

左银辉, 邱楠生, 邓已寻等. 查干凹陷大地热流. 地球物理学报, 2013, 56(9): 3038-3050, doi:10.6038/cjg20130917.

Zuo Y H, Qiu N S, Deng Y X, et al. Terrestrial heat flow in the Qagan sag, Inner Mongolia. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(9): 3038-3050, doi:10.6038/cjg20130917.

查干凹陷大地热流

左银辉^{1,2,3}, 邱楠生^{2,3}, 邓已寻^{4,1}, 饶松⁵, 徐深谋¹, 李建国¹

1 中国石化中原油田分公司勘探开发科学研究院, 河南濮阳 457001

2 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

3 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 北京 102249

4 中国地质大学(北京)能源学院, 北京 100083

5 中国科学院地质与地球物理研究所, 中国科学院工程地质力学重点实验室, 北京 100029

摘 要 查干凹陷是银根—额济纳旗盆地最具勘探潜力的凹陷, 但是查干凹陷及整个银根—额济纳旗盆地的大地热流研究仍为空白, 严重制约该盆地的油气资源的评价. 本文通过测试 19 口井 107 块岩芯的岩石热导率和岩石热导率原位校正, 利用协和平均公式计算得到查干凹陷各地层的岩石热导率大小; 并利用 9 口井的温度数据, 结合岩石热导率数据对查干凹陷的地温梯度和大地热流进行了计算. 研究结果表明查干凹陷具有构造稳定区和构造活动区之间的中温型地温场特征, 其平均地温梯度和大地热流分别为 33.6 °C/km, 74.5 mW/m². 本文的研究成果为查干凹陷及银根—额济纳旗盆地油气资源评价提供地热参数.

关键词 查干凹陷, 银根—额济纳旗盆地, 大地热流, 岩石热导率, 地温梯度

doi:10.6038/cjg20130917

中图分类号 P314

收稿日期 2012-10-29, 2013-01-10 收修定稿

Terrestrial heat flow in the Qagan sag, Inner Mongolia

ZUO Yin-Hui^{1,2,3}, QIU Nan-Sheng^{2,3}, DENG Yi-Xun^{4,1},

RAO Song⁵, XU Shen-Mou¹, LI Jian-Guo¹

1 *Research Institute of Exploration and Development, Zhongyuan Oilfield, SINOPEC, Henan Puyang 457001, China*

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

3 *Research Center for Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China*

4 *School of Energy Resources, China University of Geosciences, Beijing 100083, China*

5 *Key Laboratory of Engineering Geomechanics, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Abstract The Qagan sag has the most oil and gas exploration potential among other sags in the Ingggen-Ejin Qi basin, but the terrestrial heat flow research is still blank in the Qagan sag and other sags of the Ingggen-Ejin Qi basin. It seriously restricts the oil and gas resource assessment in the Qagan sag. In the paper, 107 rock thermal conductivity data of 19 wells were measured and in-situ corrected, and the rock thermal conductivities of each stratum were obtained by Union average formula. Based on the 9 wells' temperatures, combined with the above rock thermal conductivity data, the geothermal gradient and terrestrial heat flow data were calculated. The results show that the Qagan sag has the characteristics of medium temperature field in between tectonically stable and active regions, with an average thermal gradient value of 33.6 °C/km and

基金项目 国家自然科学基金项目(91114202, 90914006)和重庆市自然科学基金重点项目(CSTC2012jjB90007)资助.

作者简介 左银辉, 男, 1980 年生, 2011 年获中国石油大学(北京)地质学专业博士学位, 主要从事沉积盆地现今地温场、沉积盆地构造-热演化、油气资源评价和地球动力学方面的研究. E-mail: zuoyinhui@tom.com

an average terrestrial heat flow value of 74.5 mW/m^2 . The paper provides the geothermal data for oil and gas resource assessment of the Qagan sag and other sags of the Ingggen-Ejin Qi basin.

Keywords Qagan sag, Ingggen-Ejin Qi basin, Terrestrial heat flow, Rock thermal conductivity, Thermal gradient

1 引言

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,是地球内部热作用过程最直接的表达,蕴含着丰富的地质、地球物理和地球动力学信息,其分布受控于岩石圈构造演化和深部地球动力学过程,为盆地的形成机制和演化过程的研究及油气资源评价提供重要依据.大陆大地热流测量始于1939年,海洋大地热流于1952年获得首批可靠数据.到1975年,全球共获得大地热流数据5417个^[1-2].大地热流一直都是国际研究的热点课题^[3-8].我国大地热流的研究相对较晚,始于20世纪60年代,1966年报道过东北中生代盆地的三个热流数据^[9],直到1979年1月才正式公布了第一批大地热流值(共25个数据)^[10],正式拉开我国大地热流研究的序幕,越来越多的专家学者从事这一工作,开始探索大地热流与地球动力、油气生成、地震活动和地热资源等的内在联系.到1988年,汪集旻等受国际热流委员会的委托,对中国大陆地区的大地热流进行了汇编^[11],此时,我国大陆地区已经有167个大地热流数据,但这些热流数据主要集中于华北、东北及其邻区,攀西、藏南仅有少量测点,而广大西北地区和东南沿海一带则完全是空白.随后两年,我国加大了大地热流研究的资助,各项重大地学研究课题及全国地学大断面(GGT)项目的开展,大地热流数据增加较快,截至1990年公开发表了366个大地热流数据^[12],这些数据分布较1988年有了很大的改善,热流数据的覆盖面已经由华北、东北、西藏和四川局部地区扩大到华南、中原和西南部分地区.最近一次大陆地区大地热流数据汇编于2001年完成^[13],经过20余年的努力,我国大陆地区的大地热流汇编数据已经达到862个,热流数据已经覆盖我国大陆包括西北塔里木盆地、准噶尔盆地、柴达木盆地在内的大部分地区.最近10年,中国大地热流的研究仍在不断地进行,但是研究地区主要位于塔里木盆地和渤海湾盆地及邻区^[14-26],对于大地热流近乎空白的内蒙古地区,仅有海拉尔盆地公布少量数据^[14,18].目前为止,内蒙

古银根—额济纳旗盆地(简称银—额盆地)仍没有大地热流值,这严重制约了银—额盆地的油气勘探进展及揭示该盆地地球动力学特征.查干凹陷是银—额盆地中中生代沉积厚度最厚,目前认为是银—额盆地中最具勘探潜力的凹陷.自1995年的第一口井——CC1井揭示存在良好的油气资源潜力以来,到2012年已钻探30余口探井,其中多口井获得工业油气流.已发现三级石油储量4000余万吨,发现一个新油田——吉祥油田.但是仍存在很多制约勘探进程的关键问题,其中烃源岩成熟演化、生排烃史、油气运聚史及资源潜力等问题与大地热流紧密相关.因此,研究查干凹陷的大地热流势在必行,为全面评定查干凹陷及银—额盆地生烃潜力提供保证.

近年来随着查干凹陷油气勘探的进展,已有9口井的测温资料,为研究查干凹陷地温梯度分布提供保障,同时,测试了19口井107块岩芯的岩石热导率,为研究查干凹陷的大地热流提供基础.

