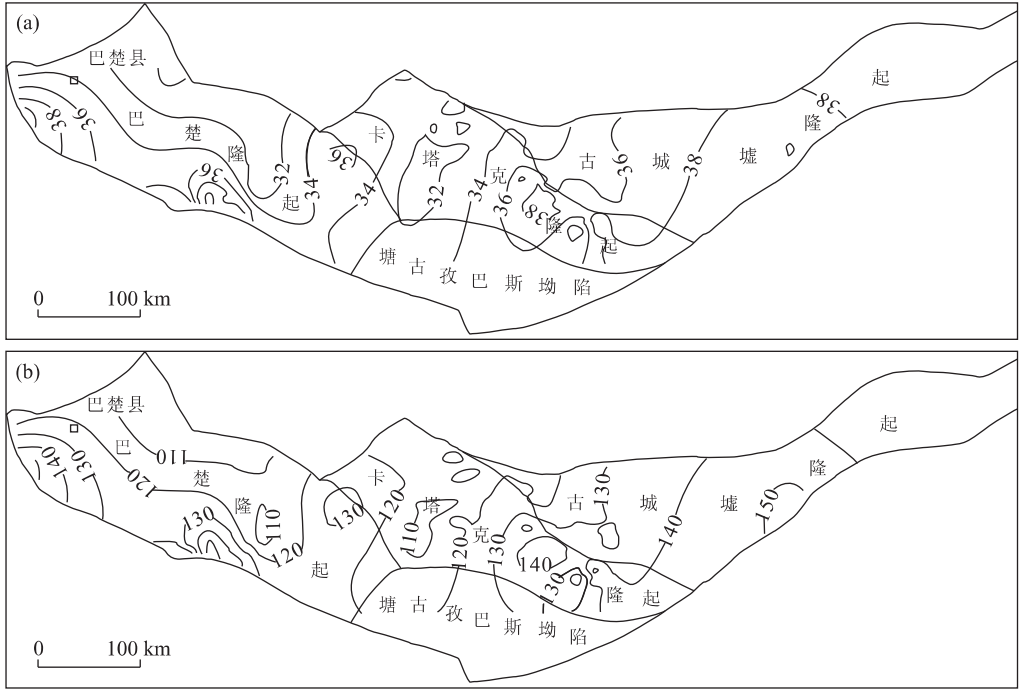


图 4 中央隆起区 1 000 m (a)和 5 000 m (b)深度地温等值线(单位: °C)

Fig. 4 Contour map of subsurface temperature at 1 000 m (a) and 5 000 m (b) depth in the central uplift area

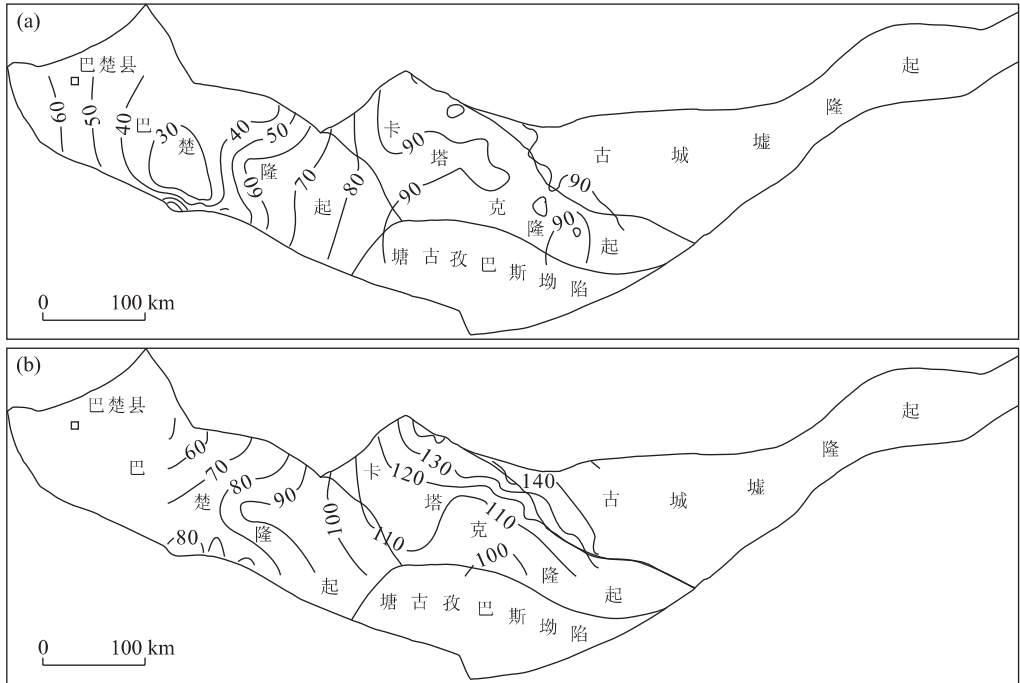


图 5 卡拉沙依组(a)和良立塔格组(b)顶面地温等值线(单位: °C)

