

饶松, 胡圣标, 朱传庆等. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构. 地球物理学报, 2013, 56(8): 2760-2770. doi: 10. 6038/cjg20130824.

Rao S, Hu S B, Zhu C Q, et al. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, northwest China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(8): 2760-2770. doi: 10. 6038/cjg20130824.

准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构

饶松^{1,2}, 胡圣标^{1*}, 朱传庆³, 唐晓音^{1,2}, 李卫卫^{1,2}, 汪集旻¹

1 中国科学院地质与地球物理研究所 岩石圈演化国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国石油大学(北京), 北京 102249

摘 要 沉积盆地现今大地热流和岩石圈热结构特征是岩石圈构造-热演化过程的综合反映和盆地热史恢复的约束条件, 对盆地动力学研究和油气资源评价具有重要意义. 作者系统分析了准噶尔盆地 2000 年以来新增的 102 口钻孔的系统测井温度和 400 余口钻孔的试油温度资料, 采用光学扫描法测试了 15 口钻孔共 187 块代表性岩石热导率, 首次建立了准噶尔盆地岩石热导率柱, 新增了 11 个高质量的(A 类)大地热流数据, 分析了准噶尔盆地大地热流分布特征, 并揭示了其岩石圈热结构. 研究表明, 准噶尔盆地现今地温梯度介于 11.6~27.6 °C/km, 平均 21.3±3.7 °C/km, 大地热流介于 23.4~56.1 mW/m², 平均 42.5±7.4 mW/m², 表现为低地温梯度、低大地热流的“冷”盆特征. 准噶尔盆地大地热流与地温梯度分布规律基本一致, 主要受控于基底的构造形态, 东部隆起最高, 陆梁隆起次之, 乌伦古拗陷、中央拗陷和西部隆起较低, 北天山山前拗陷最低. 准噶尔盆地地壳热流介于 18.8~26.0 mW/m², 地幔热流介于 16.5~23.7 mW/m², 壳幔热流比值介于 0.79~1.58, 属于典型的“冷壳冷幔”型热结构. 准噶尔盆地地幔热流值与莫霍面起伏一致, 隆起区地幔热流高, 拗陷区地幔热流低.

关键词 地温梯度, 热导率, 大地热流, 岩石圈热结构, 准噶尔盆地

doi: 10. 6038/cjg20130824

中图分类号 P314

收稿日期 2012-11-06, 2013-06-26 收修定稿

The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, northwest China

RAO Song^{1,2}, HU Sheng-Biao^{1*}, ZHU Chuan-Qing³, TANG Xiao-Yin^{1,2},
LI Wei-Wei^{1,2}, WANG Ji-Yang¹

1 *State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

3 *China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China*

Abstract The characteristics of present-day heat flow and lithospheric thermal structure, which are the comprehensive reflections of lithospheric tectono-thermal evolution and constraints of thermal history reconstruction, are very important for basin dynamics research and hydrocarbon resource assessment in sedimentary basins. We report 11 newly measured high-quality terrestrial heat flow data based on systematical well-logging temperature data in 102 new boreholes, oil-testing temperature data in over 400 new boreholes and detailed thermal conductivity testing using

基金项目 国家科技重大专项(2011ZX05008-002)和国家自然科学基金(41102152)联合资助.

作者简介 饶松, 男, 1985 年生, 博士研究生, 主要从事盆地地温场、热史恢复和烃源岩热演化研究. E-mail: raosong@mail.iggcas.ac.cn

* **通讯作者** 胡圣标, 男, 1963 年生, 研究员、博士生导师, 长期从事盆地地温场和热史恢复研究. E-mail: husb@mail.iggcas.ac.cn

optical scanning method of 187 representative samples in 15 wells. The results show that the present-day geothermal gradient varies from 11.6 to 27.6 °C/km with a mean of 21.3 ± 3.7 °C/km, while the heat flow ranges from 23.4 to 56.1 mW/m² with an average of 42.5 ± 7.4 mW/m². The Junggar basin appears to be a cool basin in terms of its thermal regime. As the same as geothermal gradient, the distribution pattern of heat flow is controlled by basement structure and shows the following characteristics. (1) Relatively high heat flow values over 45 mW/m² are confined to the Eastern Uplift and the Luliang Uplift. (2) The Wulungu Depression, Central Depression and Western Uplift are characterized by low heat flow values about 40~43 mW/m². (3) The lowest heat flow (33.9 mW/m²) occurs in the Southern Depression. The terrestrial heat flow consists of crust heat flow varying from 18.8 to 26.0 mW/m² and mantle heat flow varying from 16.5 to 23.7 mW/m². The Junggar basin is typical of ‘cold crust and cold mantle’ thermal structure, with the ratio of crust heat flow and mantle heat flow ranging from 0.79 to 1.58. The mantle heat flow values are consistent with the fluctuation of Moho surface, that is, uplift zone has higher mantle heat flow than the sag zone.