2 地质背景

查干凹陷地处内蒙古自治区巴彦淖尔盟乌拉特后旗.区域构造上位于银根—额济纳旗盆地东部查干德勒苏坳陷的中部,凹陷西临西尼凸起,东以楚干凸起与白云凹陷相隔,西南为木巴图隆起,东南紧靠狼山.其呈不规则的“菱形”展布,北东长60 km,北西宽40 km,勘探面积约2000 km²,是一个呈西北断、东南超的单断箕状结构的中、新生代断陷盆地,是银—额盆地中最富勘探潜力的凹陷.根据基底起伏、断裂系统解释成果及构造演化特征,查干凹陷划分为“两凹一凸”的构造格局,即额很—虎勒次凹(西部次凹)、罕塔庙次凹(东部次凹)和毛敦次凸,各个构造单位又包括多个次一级构造单元(图1).地层包括早白垩世巴音戈壁组(从下至上分为 K_1b^1 和 K_1b^2)、苏红图组(从下至上分为 K_1s^1 和 K_1s^2)、银根组(K_1y)、晚白垩世乌兰苏海组(K_2w)及新生界,其中巴音戈壁组一段、二段和苏红图组一段为该区的3套烃源岩层系.由于燕山和喜山等造山运动,研究区经历了4期构造阶段:(1)早白垩世巴音戈壁组—苏二段沉积时期为走滑—拉分断陷

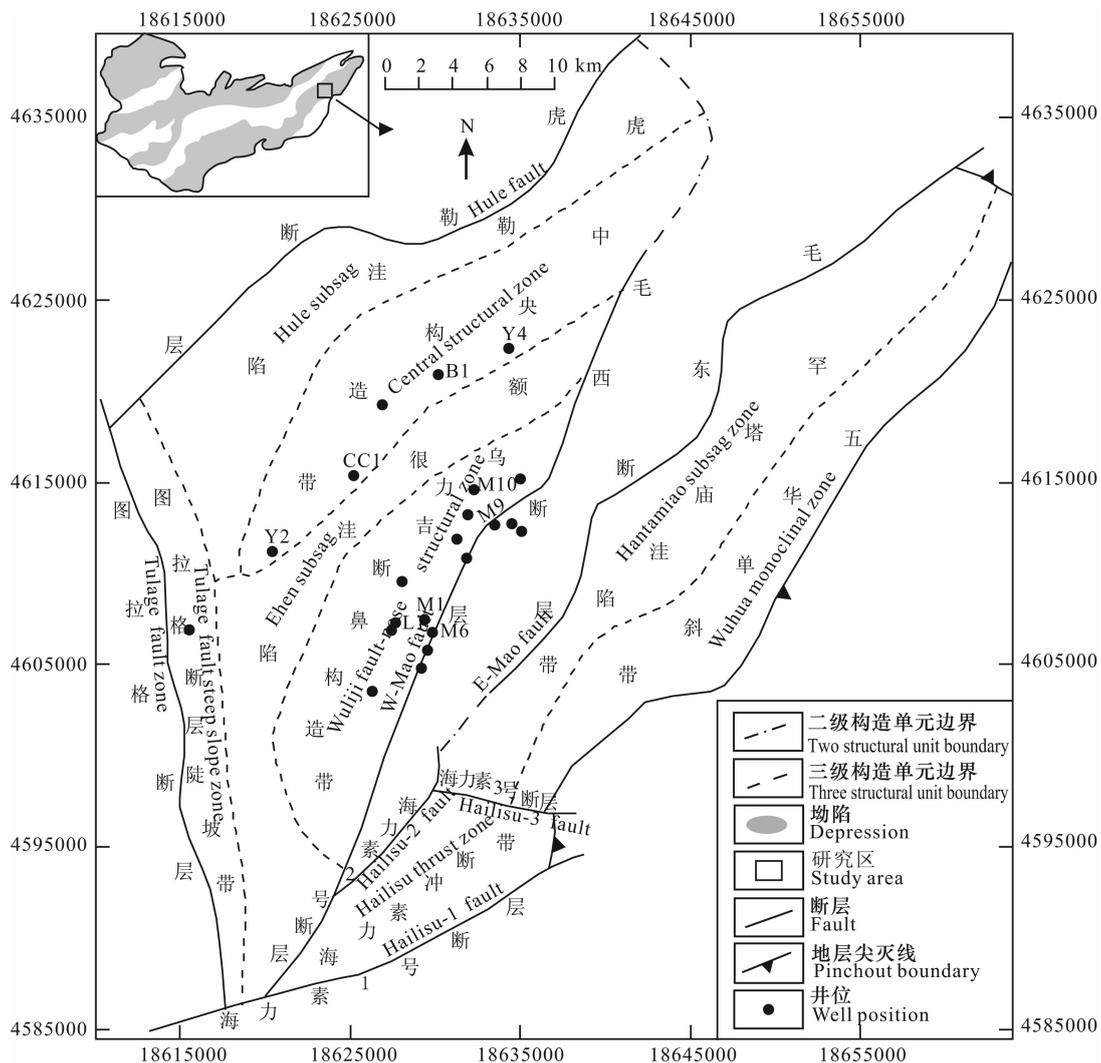


图1 查干凹陷构造划分图

Fig. 1 Sketch map of structural unit division in the Qagan sag

期, 该时期断裂活动强烈, 伴随多期火山活动, 沉积一套中基性火山岩与碎屑岩的组合; (2) 早白垩世银根组沉积时期为断拗转换期, 发育一套河流-滨浅湖为主的地层; (3) 晚白垩世乌兰苏海组沉积时期为拗陷期, 发育一套河流相为主的地层; (4) 新生代为挤压抬升期, 凹陷发生局部的挤压冲断现象, 发育一组逆冲断层和反转构造, 局部地区接受新生界沉积。

3 研究方法

3.1 大地热流计算方法

大地热流是一个综合性参数, 它比其它地热参数(如温度、地温梯度)更能确切地反映一个地区地热场的特征。可由以下公式计算得到:

$$q = -K \times G, \quad (1)$$

式中, q 为大地热流, mW/m^2 ; K 为岩石热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; G 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 。负号表示大地热流方向与地温梯度方向相反。

3.2 地温梯度计算方法

从式(1)可以看出, 地温梯度是计算大地热流关键参数之一, 目前用于计算地温梯度的温度数据主要包括静温和流温。前者通常是在完井后, 关井数天或长期关井后试油时将仪器下放至接近油层射井段, 进行温度测量获得的数据。由于关井时间长, 井温基本上已与地层温度达到平衡, 是研究地温场特征的主要数据之一。后者主要包括测井测温数据, 也是地温场研究的主要数据之一。但是由于测井测温一般都在刚完钻时就进行测温, 其测试的温度数据与实际地层温度存在一定的差异。这是因为在钻探过程中钻头的摩擦生热和钻井液(泥浆)的循环, 破坏了钻孔及其附近的地温状况。钻头的摩

擦生热仅发生在钻头所接触的部位,在时间上是短暂的,热效应一般为井液循环所抵消.井液循环在整个钻进过程中连续发生,直至钻探完成和井液循环停止后才终止,钻探产生的热效应开始逐渐消失,井温开始恢复.钻井结束后井温变化可分为三段:上段瞬时井温比原始地温高,下段比原始地温低.在某些情况下如果钻头摩擦生热量很大,不能为井液循环抵消,则井底井液温度可能会比原始地温高.在上下两段之间有一过渡带,此处井液温度和围岩地温相平衡,称为中性点或中性段(O点)(图2).

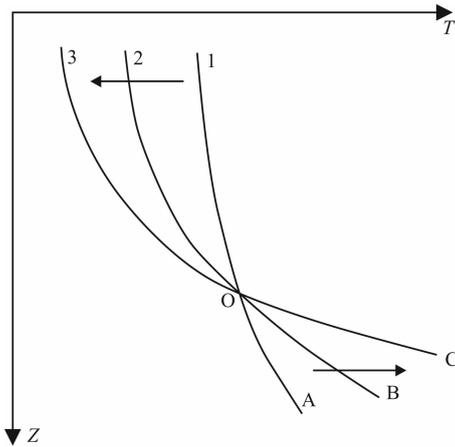


图2 停钻后井液温度恢复曲线示意图

3—C线为原始地温曲线,O点为中性点(井液温度和围岩地温相平衡),1—A线为停钻后不久的测温曲线,2—B是停钻一段时间的测温曲线,随停钻时间的增加,测温曲线向箭头所指方向变化,箭头指向是地温恢复的方向.