Fig. 5 Contour map of subsurface temperature on the top surface of the Kalashayi Formation (a) and the Lianglitage Formation (b)

征,进而结合该区构造演化和热历史来分析其生烃或油气保存情况。

如图 5a 所示,卡拉沙依组(C<sub>1-2k</sub>)顶面温度约 30~90 °C。巴楚隆起中、西部温度小于 60 °C;其他地区温度大于 60 °C。巴楚组(C<sub>1b</sub>)顶面温度约 20~

110 °C,其中,巴楚隆起西北部温度小于 60 °C;其他地区温度均在 60~110 °C。良立塔格组(O<sub>3l</sub>)顶面温度约 50~140 °C(图 5b)。除了巴楚隆起西北部温度小于 60 °C,其他地区均在 100 °C 以上。

中寒武统(Є<sub>2</sub>)顶面温度约 90~180 °C。其中巴

楚隆起、卡塔克隆起西北部和古城墟隆起东部温度低于 150 °C;其他地区则在 150 °C 以上(图 6a)。下寒武统( $\epsilon_1$ )顶面温度约 100~190 °C(图 6b)。其中巴楚隆起、卡塔克隆起西北部和古城墟隆起东部温度低于 150 °C,其他地区则在 150 °C 以上。

塔中地区部分钻井的镜质体反射率( $R_0$ )数据表明奥陶系烃源岩已进入成熟—高成熟阶段,如 TZ12 井 4 600~5 300 m(奥陶系)段的  $R_0$  为 1.00%~1.11%,TC1 井 4 000~6 000 m 段(奥陶系)的  $R_0$  为 1.00%~1.54%(李惠莉等,2004)。我们得到的奥陶系良立塔格组( $O_3l$ )顶界面温度在 100 °C 以上,也暗示其进入了成熟阶段或说目前正处于油气有利保存状态,这一认识与  $R_0$  值揭示的热演化信息基本一致。巴楚地区寒武系碳酸盐类烃源岩的  $R_0$  为 1.85%~2.40%(杨威等,2004),已进入过成熟状态,为干气阶段。本文的结果表明中、下寒武统两套烃源岩的顶界面现今温度均在 150 °C 以上,也说明其进入过成熟的干气阶段或处于干气的保存状态。位于巴楚隆起区东南部位的 HT1 井内石炭—二叠系地层中  $R_0$  值在 0.45%~0.70%之间(邱楠生等,2010),表明其目前仍处于低成熟阶段。而我们对该区石炭系烃源岩顶界面温度计算也表明该层目前在 60~90 °C 之间,处于低成熟阶段或油气有利保存状态。

当然,塔里木盆地构造演化复杂,经历了多期抬

升、剥蚀和沉降过程。虽然上述烃源岩的生烃阶段与现今地温状态可很好地对应,但也未必全是现今地温场作用的结果。塔中隆起区普遍缺失中生界地层,巨厚的新生界地层直接覆盖在古生界之上,表明存在显著的抬升和剥蚀现象。由于地层抬升和剥蚀,生烃地层所受的温度降低,若后期的温度不能达到或超过其所经受的历史最高温度,则地层生烃状态将继续保留,也即生烃层的“滞留”。此后,随着盆地的沉降和地层的埋深逐步增大,地层温度也相应增加,从而使原来滞留的生烃状态重新“开启”,进入新一轮的生烃活动。因此,现今地温的研究对于生烃或保存状态的探讨也具有意义。例如,塔中 10 井的埋藏和热演化史研究表明(邱楠生等,1997),该井钻遇的奥陶系烃源岩底界约在 230 Ma 开始成熟生油,此后随着埋深增加,地层温度也增加,约在 205 Ma 进入生油高峰;然而,其后受到两期抬升剥蚀影响,地层温度降低,目前仍处于生油窗中。若现今地层温度进一步升高,会加速生烃层的成熟。由上可见,在考虑地层的沉积和埋藏史分析的基础上,利用现今地温状态也可对烃源层的生烃状态,特别是油气的保存条件进行定性分析。