Keywords Geothermal gradient, Thermal conductivity, Heat flow, Lithospheric thermal structure, Junggar Basin

1 引言

准噶尔盆地位于新疆北部,处于 81°E—92°E、43°N—48°N 之间,是我国西部重要的含油气盆地。盆地平面形状呈南宽北窄的近三角形,东西长 700 km,南北宽 370 km,面积 13.4×10^4 km²,沉积岩最大厚度可达 15 km^[1]。从现今大地构造位置上看,准噶尔盆地位于哈萨克斯坦板块、西伯利亚板块及塔里木板块的三角地带,是哈萨克斯坦板块的东延部分,为三面被古生代缝合线包围的晚石炭世到第四纪发展起来的典型的多旋回叠合盆地^[2-3],具有由早古生界褶皱基底和前寒武系结晶基底组成的“双层基底”结构特点^[4-5],经历了多期构造-热演化^[6-8]。以整体构造演化特征为背景,根据盆地各区构造演化和含油气方面的差异性,准噶尔盆地可以划分为乌伦古坳陷、陆梁隆起、中央坳陷、西部隆起、东部隆起和北天山山前坳陷等 6 个一级构造单元^[9],如图 1 所示。

准噶尔盆地现今地温场和岩石圈热结构研究始于 20 世纪 90 年代。20 多年来,前人通过开展盆地及周缘钻孔温度测量和热导率、生热率等热物性参数测试,报道了一批大地热流数据,对准噶尔盆地现今地温场和地温分布特征有了基本认识^[10-14]。刘国壁等根据 760 个测温点资料,计算了准噶尔盆地地温梯度为 20.7 °C/km,大地热流为 35.6 mW/m²,提出准噶尔盆地属于“冷盆”的认识^[10];张惠蓉等报道了准噶尔盆地东部隆起火烧山油田地温梯度为

23.7 °C/km,大地热流值为 40.8 mW/m²^[11];祖金华等研究了新疆 305 地学断面北段的地热特征,指出盆地西南部大地热流较北天山山前和西北缘高^[12];邱楠生等对准噶尔盆地地温分布特征进行了系统分析,指出在地表热流相近的情况下,沉积岩层的组构决定了深部地温的分布^[13];王社教等根据系统的测温数据和岩石热导率测试结果,报道了准噶尔盆地首批 35 个大地热流数据,其中 A 类数据 26 个,B 类数据 8 个,D 类数据 1 个(即位于北天山山前坳陷的小 1 井,地温梯度为 11.6 °C/km,大地热流值为 23.4 mW/m²,图 1 中热流测点编号 20),结果显示盆地平均地温梯度为 21.2 °C/km,平均大地热流为 42.3 ± 7.7 mW/m²^[14],这也是准噶尔盆地迄今为止汇编于全球大地热流数据库的仅有的一批高质量的热流数据。

2000 年以来,随着油气勘探开发的快速发展,准噶尔盆地新增了一大批地温数据;光学扫描法(Optical Scanning Method)在岩石热导率测试中的广泛应用^[15],也让大规模、高精度的岩石热导率测试成为可能。作者系统收集了准噶尔盆地 2000 年以来新增的 102 口钻孔的系统测井温度和 400 多口钻孔的试油温度资料,共筛选出 11 口钻孔高质量的系统试油温度数据;通过光学扫描法测试了 15 口钻孔共 187 块代表性岩石热导率,首次建立了准噶尔盆地热导率柱;新增了 11 个高质量的(A 类)大地热流数据,并分析了盆地大地热流分布特征。此外,在分层地壳模型建立的基础上,揭示了准噶尔盆地东部