Fig. 2 Schematic diagram of borehole temperature recovery curve after stopping drilling

Line 3—C represents the original geotemperature curve. Point O is the neutral point where the drilling fluid temperature and the true formation temperature achieve a balance. Line 1—A shows the measured temperature shortly after stopping drilling. Line 2—B notes the measured temperature after stopping drilling for some time. The temperature curve changes (arrow) over time after stopping drilling. The arrow denotes the direction of the temperature recovery.

本文根据不同类型的温度数据,采用不同的研究方法.对于为静井温度数据的井利用公式(2)计算得到该井的地温梯度;而对于流温数据(测井测温)寻找中性点(O点)对应的温度及深度,再利用公式(2)计算得到地温梯度.

$$G = (T - T_0) / (Z - Z_0), \quad (2)$$

式中 G 为地温梯度, $^{\circ}\text{C}/\text{km}$; T 为地层温度, $^{\circ}\text{C}$; T_0 为恒温带温度, $^{\circ}\text{C}$, 与查干凹陷年平均温度相当(取 9°C); Z 为地层深度, km ; Z_0 为恒温带深度,

取 20 m .

4 基本参数

目前,共收集到3口测井测温数据及1口分时间段进行了多次测试的井(图3)和5口井42个试油温度数据(图4),数据集中在西部次凹的中央构造带和乌力吉断鼻构造带(图1).从图4可以看出,温度随深度呈线性关系,反映查干凹陷表现出传导型地温场特征.

岩石热导率是计算大地热流的重要参数之一,其准确与否直接关系到大地热流的精度.由于查干凹陷新生代和晚白垩世岩石比较疏松且不是油气勘探的目的层,没有岩芯样品,而且地表不见出露,因此本文只采集了从早白垩世巴一段到早白垩世银根组的岩芯样品,包括19口井107块岩样,为了保证样品具有代表性,取样时尽量使得每一个层位都包括一定量不同岩性的样品.样品由中国科学院地质与地球物理研究所岩石热物性实验室测试.岩石热导率测试为干岩样,前人研究认为岩石热导率除受岩石自身成分和结构影响之外,还主要受是否饱水的影响^[27-30],因此在计算大地热流之前,先要对岩石热导率进行饱水校正.结合前人的研究成果^[27-30],采用以下思路对查干凹陷岩石热导率进行校正.

对单一矿物成分的岩石而言,热导率可表示为:

$$K = K_m^{1-\phi} \times K_w^{\phi}, \quad (3)$$

式中, ϕ 为孔隙度, $\%$, 取样品实测值或声波测井计算得到的孔隙度值; K_m 为基质或骨架的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; K_w 为孔隙水的热导率,取 $0.6\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; K 为岩石的热导率, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

$$K_{m0} = K_m^{1-\phi} \times K_{\text{空气}}^{\phi}, \quad (4)$$

式中, ϕ 和 K_m 同上; K_{m0} 为常温下实测岩样热导率值, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; $K_{\text{空气}}$ 为空气的热导率,取 $0.0257\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.

利用以上校正公式,对干燥状态的岩样的热导率进行饱水的原地校正(表1,图5),其中泥岩、砂岩、岩浆岩、白云岩及变质岩的岩石热导率分别为 $2.18, 2.44, 1.85, 3.23, 2.78\text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$.查干凹陷岩石热导率随深度增加而逐渐增加,并表现为校正值比实测值稍大些,平均增大 7.7% (图5).查干凹陷中、新生界岩性主要包括砂岩、泥岩和岩浆岩,只在乌力吉断鼻构造带上发现少量的白云岩.因此,本文不考虑白云岩的岩石热导率的影响.根据

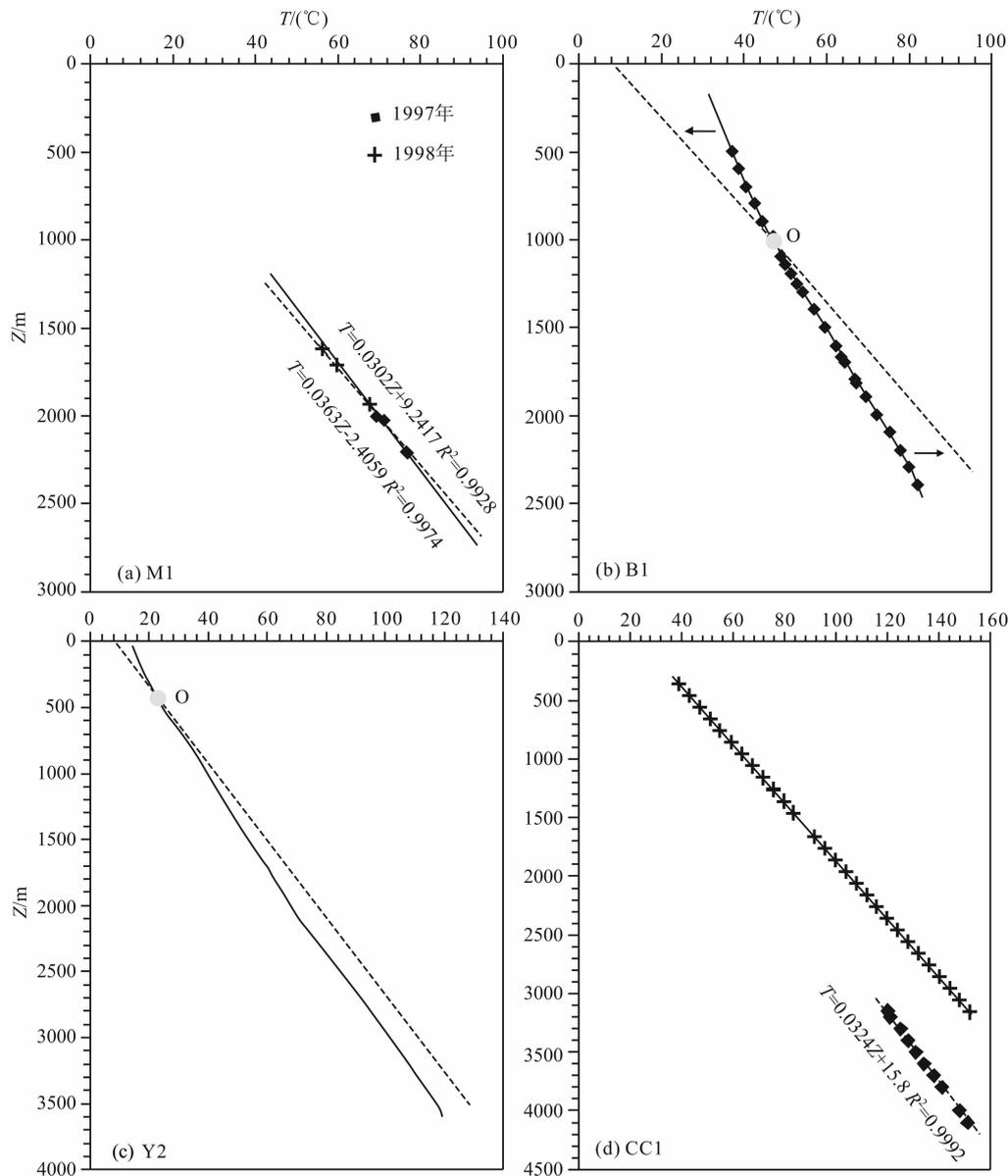


图3 查干凹陷试油温度数据(a)和测井测温数据(b—d)