### 2.4 大地热流分布特征

利用前面述及的方法,本次研究共获得了 5 个热流实测值(表 2),并采用热阻法则计算了 94 个热

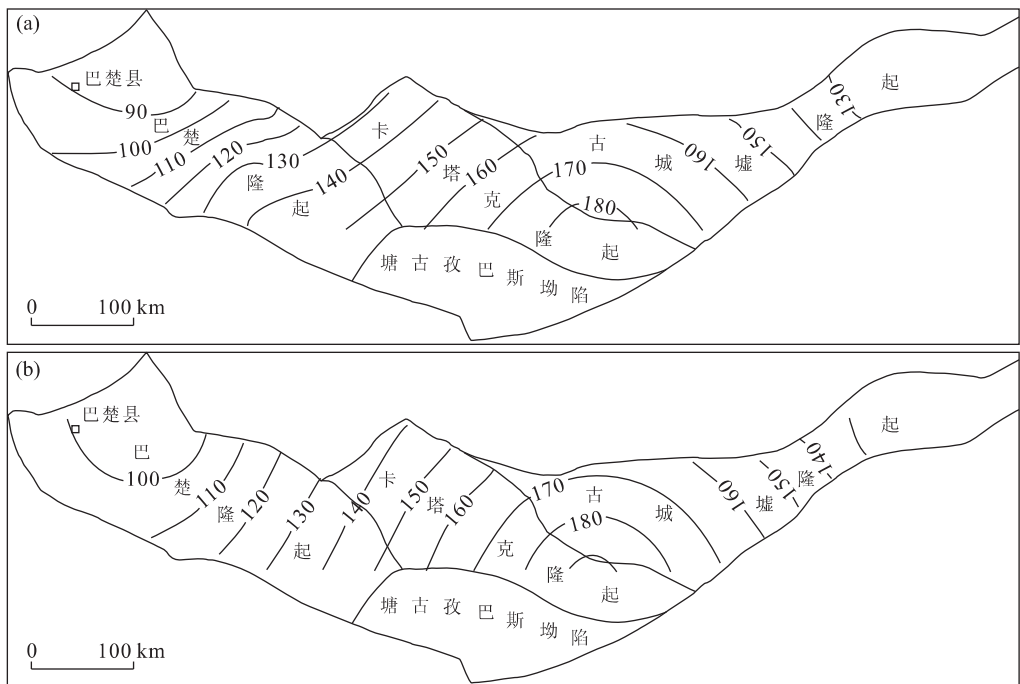


图 6 中寒武统顶面(a)和下寒武统顶面(b)地温等值线(单位:°C)

Fig. 6 Contour map of subsurface temperature on the top surface of the Middle Cambrian (a) and the Lower Cambrian (b)

表 2 塔中隆起区实测大地热流数据

Table 2 Newly retrieved heat flow data in the central uplift area of the Tarim basin

| 序号 | 井名   | 经度        | 纬度        | 深度范围(m)     | 地温梯度( $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ) |       | 热导率( $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ) | 热流( $\text{mW}/\text{m}^2$ ) |
|----|------|-----------|-----------|-------------|--------------------------------------|-------|---|------------------------------|
|    |      |           |           |             | 均值 $\pm$ 标准偏差                        | 相关系数  |   |                              |
| 1  | 巴探 2 | 78°03'16" | 39°26'21" | 100~2 550   | 23.5 $\pm$ 0.57                      | 0.999 | 1.841                                   | 43.3                         |
| 2  | 巴探 3 | 78°02'50" | 39°26'38" | 100~2 350   | 21.8 $\pm$ 1.17                      | 0.997 | 1.981                                   | 43.2                         |
| 3  | 塘北 2 | 82°14'45" | 38°35'51" | 300~4 900   | 19.8 $\pm$ 1.17                      | 0.999 | 2.000                                   | 39.6                         |
| 4  | 中 4  | 84°22'47" | 38°37'14" | 1 900~6 080 | 20.2 $\pm$ 1.55                      | 0.998 | 2.773                                   | 56.0                         |
| 5  | 塔中 1 | 83°55'41" | 38°48'39" | 5 000~6 370 | 16.6 $\pm$ 0.36                      | 0.999 | 3.798                                   | 63.0                         |

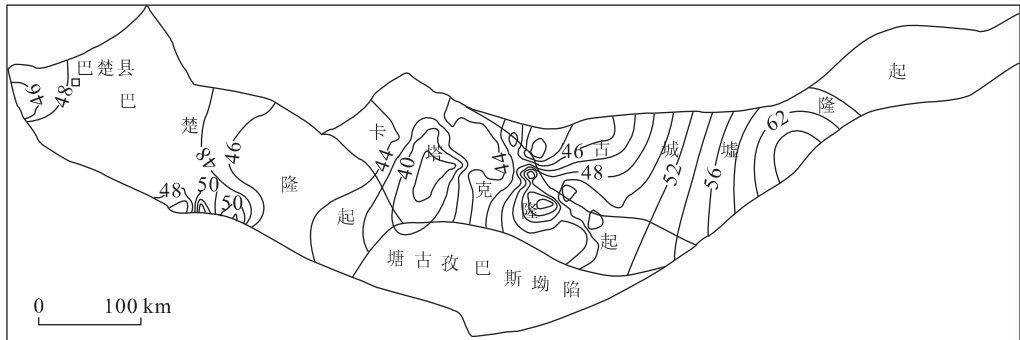
图 7 中央隆起区的现今大地热流等值线(单位: $\text{mW}/\text{m}^2$ )

Fig. 7 Contour map of terrestrial heat flow in the central uplift area of the Tarim basin

流估算值(未列出). 在这 99 个新热流值基础上, 并结合前人在该区已发表的 2 个热流实测值(王钧等, 1995), 我们绘制了中央隆起区现今大地热流分布(图 7).