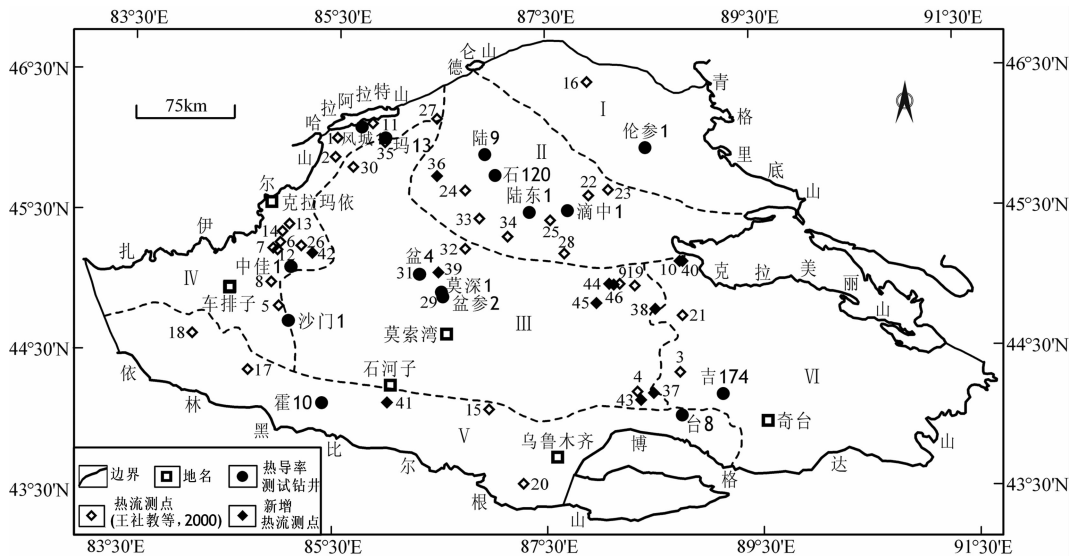


图1 准噶尔盆地构造单元划分(据文献[9])及岩石热导率、大地热流测点分布图

I—乌伦古拗陷(Wulungu Depression); II—陆梁隆起(Luliang Uplift); III—中央拗陷(Central Depression); IV—西部隆起(Western Uplift); V—北天山山前拗陷(Southern Depression); VI—东部隆起(Eastern Uplift)

Fig. 1 Distribution of structural units (after Ref. [9]) and the measurements of thermal conductivity and heat flow in Junggar Basin

隆起和北天山山前拗陷岩石圈热结构的差异. 这一工作代表了目前准噶尔盆地现今地温场研究的最新进展, 将为盆地动力学研究和油气资源评价提供可靠的地热学依据.

2 地温资料

2.1 地温资料的类型

沉积盆地现今地温场研究主要借助各种钻孔测温, 由于测温类型多种多样, 因此测温数据的质量参差不齐. 按照数据质量从高到低, 钻孔测温数据大致可以分为四类^[16], 它们在地温场研究中的作用存在很大差异: (1) 系统稳态测温, 指钻孔热平衡时间以后的系统测温, 代表了研究区真实的地温状况, 这种测温资料最可靠、精度最高, 是地温场研究最关键的资料, 但获取困难, 资料较少; (2) 静井温度, 指关井数天或长期关井后将仪器下放至射孔井段获得的试油温度, 有时为对不同的含油层段进行试油, 数次关井并将仪器下放至不同深度进行温度测量, 从而获得钻孔的系统试油温度, 它在一定程度上可以替代研究区系统稳态测温, 这类资料是地温场研究的主要依据之一; (3) 准稳态测温数据, 指关井后静井1~3天内所测的温度数据, 与稳态测温资料相比, 其误差较大, 只能作为区域地温场研究的必要补充; (4) 瞬态测温, 指完井后不到1天所进行的测温, 由

于静井时间短, 地温与井温尚未达到平衡, 测得的井温曲线不能反映真实的地温状态, 因而也无法用于地温场的研究, 如准噶尔盆地莫深1井, 470~4472 m瞬态系统测井温度揭示地温梯度仅8.1 °C/km, 远小于试油温度揭示的地温梯度21.0 °C/km.