Fig. 3 Formation-testing temperature data (a) and temperature data from log measurement (b—d) in the Qagan sag

地层砂岩、泥岩和岩浆岩的含量(表2),按式(5)利用加权平均求取不同地层的热导率 K 。

$$K = K_s P_s + K_n P_n + K_m P_m, \quad (5)$$

式中, K_s 、 K_n 、 K_m 、 P_s 、 P_n 和 P_m 分别为砂岩、泥岩、岩浆岩的热导率以及它们的百分含量。

表2是校正后的各地层的岩石热导率结果,其中下白垩世巴一段和巴二段岩石热导率较高,分别为 $2.44 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $2.31 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;由于苏红图组含有一定的岩浆岩,岩浆岩的热导率相对较低,使得苏红图组热导率相对较低;银根组埋藏相对较浅,岩石较疏松,孔隙度较大,使得岩石热导率偏低。同时,参考中国西北部盆地相似地层^[31]对没有岩芯样品的新生界和晚白垩世乌兰苏海组进行

了推测,分别为 $0.85 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 和 $1.46 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。

5 结果

5.1 地温梯度

这次共收集到9口井的温度数据,其中B1井、CC1井和Y2井为测井测温。M1井位于乌力吉断鼻构造带,于1997年5月3日开钻,同年6月29日完钻,7月13日完井,先后共进行了7次井温测试,由于井温受钻井时的钻头摩擦生热及钻井液的影响,一般在完井后一段时间后测试的温度才能代表真实的地层温度,从恢复的地温梯度看,1997年进行了4次测温,其地温梯度为 $30.5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}$;而1998

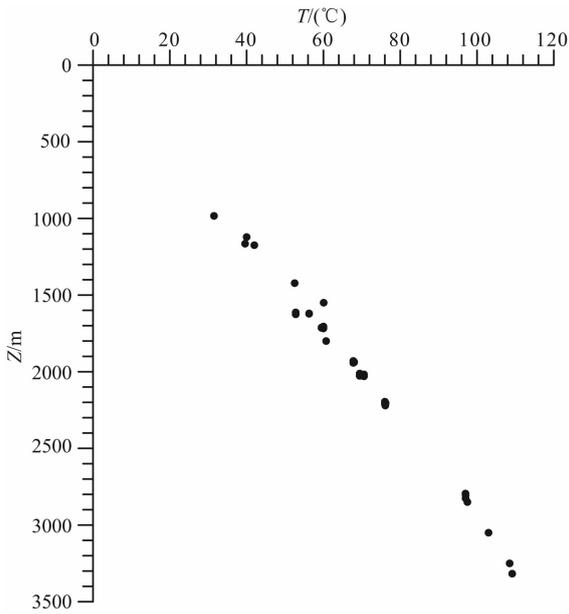


图 4 查干凹陷试油温度数据

Fig. 4 Formation-testing temperature data vs. depth in the Qagan sag

年测试的 3 次井温, 恢复的地温梯度为 $36.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 明显比 1997 年测试的地温梯度高. 到 1998 年该井关井时间达到半年以上, 地层的温度基本恢复到钻前的状态, 因此 $36.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 基本能反映该井真实

的地温梯度(图 3a). 从 M1 井不同时间段温度测试结果进一步证明钻井液对地层温度有明显影响, 因此对于在刚完钻就进行的测井测温的 B1 井和 Y2 井, 不能简单地利用温度数据回归获取地温梯度, 而应该通过识别中性点来计算地温梯度. B1 井和 Y2 井的测温曲线分别在 1000 m 和 450 m 左右出现拐点, 即中性点(图 3b, 3c), 利用中性点对应的温度和深度计算得到 B1 井、Y2 井的地温梯度分别为 $38.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 和 $32.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$. CC1 井进行了 2 次测温, 第一次由于测井仪器出问题, 造成在同一深度两次测温相差近 $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 而第二次测温是在完井十天左右进行测量的, 且测量深度靠近井底, 地温恢复相对较快, 因此第二次测温基本能代表实际地层温度, 计算得到该井的地温梯度为 $32.4\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (图 3d). 其它井大多为静温数据(图 4), 可以利用公式(2)进行计算, 得到的地温梯度近似代表该井的实际地温梯度. 计算结果显示查干凹陷现今地温梯度在 $30.5\sim 38.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$, 平均地温梯度为 $33.6\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ (表 3), 具有中温型地温场特征.