总体而言, 中央隆起区现今大地热流变化范围为  $33.5\sim 66.1 \text{ mW}/\text{m}^2$ , 平均为  $47.3 \text{ mW}/\text{m}^2$ . 与地温梯度一样, 不同构造单元间的大地热流的差异也受基底起伏的控制. 一般地, 基底隆起处的现今大地热流较高, 如巴楚隆起平均大地热流为  $48.4 \text{ mW}/\text{m}^2$ , 卡塔克隆起平均大地热流为  $46.7 \text{ mW}/\text{m}^2$ , 古城墟隆起平均大地热流为  $51.7 \text{ mW}/\text{m}^2$ ; 而塘古孜巴斯坳陷平均大地热流仅为  $39.6 \text{ mW}/\text{m}^2$ , 明显低于上述 3 个隆起区. 实际上, 这种受基底起伏格局影响的隆、坳间的热流不同是其岩石热物性差异引起的热折射效应的体现, 后面会对此进行详细的讨论. 由图 7 还可看出, 除了不同构造单元之间的热流分布差异之外, 中央隆起区各构造单元内部的热流也存在一定的差异, 这也反映了基底起伏格局的影响.

### 3 讨论

#### 3.1 中央隆起区的热状态

本研究表明, 中央隆起区的现今地温梯度为  $17\sim 29 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 平均为  $23.3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ; 现今大地热流

为  $33.5\sim 66.1 \text{ mW}/\text{m}^2$ , 平均为  $47.3 \text{ mW}/\text{m}^2$ . 与中国东部大中型盆地内的二级构造单元相比, 如渤海湾盆地的济阳凹陷(梯度为  $37.6 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 热流为  $65.8 \text{ mW}/\text{m}^2$ )(龚育龄等, 2003a, 2003b)和渤海盆地( $33 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , 热流为  $66 \text{ mW}/\text{m}^2$ )(肖卫勇等, 2001; 王良书等, 2002), 中央隆起区表现为相对低温冷盆的热状态特征. 但它基本上与中部的鄂尔多斯盆地( $29 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,  $62 \text{ mW}/\text{m}^2$ )(任战利等, 2007)、四川盆地( $21 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,  $49 \text{ mW}/\text{m}^2$ )(袁玉松等, 2006)、西部的准噶尔盆地( $21.2 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,  $42.3 \text{ mW}/\text{m}^2$ )(王社教等, 2000)及柴达木盆地( $28 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,  $52.6 \text{ mW}/\text{m}^2$ ; Qiu, 2003)等盆地的热状态相当. 另外, 中央隆起区却高于塔里木盆地( $20 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ,  $42.4 \text{ mW}/\text{m}^2$ ; 王钧等, 1995)及其二级构造单元(如塔北地区, 见魏大卫, 1992; 谢德宜, 1993), 因此, 它是塔里木这一低温冷盆中的相对高温区.

尽管中央隆起区二叠纪为裂谷发育阶段, 出现大范围岩浆侵入及火山喷发活动(贾承造, 1997; 杨树锋等, 2005; 张洪安等, 2009), 考虑到岩石圈尺度热扰动的热松弛时间约  $65 \text{ Ma}$ (Turcotte and Schubert, 1982), 由于二叠纪岩浆活动热事件( $\sim 250 \text{ Ma}$ )距离现今极为久远, 其引发的热异常早已消失殆尽. 其后, 该区并无显著的大规模构造运动, 而新生代期间的印度—欧亚大陆碰撞及其远距



离效应则主要体现在盆、山边界部位,而对中央隆起区的影响不大.实际上,本次研究揭示出的该区相对低温热状态也进一步证实了上述分析.中央隆起区现今热状态记录的是该区深部活动及浅部构造演化综合效应下的反映,且这一低温冷盆的热背景可以一直追溯到中生代.

### 3.2 影响中央隆起区现今地温场分布的因素

研究表明,塔里木盆地岩石圈整体呈刚性,并以挠曲变形为主(贾承造,1997);此外,地震测深与层析成像研究也都指出,塔里木盆地之下的地震波速较高,且高速体一直延伸到近200 km的深度,暗示其岩石圈厚度巨大(胥颐等,2000;肖序常等,2004).上述地球物理资料都说明塔里木盆地深部构造活动较弱,表现为稳定的特征,这是包括中央隆起区在内的塔里木盆地现今地温较低的深部构造背景.塔里木盆地为发育在前寒武纪陆壳基底之上的克拉通盆地,盆地形成之后并未经历显著的大规模构造运动,构造上具有相对稳定的特点,已为地震活动性和GPS观测等活动构造资料所证实(Wang *et al.*, 2001;张国民等,2002).这是中央隆起区现今较低热状态的区域地质构造背景.因此,地质体所在的大地构造背景和深部动力学过程是其现今地温特征的一级控制因素.