2.2 地温资料分析和筛选

在王社教等^[14]工作的基础上, 作者共收集了2000年以来新增的102口钻孔的系统测井温度和400余口钻孔的试油温度资料, 经过分析共筛选出彩47、西泉092、沙19、莫15、玛纳1、拐19、阜东5、彩深1、彩504、彩45和夏盐15等11口钻孔具有高质量的系统试油温度数据, 如图2所示, 除部分井段可能因断层或地下水活动的影响, 局部温度呈异常变化以外, 总体上温度随深度线性增加, 体现出传导性地热特征, 可以用于准噶尔盆地现今地温场的研究.

2.3 准噶尔盆地现今地温梯度分布特征

对温度-深度曲线用最小二乘法进行线性拟合, 得到以上11口钻孔的地温梯度(如表3所示), 相关系数全部大于0.99, 表明温度-深度线性关系很好, 地温梯度计算可靠. 结合王社教等报道的35个地温梯度数据^[14], 绘制了准噶尔盆地现今地温梯度分布图(图3), 并对各构造单元平均地温梯度进行了统计(表4). 结果表明, 准噶尔盆地现今地温梯度为11.6~27.6 °C/km, 平均 21.3 ± 3.7 °C/km, 与

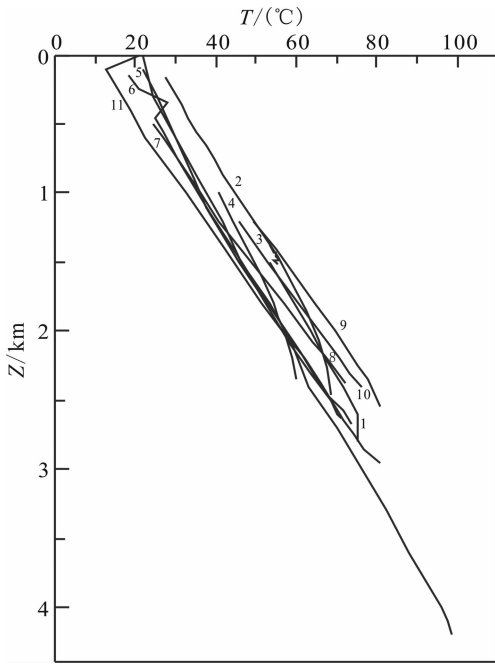


图 2 准噶尔盆地新增热流钻孔温度-深度分布曲线
 1—彩 47(Cai47); 2—西泉 092(Xiquan092); 3—沙 19(Sha19);
 4—莫 15(Mo15); 5—玛纳 1(Mana1); 6—拐 19(Guai19); 7—阜
 东 5(Fudong5); 8—彩深 1(Caishen1); 9—彩 504(Cai504); 10—
 彩 45(Cai45); 11—夏盐 15(Xiayan15)

Fig. 2 The change of geotemperature with depth in the 11 boreholes

塔里木盆地平均地温梯度 22.6 ± 3.0 °C/km 接近^[17], 低于柴达木盆地 $20 \sim 33$ °C/km^[18]、鄂尔多斯盆地 29.3 °C/km^[19]、四川盆地 22.8 °C/km^[20], 与东部中生代断陷盆地相比则更低^[21-26]. 区域上, 地

温梯度的分布与基底的构造形态密切相关, 东部隆起地温梯度最高, 变化范围在 $18.5 \sim 26.9$ °C/km 之间, 平均为 23.4 °C/km; 陆梁隆起地温梯度次之, 介于 $16.7 \sim 26.2$ °C/km, 平均为 23.0 °C/km; 中央坳陷和西部隆起地温梯度大致相当, 分别为 21.3 °C/km 和 20.5 °C/km; 乌伦古坳陷仅有一个测点, 地温梯度为 19.5 °C/km; 北天山山前坳陷的地温梯度最低, 变化于 $11.6 \sim 21.4$ °C/km 之间, 平均仅为 17.1 °C/km.