5.2 大地热流

根据以上原位校正的岩石热导率和地温梯度数据, 利用热阻法^[32] 计算得到了 9 口井的大地热流

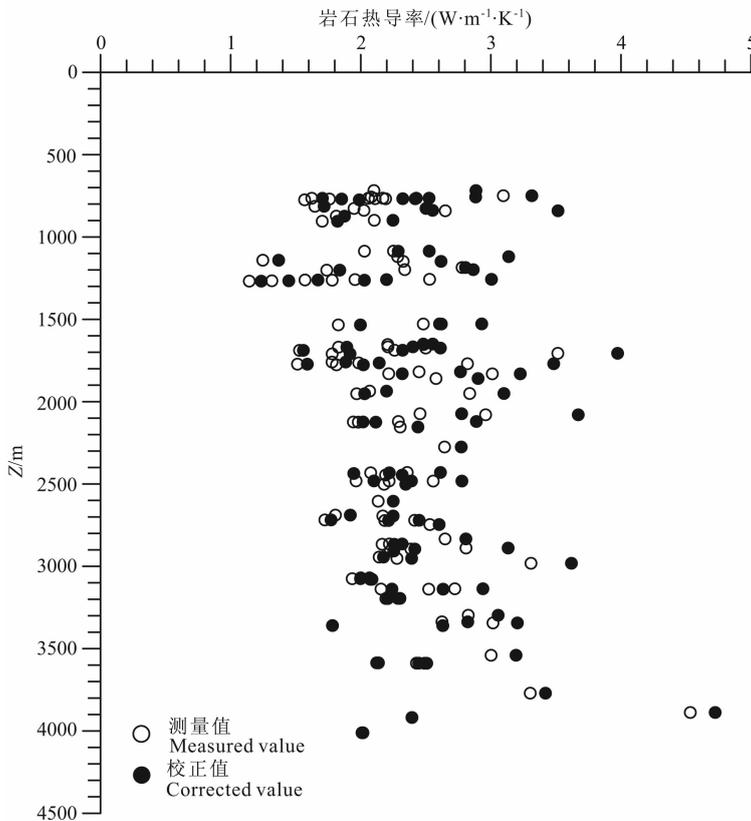


图 5 查干凹陷岩石热导率

Fig. 5 Thermal conductivity data vs. depth in the Qagan sag

表 1 查干凹陷岩石热导率

Table 1 Thermal conductivity data in the Qagan sag

序号	井名	深度(m)	岩性	孔隙度(%)	热导率(W/(m·K))		取样层位
					实测	校正	
1	CD1	749.26	玄武岩	4.00 ^a	3.01	3.10	K ₁ s ²
2	CD1	813.50	玄武岩	4.00 ^a	1.52	1.65	K ₁ s ²
3	CD1	873.42	凝灰岩	3.00 ^a	1.71	1.81	K ₁ s ²
4	J6	764.72	玄武岩	4.70 ^b	1.47	1.62	K ₁ s ²
5	J6	769.32	玄武岩	4.60 ^b	1.61	1.76	K ₁ s ²
6	J6	898.43	玄武岩	5.00 ^b	1.95	2.10	K ₁ s ²
7	J6	904.23	安山岩	6.00 ^b	1.52	1.70	K ₁ s ²
8	J6	1185.32	变质岩	0.60 ^a	2.76	2.78	P
9	L1	2430.00	凝灰岩	6.99 ^b	2.17	2.36	K ₁ s ¹
10	L1	2436.34	泥岩	0.03 ^a	1.95	1.95	K ₁ s ¹
11	L1	3359.70	泥岩	0.01 ^a	1.78	1.78	K ₁ b ¹
12	L1	3360.20	细砂岩	1.00 ^a	2.63	2.66	K ₁ b ¹
13	M10	2154.00	泥岩	4.10 ^a	2.18	2.30	K ₁ s ¹
14	M10	2431.95	含砾砂岩	5.10 ^b	1.92	2.08	K ₁ b ²
15	M10	2445.68	细砂岩	4.20 ^b	2.06	2.19	K ₁ b ²
16	M10	2501.71	泥质粉砂岩	5.40 ^a	2.02	2.18	K ₁ b ²
17	M10	2688.94	泥岩	5.30 ^a	1.64	1.81	K ₁ b ²
18	M10	2833.56	砂砾岩	3.80 ^b	2.55	2.65	K ₁ b ¹
19	M10	2951.84	泥岩	3.50 ^a	2.17	2.28	K ₁ b ¹
20	M10	3136.30	砂砾岩	4.80 ^b	2.60	2.72	K ₁ b ¹
21	M10	3138.00	泥岩	2.90 ^a	2.06	2.16	K ₁ b ¹
22	M10	3138.60	泥岩	2.90 ^a	2.44	2.52	K ₁ b ¹
23	M10	3337.16	砾岩	4.70 ^b	2.50	2.62	K ₁ b ¹
24	M11	2073.28	粉砂岩	8.00 ^b	2.26	2.46	K ₁ s ¹
25	M11	2079.68	砾岩	11.90 ^b	2.83	2.96	K ₁ s ¹
26	M11	3297.06	砂砾岩	4.80 ^b	2.71	2.83	K ₁ b ²
27	M11	3540.08	砂砾岩	3.70 ^b	2.92	3.00	K ₁ b ¹
28	M11	3770.40	砂砾岩	2.00 ^b	3.26	3.30	K ₁ b ¹
29	M11	3887.66	白云岩	2.00 ^a	4.53	4.53	K ₁ b ¹
30	M11	3918.17	片麻岩	0.01 ^a	2.39	2.39	K ₁ b ¹
31	M12	1086.19	粉砂质泥岩	9.00 ^a	1.79	2.03	K ₁ s ²
32	M3	1257.07	粉砂岩	10.70 ^a	2.32	2.53	K ₁ s ²
33	M3	1258.77	粉砂质泥岩	9.00 ^a	1.71	1.96	K ₁ s ²
34	M3	1262.27	安山岩	10.70 ^b	1.49	1.78	K ₁ s ²
35	M3	1265.97	玄武岩	10.70 ^a	1.02	1.32	K ₁ s ²
36	M3	1267.97	玄武岩	10.70 ^a	0.86	1.14	K ₁ s ²
37	M3	1667.20	玄武岩	6.00 ^b	2.04	2.21	K ₁ s ²
38	M3	1669.00	凝灰岩	3.00 ^b	1.73	1.83	K ₁ s ²
39	M3	1830.36	砂砾岩	3.40 ^b	2.11	2.21	K ₁ s ²

续表 1

序号	井名	深度(m)	岩性	孔隙度(%)	热导率(W/(m·K))		取样层位
					实测	校正	
40	M4	1119.38	砂砾岩	19.20 ^b	2.04	2.28	K ₁ s ²
41	M4	1140.99	玄武岩	11.30 ^b	0.94	1.25	K ₁ s ²
42	M4	1859.51	砂砾岩	7.50 ^b	2.40	2.58	K ₁ s ²
43	M5	1709.75	玄武岩	6.40 ^a	1.59	1.78	K ₁ s ²
44	M5	2275.37	粉砂质泥岩	3.10 ^a	2.56	2.64	K ₁ s ¹
45	M5	2481.34	粉砂岩	5.40 ^a	1.80	1.96	K ₁ s ¹
46	M5	2481.64	粉砂岩	5.40 ^a	2.06	2.22	K ₁ s ¹
47	M5	2482.23	粉砂岩	5.40 ^a	2.42	2.56	K ₁ s ¹
48	M5	2943.84	泥岩	1.20 ^a	2.10	2.14	K ₁ s ¹
49	M6	1085.76	中砂岩	8.00 ^b	2.04	2.25	K ₁ s ²
50	M6	1148.11	砂砾岩	8.00 ^b	2.12	2.33	K ₁ s ²
51	M7	1198.40	砾状砂岩	13.00 ^b	2.08	2.34	K ₁ s ²
52	M7	1201.30	泥岩	5.00 ^a	1.58	1.74	K ₁ s ²
53	M7	1261.00	玄武岩	6.00 ^a	1.39	1.57	K ₁ s ²
54	M8	717.94	泥质砂岩	20.20 ^a	1.80	2.10	K ₁ y
55	M8	757.15	泥质粉砂岩	20.80 ^b	1.78	2.08	K ₁ y
56	M8	764.21	泥岩	8.00 ^a	1.96	2.17	K ₁ y
57	M8	774.16	粗砂岩	19.80 ^b	1.14	1.57	K ₁ y
58	M8	826.66	粉砂岩	17.50 ^b	1.60	1.95	K ₁ y
59	M8	838.21	粗-细砂岩	16.00 ^b	1.70	2.02	K ₁ y
60	M8	840.74	砂砾岩	16.00 ^b	2.49	2.65	K ₁ y
61	M9	764.26	砂砾岩	14.20 ^b	1.75	2.06	K ₁ y
62	M9	767.31	泥岩	7.10 ^a	1.91	2.11	K ₁ y
63	M9	767.88	泥岩	7.10 ^a	2.00	2.19	K ₁ y
64	X2	2604.57	泥质粉砂岩	4.00 ^a	2.01	2.13	K ₁ b ²
65	X2	2746.34	粉砂岩	1.90 ^a	2.47	2.53	K ₁ b ²
66	X2	2864.21	粉砂质泥岩	3.20 ^a	2.12	2.22	K ₁ b ²
67	X2	2865.91	泥岩	3.20 ^a	2.06	2.16	K ₁ b ²
68	X2	2888.92	中砂岩	6.60 ^b	2.67	2.81	K ₁ b ²
69	X2	2894.97	粉砂质泥岩	0.90 ^a	2.36	2.39	K ₁ b ²
70	X2	2907.03	泥岩	0.90 ^a	2.20	2.23	K ₁ b ²
71	X2	3194.72	泥岩	0.50 ^a	2.27	2.29	K ₁ b ²
72	X2	3195.62	泥岩	0.50 ^a	2.18	2.19	K ₁ b ²
73	X5	1936.02	泥质白云岩	4.70 ^a	1.92	2.07	K ₁ s ¹
74	X5	1950.49	含砾砂岩	5.40 ^b	2.71	2.84	K ₁ s ¹
75	X5	1951.99	泥岩	2.50 ^a	1.89	1.97	K ₁ s ¹
76	Y2	2120.46	砂砾岩	14.80 ^b	2.02	2.29	K ₁ s ¹
77	Y2	2123.36	凝灰岩	3.10 ^a	1.84	1.94	K ₁ s ²
78	Y2	2124.46	玄武岩	5.20 ^a	1.82	1.98	K ₁ s ²
79	Y2	2694.20	安山岩	2.73 ^b	2.08	2.17	K ₁ s ¹