中央隆起区各次级构造单元及次级构造单元之间的地温场主要受基底形态的控制.坳陷区沉积了较厚的中生代沉积物盖层,且沉积物普遍具有相对较低的热导率,相比而言,隆起区的基岩热导率较高,横向上岩石热导率这一差异造成了热折射效应,从而使得热流向隆起区聚集,因此隆起区形成高温区,而坳陷区形成低温区(熊亮萍和高维安,1982;Stephenson *et al.*, 2009).由于中央隆起区处于塔里木盆地中部的构造高部位,热折射效应必然使得其周边坳陷区的热流向中央隆起区聚集,从而使之成为塔里木盆地这一低温冷盆之中的相对高温区域.然而,我们也发现基底隆起较高的巴楚地区西北部的地温梯度及深部温度均较低,这是由于该区基底埋深太浅甚至出露地表,散热较快,从而造成该区地温梯度和温度都较低.

### 3.3 现今地温场与油气关系

通过分析塔里木盆地几套烃源岩顶界面现今温度状况,发现巴楚隆起中、西部地区的石炭系卡拉沙依组( $C_{1-2k}$ )和巴楚组( $C_{1b}$ )及上奥陶统良立塔格组( $O_3l$ )等烃源岩目前还处于油气有利保存状态,而中央隆起区的其他地区都进入油气有利保存状态.由

于寒武系埋深较大,现今地温均较高,仅巴楚隆起、卡塔克隆起西北部和古城墟隆起东部等地区的中、下寒武统烃源岩还处于油气有利保存状态,而其他地区处于不利的油气保存状态.今后该区油气勘探时需注意这点.当然,要准确详细地揭示该区烃源岩层的生烃状态还需要结合具体的沉积和埋藏及热演化史进行分析,本文仅是从现今地温状态的角度作了一些定性的讨论.

另外,通过对比中央隆起区现今地温梯度图和该区的油气田分布图,我们发现,已探明的油气田区往往位于区内相对高温区,且气田的温度及梯度均高于油田区(图3).文献表明,世界上油气田也具有类似特征,比如美国中部及落基山地区的绝大部分油气田均发现地温正异常(Meyer and McGee, 1985; McGee *et al.*, 1989).周庆华等(2007)统计表明,不管是热盆还是冷盆,中国大气田都发育在盆地内的高地温梯度区域内.最近,Chen *et al.* (2008)发现加拿大Beaufort-Mackenzie盆地中已探明的油气田与盆地内区域高温有很好的对应关系,并解释为新近系构造挤压作用和超压使得热流体沿断裂向上运移.一般地,受构造挤压或热一力驱动,深部热流体沿断裂向构造圈闭部位运移,这一过程伴随烃类和热的运移,因此地下热流体垂向和侧向迁移可能是造成上述现象主要的机制.虽然油气的生成受古地温演化过程影响,但上述研究表明盆地现今地温研究亦能为油气勘探起辅助作用.在今后的油气勘探中,同样要重视现今地温研究.油气田往往位于盆地内高温区域这一认识为今后油气勘探提供了地热学依据.

## 4 结论

结合塔里木盆地中央隆起区近期油气勘探中新的地温资料,本文对该区现今地温特征进行了分析研究,给出了中央隆起区现今地温梯度、1 000~5 000 m深度的地温、烃源岩顶面的温度和大地热流的分布特征.

(1) 中央隆起区现今地温梯度在17.0~29.3 °C/km之间,平均为23.3 °C/km;大地热流为33.5~66.1 mW/m<sup>2</sup>,平均为47.3 mW/m<sup>2</sup>.虽然整体上表现为低温低热流的热状态,但却为塔里木盆地中的相对高温区.此外,二叠纪期间强烈的岩浆活动对该区现今地温场已无影响.

(2) 中央隆起区1 000~5 000 m埋深处的地温展布规律极为类似,均表现为隆起区高、坳陷区低的

特征,体现出构造影响下的基底起伏格局对现今地温场的控制。温度随深度而增加,1 000 m 处的温度介于 30~41 °C 之间,平均为 35 °C;2 000 m 深度的地温介于 48~71 °C 之间,平均为 58 °C;3 000 m 深度的地温介于 65~100 °C 之间,平均为 81 °C;4 000 m 深度的地温介于 83~129 °C 之间,平均为 105 °C;5 000 m 深度的地温介于 101~159 °C,平均为 128 °C。

(3) 烃源岩顶界面温度表明,巴楚隆起西部的巴楚组、卡拉沙依组和良立塔格组烃源岩目前均处于有利的油气保存状态,而其他地区则进入油气有利保存状态。对中下寒武统烃源岩而言,巴楚隆起、卡塔克隆起西北部和古城墟隆起东部尚处于有利保存状态,而其他地区处于不利保存状态。然而,要准确探讨其生烃状态,还需结合具体的埋藏和热史分析。此外,还发现已探明的油气田都位于高温区域,且气田区的温度要高于油田区。上述认识为该区今后的油气勘探提供了地热学依据。

致谢:在地温数据收集过程中得到了中石化西北勘探开发研究院及中国石油大学(北京)李美俊博士的大力帮助。热导率测试所用的 TCS 扫描仪由中国科学院地质与地球物理研究所胡圣标研究员提供。在此一并表示感谢!

## References

- Allen, P. A., Allen, J. R., 2005. Basin analysis: principles and applications (2nd edition). Blackwell Publishing, Oxford.
- Barker, C., 1996. Thermal modeling of petroleum generation: theory and applications. Elsevier Science, New York.
- Bullard, E. C., 1939. Heat flow in South Africa. *Proceedings of the Royal Society of London (Ser. A)*, 173955: 474—502.
- Chen, Z. H., Osadetz, K. G., Issler, D. R., et al., 2008. Hydrocarbon migration detected by regional temperature field variations, Beaufort-Mackenzie basin, Canada. *AAPG Bulletin*, 92(12): 1639—1653. doi: 10.1306/07300808011
- Doré, A. G., Auguston, J. H., Hermanrud, C., et al., 1993. Basin modeling: advances and applications. Norwegian Petroleum Society Special Publication, No. 3. Elsevier, New York.
- Förster, A., Merriam, D. F., 1999. Geothermics in basin analysis. Kluwer/Plenum Publishers, New York.
- Gong, Y. L., Wang, L. S., Liu, S. W., et al., 2003a. Distribution characteristics of geotemperature field in Jiyang depression, Shandong, North China. *Chinese Journal of Geophysics*, 46(5): 652—658 (in Chinese with English abstract).
- Gong, Y. L., Wang, L. S., Liu, S. W., et al., 2003b. Distribution characteristics of terrestrial heat flow density in Jiyang depression of Shengli oilfield, East China. *Science in China (Series D)*, 33(4): 384—391 (in Chinese).
- He, Z. L., Chen, Q. L., Qian, Y. X., et al., 2006. Hydrocarbon exploration targets in central uplift area of Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 27(6): 769—778 (in Chinese with English abstract).
- Jia, C. Z., ed., 1997. Structural characteristics and hydrocarbon in Tarim basin of China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese).
- Li, H. L., Qiu, N. S., Jin, Z. J., et al., 2004. Study on thermal history of Tazhong area, Tarim basin. *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition)*, 19(4): 36—39, VI (in Chinese with English abstract).
- Li, P. L., 2007. Potential areas and exploration direction in the central uplift belt of the Tarim basin. *Oil & Gas Geology*, 28(5): 576—583, 589 (in Chinese with English abstract).
- Li, S. M., Pang, X. Q., Yang, H. J., et al., 2008. Characteristics and genetic type of the oils in the Tazhong uplift. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 33(5): 635—642 (in Chinese with English abstract).
- McGee, H. W., Meyer, H. J., Pringle, T. R., 1989. Shallow geothermal anomalies overlying deeper oil and gas deposits in Rocky mountain region. *AAPG Bulletin*, 73(5): 576—597.
- Meyer, H. J., McGee, H. W., 1985. Oil and gas fields accompanied by geothermal anomalies in Rocky mountain region. *AAPG Bulletin*, 69(6): 933—945.
- Popov, Y. A., Pribnow, D. F. C., Sass, J. H., et al., 1999. Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics*, 28(2): 253—276. doi: 10.1016/S0375-6505(99)00007-3
- Qiu, N. S., 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of Northwest China. *Chinese Journal of Geology*, 37(2): 196—206 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., 2003. Geothermal regime in the Qaidam basin, northeast Qinghai-Tibet Plateau. *Geological Magazine*, 140(6): 707—719. doi: 10.1017/S0016756803008136
- Qiu, N. S., Jin, Z. J., Wang, F. Y., 1997. The effect of the complex geothermal field based on the multi-structure evolution to hydrocarbon generation—a case of Tazhong