续表 1

序号	井名	深度(m)	岩性	孔隙度(%)	热导率(W/(m·K))		取样层位
					实测	校正	
80	Y2	2718.18	含砾砂岩	2.51 ^b	1.64	1.72	K ₁ s ¹
81	Y2	2720.28	泥页岩	1.00 ^a	2.38	2.41	K ₁ s ¹
82	Y2	2721.78	泥岩	1.00 ^a	2.15	2.18	K ₁ s ¹
83	Y2	3070.04	凝灰质角砾岩	2.70 ^a	1.91	2.00	K ₁ s ¹
84	Y2	3075.14	凝灰质角砾岩	2.70 ^a	1.85	1.93	K ₁ s ¹
85	Y2	3078.86	泥岩	0.50 ^a	2.06	2.07	K ₁ s ¹
86	Y2	3586.26	泥岩	0.50 ^a	2.11	2.12	K ₁ b ²
87	Y2	3588.06	粉砂质泥岩	0.50 ^a	2.41	2.43	K ₁ b ²
88	Y2	3588.76	泥岩	0.50 ^a	2.47	2.49	K ₁ b ²
89	Y2	4010.86	粉砂质泥岩	0.30 ^a	2.00	2.01	K ₁ b ²
90	Y3	1818.87	粉砂岩	8.00 ^b	2.26	2.45	K ₁ s ²
91	Y3	2981.48	砾岩	5.00 ^b	3.23	3.31	K ₁ s ¹
92	Y3	3343.85	砾岩	3.60 ^b	2.93	3.02	K ₁ b ²
93	Y4	1527.84	细砂岩	7.40 ^b	2.44	2.61	K ₁ s ¹
94	Y4	1528.34	粉砂质泥岩	3.70 ^a	2.37	2.48	K ₁ s ¹
95	Y4	1533.74	玄武岩	7.40 ^a	1.61	1.83	K ₁ s ¹
96	Y4	1650.04	泥岩	2.00 ^a	2.42	2.48	K ₁ b ²
97	Y4	1653.04	粉砂岩	8.30 ^a	1.99	2.21	K ₁ b ²
98	Y4	1674.48	粉砂质泥岩	3.00 ^a	2.41	2.50	K ₁ b ²
99	Y4	1687.67	泥岩	2.00 ^a	2.20	2.26	K ₁ b ²
100	Y4	1688.42	泥岩	2.00 ^a	1.46	1.53	K ₁ b ²
101	Y4	1706.39	砂砾岩	6.50 ^b	3.45	3.51	K ₁ b ²
102	Y4	1831.08	含砾砂岩	4.10 ^b	2.92	3.01	K ₁ b ¹
103	Y6	1759.38	凝灰岩	5.00 ^a	1.62	1.78	K ₁ s ¹
104	Y6	1764.78	泥岩	6.00 ^a	1.81	1.98	K ₁ s ¹
105	Y6	1769.69	含砾粗砂岩	12.00 ^b	2.66	2.82	K ₁ s ¹
106	Y6	1772.26	凝灰岩	5.00 ^a	1.36	1.51	K ₁ s ¹
107	Y6	1776.46	玄武岩	8.90 ^a	1.56	1.81	K ₁ s ¹

注:a 为声波测井计算得到的孔隙度; b 为样品实测孔隙度; 样品岩石热导率由中国科学院地质与地球物理研究所岩石热物性实验室测试。

表 2 查干凹陷地层热导率柱

Table 2 Thermal conductivity column in the Qagan sag

地层	砂岩热导率 (mW/m ²)	砂岩含量 (%)	泥岩热导率 (mW/m ²)	泥岩含量 (%)	岩浆岩热导率 (mW/m ²)	岩浆岩含量 (%)	原位热导率 (mW/m ²)	样品数 (砂岩/泥岩/岩浆岩)
K ₁ y	2.05	50.9	2.14	49.1	—	—	2.09	10(6/4/0)
K ₁ s ¹	2.29	22.6	1.97	55.2	1.80	22.3	1.97	27(12/9/6)
K ₁ s ²	2.45	22.7	2.24	53.6	1.91	23.7	2.21	29(9/3/17)
K ₁ b ²	2.55	29.9	2.21	70.1	—	—	2.31	25(10/15/0)
K ₁ b ¹	2.85	39.0	2.18	61.0	—	—	2.44	11(7/4/0)

表 3 查干凹陷大地热流
Table 3 Terrestrial heat flow data in the Qagan sag

序号	井名	经度(°E)	纬度(°N)	深度范围(m)	地温梯度(°C/km)	热导率(W/(m·K))	大地热流(mW/m ²)	质量类别
1	Y2	106.446	41.627	0~3508	32.0	2.17	69.4	A
2	CC1	106.505	41.663	3150~4100	32.4	2.35	76.1	A
3	B1	106.565	41.712	500~1148	38.0	2.25	85.5	B
4	M1	106.515	41.557	1146~1900	36.3	2.16	78.4	B
5	M6	106.557	41.586	1122~1175	37.7	2.16	81.4	B
6	M10	106.588	41.655	2795~2826	31.5	2.23	70.2	B
7	L1	106.532	41.589	2850~3340	30.8	2.33	71.8	B
8	Y4	106.615	41.724	0~1550	32.9	2.17	71.4	C
9	M9	106.604	41.637	0~1422	30.5	2.16	65.9	C

(表 3). 查干凹陷单井大地热流在 65.9~85.5 mW/m² 之间, 平均为 74.5 mW/m². 根据热流参数中测温资料、热导率数据的数量和质量等, 将热流数据区分为: A. 高质量类; B. 质量较高类; C. 质量较差或质量不明类三类, 将明显存在浅层地下水下渗或局部因素的干扰或测点位于地表地热异常区的热流数据归为 D 类. 按照以上标准区分出 2 个 A 类数据, 5 个 B 类数据和 2 个 C 类数据(表 3).

6 大地热流的构造背景

大地热流是盆地动力学成因和岩石圈构造热演化过程的客观反映. 不同成因不同时代的盆地, 其现今的热状态存在明显差异^[33]. 处于新生代构造活动区(如美国盆地山脉省约 83.0 mW/m²^[34])、现代大陆边缘扩张盆地(如南海盆地, 78.3 mW/m²^[35])和现代大陆裂谷(如贝加尔裂谷, 99.0 mW/m²^[34])均为高热流值; 而前寒武系地盾区(约 41.8 mW/m²^[36-37])和克拉通盆地(如准噶尔盆地^[37]和柴达木盆地^[38])的热流相对较低. 查干凹陷大地热流平均为 74.5 mW/m², 由于以上 9 口井都位于构造高部位, 如果考虑到凹陷低部位的大地热流较高部位低, 实际的平均大地热流会稍低于 74.5 mW/m², 因此查干凹陷具有构造活动区与构造稳定区之间地热状态.

查干凹陷所处的银—额盆地为早白垩世阿尔金断裂向北东方向延伸走滑拉分而形成^[39], 并且走滑断裂切入岩石圈的上地幔^[40-41], 在盆地形成过程中伴随岩浆大量喷溢和岩石圈的大幅度拉伸减薄, 在盆地中岩浆岩普遍存在于早白垩世苏红图组中^[42], 例如在查干凹陷每口井都见苏红图组火山岩, 早白垩世苏一段火山岩最厚达到 544.1 m, 苏

二段最厚达到 223.2 m. 此时岩石圈减薄, 地幔物质上涌, 带来大量地幔热量, 导致早白垩世具有高的地热背景, 并在早白垩世晚期热流达到最大^[43], 从晚白垩世开始, 盆地进入拗陷期, 大地热流开始下降至现今的 74.5 mW/m², 仍具有较高的热流状态.

由于古近纪以来, 太平洋板块向欧亚板块俯冲^[44-48]和印度板块向北俯冲并与欧亚板块碰撞^[49-51], 目前印度板块仍以 50 mm/a 的速率向欧亚板块运动^[51], 银—额盆地受到持续挤压作用的影响, 导致盆地西南边界向北迁移, 现在仍然不断地进行^[52]; 盆地东南面受太平洋板块北西西向的俯冲作用, 同样导致盆地东南边界向北迁移^[44-48]; 而北面西伯利亚板块对银—额盆地向北运动起着阻挡作用^[44,46-48], 在这复杂的构造作用下, 使得盆地现今仍处于较高地热状态. 总的来说, 银—额盆地现今所处的构造应力环境, 使得盆地发生一定规模的构造运动, 在尚丹拗陷和查干德勒苏拗陷新生界发现一些断层和褶皱, 但是构造运动强度又不如构造运动强烈的现代大陆边缘扩张盆地及新生代构造活动区强烈. 可见银—额盆地现今处于构造活动区与构造稳定区之间的构造环境, 这与查干凹陷大地热流揭示的构造背景相一致.

7 结 论

通过首次对查干凹陷现今地温场作详细的研究, 得出查干凹陷现今地温梯度在 30.5~38.0 °C/km 之间, 平均地温梯度为 33.6 °C/km, 大地热流在 65.9~85.5 mW/m² 之间, 平均为 74.5 mW/m², 大地热流揭示查干凹陷处于构造活动区与构造稳定

区之间的构造背景. 本文的研究成果将为查干凹陷乃至整个银—额盆地油气资源评价提供地热参数.

致谢 感谢中国科学院地质与地球物理研究所胡圣标教授在岩石热导率测试的帮助和岩石热导率原位校正工作中的指导.

参考文献(References)

- [1] Lee W H K. On the global variations of terrestrial heat-flow. *Phys. Earth Planet. Interiors*, 1969, 2(5): 332-341.
- [2] Pollack H N, Chapman D S. On the regional variation of heat flow, geotherms and lithospheric thickness. *Tectonophysics*, 1977, 38(3-4): 279-296.
- [3] Czechowski L, Kossacki K J. Thermal convection in the porous methane-soaked regolith in Titan: Finite amplitude convection. *Icarus*, 2012, 217(1): 130-143.
- [4] Hasterok D, Chapman D S, Davis E E. Oceanic heat flow: Implications for global heat loss. *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, 311(3-4): 386-395.
- [5] Kukkonen I T, Rath V, Kivekäs L, et al. Geothermal studies of the Outokumpu deep drill hole, Finland: Vertical variation in heat flow and palaeoclimatic implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2011, 188(1-2): 9-25.
- [6] Duchkov A D, Rychkova K M, Lebedev V I, et al. Estimation of heat flow in Tuva from data on helium isotopes in thermal mineral springs. *Russian Geology and Geophysics*, 2010, 51(2): 209-219.
- [7] Björk G, Winsor P. The deep waters of the Eurasian Basin, Arctic Ocean: Geothermal heat flow, mixing and renewal. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2006, 53(7): 1253-1271.
- [8] Ranalli G, Rybach L. Heat flow, heat transfer and lithosphere rheology in geothermal areas: Features and examples. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2005, 148(1-2): 3-19.
- [9] 易善锋. 世界地热测量情况简介. 地质快报, 1966, (4): 10-13.
Yi S F. Introduction to the world geothermal survey case. *Geology Express* (in Chinese), 1966, (4): 10-13.
- [10] 中国科学院地质研究所地热组. 华北平原及其邻近地区大地热流资料报道与讨论. 地质科学, 1979, 1(1): 1-12.
Geothermal Research Group, Institute of Geology, Academia Sinica. Report on the data of terrestrial heat flow in north China plain and adjacent regions and its study. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 1979, 1(1): 1-12.
- [11] 汪集旻, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编. 地质科学, 1988, (2): 196-204.
Wang J Y, Huang S P. Compilation of heat flow data for continental area of China. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 1988, (2): 196-204.
- [12] 汪集旻, 黄少鹏. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版). 地震地质, 1990, 12(4): 351-366.
Wang J Y, Huang S P. Compilation of heat flow data in the China continental area (2nd edition). *Seismology and Geology* (in Chinese), 1990, 12(4): 351-366.
- [13] 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版). 地球物理学报, 2001, 44(5): 611-626.
Hu S B, He L J, Wang J Y. Compilation of heat flow data in the China continental area (3rd edition). *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2001, 44(5): 611-626.
- [14] 崔军平, 任战利. 内蒙古海拉尔盆地乌尔逊凹陷现今地温场特征. 现代地质, 2011, 25(3): 589-593.
Cui J P, Ren Z L. Characteristics of present geothermal field of Wuerxun depression in Hailaer basin, Inner Mongolia. *Geosciences* (in Chinese), 2011, 25(3): 589-593.
- [15] Tan J Q, Ju Y W, Zhang W Y, et al. Heat flow and its coalbed gas effects in the central-south area of the Huaibei coalfield, eastern China. *Sci. China Earth Sci.*, 2010, 53(5): 672-682.
- [16] 冯昌格, 刘绍文, 王良书等. 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. 地球科学——中国地质大学学报, 2010, 35(4): 645-656.
Feng C G, Liu S W, Wang L S, et al. Present-day geotemperature field characteristics in the central uplift area of the Tarim Basin and implications for hydrocarbon generation and preservation. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2010, 35(4): 645-656.
- [17] 邱桐生, 魏刚, 李翠翠等. 渤海海域现今地温场分布特征. 石油与天然气地质, 2009, 30(4): 412-419.
Qiu N S, Wei G, Li C C, et al. Distribution features of current geothermal field in the Bohai Sea waters. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 2009, 30(4): 412-419.
- [18] 崔军平, 任战利, 肖晖等. 海拉尔盆地地温分布及控制因素研究. 地质科学, 2007, 42(4): 656-665.
Cui J P, Ren Z L, Xiao H, et al. Study on temperature distribution and controlling factors in the Hailaer basin. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 2007, 42(4): 656-665.
- [19] 刘丽, 任战利, 崔营滨等. 东濮凹陷现今地温场分布特征. 地质科学, 2007, 42(4): 787-794.
Liu L, Ren Z L, Cui Y B, et al. Distribution of present-day geothermal field in the Dongpu sag. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 2007, 42(4): 787-794.
- [20] 孙占学, 张文, 胡宝群等. 沁水盆地大地热流与地温场特征. 地球物理学报, 2006, 49(1): 130-134.
Sun Z X, Zhang W, Hu B Q, et al. Features of heat flow and the geothermal field of the Qinshui Basin. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2006, 49(1): 130-134.
- [21] 王良书, 李成, 刘绍文等. 库车前陆盆地大地热流分布特征. 石油勘探与开发, 2005, 32(4): 79-83.
Wang L S, Li C, Liu S W, et al. Terrestrial heat flow distribution in Kuqa foreland basin, Tarim, NW China. *Petroleum Exploration & Development* (in Chinese), 2005, 32(4): 79-83.