- area in Tarim basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 15 (2): 142—144 (in Chinese with English abstract).
- Qiu, N. S., Wang, J. Y., Reiners, P. W., et al., 2010. Early Paleozoic tectonothermal evolution of the Tarim basin: constrained by (U-Th)/He ages. *Science China (Ser. D)*. (in Press).
- Ren, Z. L., Zhang, S., Gao, S. L., et al., 2007. Tectonic thermal history and its significance on the formation of oil and gas accumulation and mineral deposit in Ordos basin. *Science in China (Series D)*, 50 (Suppl. II): 27—38. doi:10.1007/s11430-007-6022-1 (in Chinese).
- Stephenson, R., Egholm, D. L., Nielsen, S. B., et al., 2009. Role of thermal refraction in localizing intraplate deformation in southeastern Ukraine. *Nature Geoscience*, 2: 290—293. doi:10.1038/ngeo479
- Tissot, B. P., Pelet, R., Ungerer, P., 1987. Thermal history of sedimentary basins, maturation indices, and kinetics of oil and gas generation. *AAPG Bulletin*, 71 (12): 1445—1466.
- Turcotte, D. L., Schubert, G., 1982. Geodynamics application of continuum physics to geological problems (2nd edition). John Wiley and Sons, New York, 134—195.
- Wang, J., Wang, J. A., Shen, J. Y., et al., 1995. Heat flow in Tarim basin. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20 (4): 399—404 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Li, C., Liu, S. W., et al., 2003. Geotemperature gradient distribution of Kuqa foreland basin, north of Tarim, China. *Chinese Journal of Geophysics*, 46 (3): 403—407 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Li, C., Liu, S. W., et al., 2005. Terrestrial heat flow distribution in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China. *Petroleum Exploration and Development*, 32 (4): 79—83 (in Chinese with English abstract).
- Wang, L. S., Li, C., Shi, Y. S., 1995. Distribution of terrestrial heat flow density in Tarim basin, western China. *Acta Geophysica Sinica*, 38 (6): 855—856 (in Chinese).
- Wang, L. S., Liu, S. W., Xiao, W. Y., et al., 2002. Distribution feature of terrestrial heat flow densities in the Bohai basin, East China. *Chinese Science Bulletin*, 47 (2): 151—155 (in Chinese).
- Wang, Q., Zhang, P. Z., Freymueller, J. F., et al., 2001. Present-day crustal deformation in China constrained by global positioning system measurements. *Science*, 294 (5524): 574—577. doi:10.1126/science.1053647
- Wang, S. J., Hu, S. B., Wang, J. Y., 2000. The characteristics of heat flow and geothermal fields in Junggar basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 43 (6): 771—779 (in Chinese with English abstract).
- Wei, D. W., 1992. Terrestrial heat flow on the northern side of Tarim basin. *Scientia Geologica Sinica*, 1: 93—96 (in Chinese with English abstract).
- Woodside, W., Messmer, J. H., 1961a. Thermal conductivity of porous media: I. unconsolidated sands. *Journal of Applied Physics*, 32 (9): 1688—1699.
- Woodside, W., Messmer, J. H., 1961b. Thermal conductivity of porous media: II. consolidated rocks. *Journal of Applied Physics*, 32: 1699—1706.
- Xiao, W. Y., Wang, L. S., Li, H., et al., 2001. Geotemperature field in Bohai Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)*, 15 (2): 105—110 (in Chinese with English abstract).
- Xiao, X. C., Liu, X., Gao, R., et al., 2004. The crustal structure and tectonic evolution of southern Xinjiang, China. The Commercial Press, Beijing (in Chinese).
- Xie, D. Y., 1993. Geothermal characteristics in northern Tarim basin, northwestern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 18 (5): 627—634 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, L. P., Gao, W. A., 1982. Characteristics of geotherm in uplift and depression. *Chinese Journal of Geophysics*, 25 (5): 448—456 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Y., Liu, F. T., Liu, J. H., et al., 2000. Seismic tomography beneath the orogenic belts and adjacent basins of northwestern China. *Science in China (Series D)*, 30 (2): 113—122 (in Chinese).
- Yang, S. F., Chen, H. L., Ji, D. W., et al., 2005. Geological process of Early to Middle Permian magmatism in Tarim basin and its geodynamic significance. *Geological Journal of China Universities*, 11 (4): 504—511 (in Chinese with English abstract).
- Yang, W., Wei, G. Q., Wang, Q. H., et al., 2004. Two types of Cambrian source rocks and related petroleum systems in Tarim basin. *Oil and Gas Geology*, 25 (3): 263—267 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, Y. S., Ma, Y. S., Hu, S. B., et al., 2006. Present-day geothermal characteristics in South China. *Chinese Journal of Geophysics*, 49 (4): 1118—1126 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, G. M., Wang, S. Y., Li, L., et al., 2002. Focal depth research of earthquakes in Mainland China: implications for tectonics. *Chinese Science Bulletin*, 47 (9): 663—668 (in Chinese).
- Zhang, H. A., Li, Y. J., Wu, G. Y., et al., 2009. Isotopic geochronology of Permian igneous rocks in the Tarim basin. *Chinese Journal of Geology*, 44 (1): 137—158 (in Chinese with English abstract).

Chinese with English abstract).

Zhang, H. R., Liu, G. B., 1992. The hydrocarbon occurrence and characteristics of geothermal field in Tarim basin. *Xinjiang Petroleum Geology*, 13(4): 294—304 (in Chinese with English abstract).