- [22] 蔡迎春, 付晓飞. 滨北地区中浅层现今地温场及热演化历史. 大庆石油地质与开发, 2005, 24(4): 8-10.
Cai Y C, Fu X F. Current geothermal field of medium-shallow layers in Binbei area and its thermal evolution history. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing* (in Chinese), 2005, 24(4): 8-10.
- [23] 王永新, 冯殿生, 汪集旸等. 辽河盆地东部凹陷现今地温场及热历史的研究. 地球物理学报, 2003, 46(2): 197-202.
Wang Y X, Feng D S, Wang J Y, et al. Present-day geothermal field and thermal history of eastern subdepression, Liaohe basin. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 2003, 46(2): 197-202.
- [24] 王良书, 刘绍文, 肖卫勇等. 渤海盆地大地热流分布特征. 科学通报, 2002, 47(2): 151-155.
Wang L S, Liu S W, Xiao W Y, et al. Heat flow distribution characteristics of Bohai Sea. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2002, 47(2): 151-155.
- [25] Zuo Y H, Qiu N S, Zhang Y, et al. Geothermal regime and hydrocarbon kitchen evolution of the offshore Bohai Bay basin, North China. *AAPG Bulletin*, 2011, 95(5): 749-769.
- [26] Gong Y L, Zhang H, Ye T F. Heat flow density in Bohai Bay Basin: Data set compilation and interpretation. *Procedia Earth and Planetary Science*, 2011, 3(2): 212-216.
- [27] Brigaud F, Chapman D S, Le Douaran S. Estimating thermal conductivity in sedimentary basins using lithologic data and geophysical well logs. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(9): 1459-1477.
- [28] Stefánsson V. The relationship between thermal conductivity and porosity of rocks. // Middleton M ed. *The Nordic Petroleum Technology III*, 1977: 201-219.
- [29] Cosenza P, Guérin R, Tabbagh A. Relationship between thermal conductivity and water content of soils using numerical modelling. *European Journal of Soil Science*, 2003, 54(3): 581-588.
- [30] Jougout D, Revil A. Thermal conductivity of unsaturated clay-rocks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2010, 14(1): 91-98.
- [31] 邱楠生. 中国西北部盆地岩石热导率和生热率特征. 地质科学, 2002, 37(2): 196-206.
Qiu N S. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in basins of northwest China. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 2002, 37(2): 196-206.
- [32] Chapman D S, Keoh T H, Michael S, et al. Heat flow in the Uinta Basin determined from bottom hole temperature (BHT) data. *Geophysics*, 1984, 49(4): 453-466.
- [33] Artemieva I M. Global $1^\circ \times 1^\circ$ thermal model TC1 for the continental lithosphere; Implications for lithosphere secular evolution. *Tectonophysics*, 2006, 416(1-4): 245-277.
- [34] Morgan P. Heat flow in rift zone. // Páalmason G ed. *Continental and Oceanic Rifts*. Geodynamics Series. Washington DC: AGU, 1982, 8: 107-122.
- [35] 何丽娟, 熊亮萍, 汪集旸. 南海盆地地热特征. 中国海上油气(地质), 1998, 12(2): 87-90.
He L J, Xiong L P, Wang J Y. The geothermal characteristics in South China Sea. *China Offshore Oil and Gas (Geology)* (in Chinese), 1998, 12(2): 87-90.
- [36] 陈墨香. 华北地热. 北京: 科学出版社, 1988: 1-218.
Chen M X. *Geothermal in the North China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1988: 1-218.
- [37] Wang S J, Hu S B, Li T J, et al. Terrestrial Heat flow in Junggar basin, Northwest China. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(19): 1808-1813.
- [38] 邱楠生. 柴达木盆地现代大地热流和深部地温特征. 中国矿业大学学报, 2001, 30(4): 412-415.
Qiu N S. Research on heat flow and temperature distribution of the Qaidam Basin. *Journal of China University of Mining & Technology* (in Chinese), 2001, 30(4): 412-415.
- [39] 车自成, 刘良, 刘洪福等. 阿尔金断裂系的组成及相关中生代含油气盆地的成因特征. 中国区域地质, 1998, 17(4): 377-384.
Che Z C, Liu L, Liu H F, et al. The constituents of the Altun fault system and genetic characteristics of related Meso-Cenozoic petroleum bearing basin. *Regional Geology of China* (in Chinese), 1998, 17(4): 377-384.
- [40] 许志琴, 杨经绥, 张建新等. 阿尔金断裂两侧构造单元的对比及岩石圈剪切机制. 地质学报, 1999, 73(3): 193-205.
Xu Z Q, Yang J S, Zhang J X, et al. A comparison between the tectonic units on the two sides of the Altun sinistral strike-slip fault and the mechanism of lithospheric shearing. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 1999, 73(3): 193-205.
- [41] 刘永江, 葛肖虹, Genser J 等. 阿尔金断裂带构造活动的 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄证据. 科学通报, 2003, 48(12): 1335-1341.
Liu Y J, Ge X H, Genser J, et al. $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ age evidence for Altyn fault tectonic activities in Western China. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(18): 2024-2030.
- [42] 钟福平, 钟建华, 王毅等. 银根—额济纳旗盆地苏红图坳陷早白垩世火山岩对阿尔金断裂研究的科学意义. 地学前缘, 2011, 18(3): 233-240.
Zhong F P, Zhong J H, Wang Y, et al. The Early Cretaceous volcanic rocks in Suhongtu depression in Yingen-Ejinaqi Basin: Its scientific significance to the research of Altun Fault. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2011, 18(3): 233-240.
- [43] 左银辉, 马维民, 邓已寻等. 查干凹陷中、新生代热史及烃源岩热演化. 地球科学——中国地质大学学报, 2013, 38(3): 553-560.
Zuo Y H, Ma W M, Deng Y X, et al. Mesozoic and Cenozoic thermal history and source rock thermal evolution history in the Chagan Sag, Inner Mongolia. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 2013, 38(3): 553-560.
- [44] 陈长春. 西伯利亚板块旋转漂移运动刍论. 世界地理研究, 1994, (1): 67-71.

- Chen C C. A personal view on rotation drift movement of the Siberia plate. *World Regional Studies* (in Chinese), 1994, (1): 67-71.
- [45] Northrup C, Royden L. Motion of the Pacific plate relative to Eurasia and its relation to Cenozoic extension along the eastern margin of Eurasia. *Geology*, 1995, 23(8): 719-722.
- [46] 侯贵廷, 钱祥麟, 宋新民. 渤海湾盆地形成机制研究. 北京大学学报(自然科学版), 1998, 34(4): 503-509.
Hou G T, Qian X L, Song X M. The origin of the Bohai Bay Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 1998, 34(4): 503-509.
- [47] 侯贵廷, 钱祥麟, 蔡东升. 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), 2001, 37(6): 845-851.
Hou G T, Qian X L, Cai D S. The tectonic evolution of Bohai basin in Mesozoic and Cenozoic time. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 2001, 37(6): 845-851.
- [48] 李三忠, 索艳慧, 戴黎明等. 渤海湾盆地形成与华北克拉通破坏. 地学前缘, 2010, 17(4): 64-89.
Li S Z, Suo Y H, Dai L M, et al. Development of the Bohai Bay basin and destruction of the North China Craton. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2010, 17(4): 64-89.
- [49] Wdrrall D M, Kruglyak V, Kunst F, et al. Tertiary tectonics of the sea of Okhotsk, Russia; Far-field effects of the India-Eurasia collision. *Tectonics*, 1996, 15(4): 813-826.
- [50] Liu M, Cui X J, Liu F. Cenozoic rifting and volcanism in eastern China: a mantle dynamic link to the Indo-Asian collision? *Tectonophysics*, 2004, 393(1-4): 29-42.
- [51] 许志琴, 杨经绥, 李海兵等. 印度-亚洲碰撞大地构造. 地质学报, 2011, 85(1): 1-33.
Xu Z Q, Yang J S, Li H B, et al. On the tectonics of the India-Asia collision. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 2011, 85(1): 1-33.
- [52] 杨纪林. 试论中国内陆板块运动演化及与地震的关系. 内陆地震, 2011, 25(2): 109-119.
Yang J L. Discussion on intralands plate moving evolution in China and the relationship with earthquake. *Inland Earthquake* (in Chinese), 2011, 25(2): 109-119.

(本文编辑 何 燕)