Zhou, Q. H., Feng, Z. H., Men, G. T., 2008. Present geotemperature and its suggestion to natural gas generation in Xujiaweizi fault-depression of northern Songliao basin. *Science in China (Series D)*, 37(Suppl. II): 177—188. doi:10.1007/s11430-008-5007-z

Ziegler, P. A., Cloetingh, S., 2004. Dynamic processes controlling evolution of rifted basins. *Earth-Science Reviews*, 64(1—2): 1—50. doi:10.1016/S0012-8252(03)00041-2

## 附中文参考文献

龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等, 2003a. 济阳拗陷地温场分布特征. *地球物理学报*, 46(5): 652—658.

龚育龄, 王良书, 刘绍文, 等, 2003b. 济阳拗陷大地热流分布特征. *中国科学(D辑)*, 33(4): 384—391.

何治亮, 陈强路, 钱一雄, 等, 2006. 塔里木盆地中央隆起区油气勘探方向. *石油与天然气地质*, 27(6): 769—778.

贾承造, 1997. 中国塔里木盆地构造特征与油气. 北京: 石油工业出版社, 1—438.

李惠莉, 邱楠生, 金之钧, 等, 2004. 塔里木盆地塔中地区地质热历史研究. *西安石油大学学报(自然科学版)*, 19(4): 36—39. VI.

李丕龙, 2007. 塔里木盆地中央隆起带油气突破领域与勘探方向. *石油与天然气地质*, 28(5): 576—583, 589.

李素梅, 庞雄奇, 杨海军, 等, 2008. 塔中隆起原油特征与成因类型. *地球科学——中国地质大学学报*, 33(5): 635—642.

邱楠生, 2002. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征. *地质科学*, 37(2): 196—206.

邱楠生, 金之钧, 王飞宇, 1997. 多期构造演化盆地的复杂地温场对油气生成的影响——以塔里木盆地塔中地区为例. *沉积学报*, 15(2): 142—144.

邱楠生, 汪集旸, Reiners, P. W., 等, 2010. (U-Th)/He 年龄约束下的塔里木盆地早古生代构造—热演化研究. *中国科学(D辑)*, 待刊.

任战利, 张盛, 高胜利, 等, 2007. 鄂尔多斯盆地构造热演化史及其成藏成矿意义. *中国科学(D辑)*, 37(增刊 I): 23—32.

王钧, 汪集安, 沈继英, 等, 1995. 塔里木盆地的大地热流. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(4): 399—404.

王良书, 李成, 刘绍文, 等, 2003. 塔里木盆地北缘库车前陆盆地地温梯度分布特征. *地球物理学报*, 46(3): 403—407.

王良书, 李成, 刘绍文, 等, 2005. 库车前陆盆地大地热流分布特征. *石油勘探与开发*, 32(4): 79—83.

王良书, 李成, 施央申, 1995. 塔里木盆地大地热流密度分布特征. *地球物理学报*, 38(6): 855—856.

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.

王社教, 胡圣标, 汪集旸, 2000. 准噶尔盆地热流及地温场特征. *地球物理学报*, 43(6): 771—779.

魏大卫, 1992. 塔里木盆地北缘大地热流测定. *地质科学*, 1: 93—96.

肖卫勇, 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.

肖序常, 刘训, 高锐, 等, 2004. 新疆南部地壳结构和构造演化. 北京: 商务印书馆.

谢德宜, 1993. 塔里木盆地北部的地温特征. *地球科学——中国地质大学学报*, 18(5): 627—634.

熊亮萍, 高维安, 1982. 隆起与拗陷地区地温场的特点. *地球物理学报*, 25(5): 448—456.

胥颐, 刘福田, 刘建华, 等, 2000. 中国大陆西北造山带及其毗邻盆地的地震层析成像. *中国科学(D辑)*, 30(2): 113—122.

杨树锋, 陈汉林, 冀登武, 等, 2005. 塔里木盆地早—中二叠世岩浆作用过程及地球动力学意义. *高校地质学报*, 11(4): 504—511.

杨威, 魏国齐, 王清华, 等, 2004. 塔里木盆地寒武系两类优质烃源岩及其形成的含油气系统. *石油与天然气地质*, 25(3): 263—267.

袁玉松, 马永生, 胡圣标, 等, 2006. 中国南方现今地热特征. *地球物理学报*, 49(4): 1118—1126.

张国民, 汪素云, 李丽, 等, 2002. 中国大陆地震震源深度及其构造含义. *科学通报*, 47(9): 663—668.

张洪安, 李日俊, 吴根耀, 等, 2009. 塔里木盆地二叠纪火成岩的同位素年代学. *地质科学*, 44(1): 137—158.

张惠蓉, 刘国壁, 1992. 塔里木盆地地热场特征与油气. *新疆石油地质*, 13(4): 294—304.

周庆华, 冯子辉, 门广田, 2007. 松辽盆地北部徐家围子断陷现今地温特征及其与天然气生成关系研究. *中国科学(D辑)*, 37(增刊 II): 177—188.