3 岩石热导率

3.1 岩石热导率测试方法

岩石热导率表示岩石传热的特性, 其物理意义为: 沿热传导方向在单位厚度岩石两侧的温度差为 1 °C 时单位时间内所通过的比热流量, 单位为 $W/(m \cdot K)$. 精确的热导率测量, 是基础地热和应用地热研究中热流计算以及地质体热物理性质研究的基础之一. 岩石热导率测试方法十分繁多, 其中代表一维稳态热源测试原理的轴向热流法(如分棒法)和代表二维径向非稳态热流测试原理的热线法(如探针法)得到了广泛的应用^[27]. 20 世纪 90 年代以后, 光学扫描技术^[15] 被应用于岩石热导率测试之中, 其测量效率高、无接触测量方式、可以直接测量岩心样品(不需制样)以及能够定量评估岩石的热各向异性和非均质性等优点, 使其得到了广泛应用, 迄今为止, 该方法已经成功应用于东欧地台 Vorotilovo 深钻^[28]、俄罗斯科拉半岛深钻^[29] 和中国苏鲁一大别大

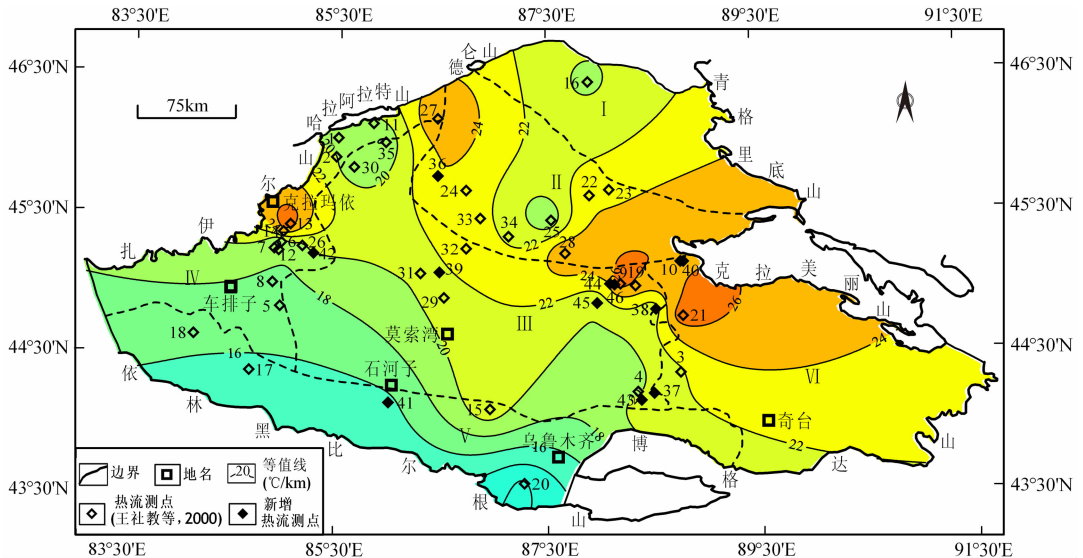


图 3 准噶尔盆地现今地温梯度分布图(°C/km)

Fig. 3 Distribution pattern of present-day geothermal gradient in Junggar Basin(°C/km)

陆深钻等岩心热导率测试^[30].

本次岩石热导率测试,使用德国生产的 TCS (Thermal Conductivity Scanning) 热导率自动扫描仪,其测量范围为 0.2~25 W/(m·K),测量精度为 ±3%. 测试过程中,两个红外传感器分别记录加热之前和之后的温度,差值代表温度增量 θ ,其与热源功率 Q 和热导率 K 之间的定量关系为

$$\theta = \frac{Q}{2\pi \cdot x \cdot K}.$$

实际应用中,温度增量 θ 与电信号 U 成正比例关系,因此,热导率计算公式可进一步简化^[15]:

$$K_M = K_R \cdot \left(\frac{\theta_R}{\theta_M}\right) = K_R \cdot \left(\frac{U_R}{U_M}\right),$$

式中 x 表示热源和传感器之间的距离, K_M 和 K_R 分别表示实测样品和标样的热导率, θ_M 和 θ_R 分别表示实测样品和标样的温度增量, U_M 和 U_R 分别表示实测样品和标样的电信号.

3.2 岩石热导率饱水校正

影响岩石热导率的因素有很多,包括温度、压力、岩石本身的特性和压实成岩演化程度等,但最主要的是岩石的成分和结构特点. 岩石热导率随温度增加而降低,随压力增加而升高,在一定程度上,二者在地壳深部可以抵消. 在疏松多孔的岩石中,孔隙度及其有关特性,如孔隙的大小及连通性、含水量及充填物质等,对岩石热导率影响很大,因此有必要对热导率测试结果进行饱水校正^[27]:

$$K_c = K_m \cdot \left(\frac{K_w}{K_a}\right)^\phi,$$

孔隙度 ϕ 根据钻孔声波测井数据计算:

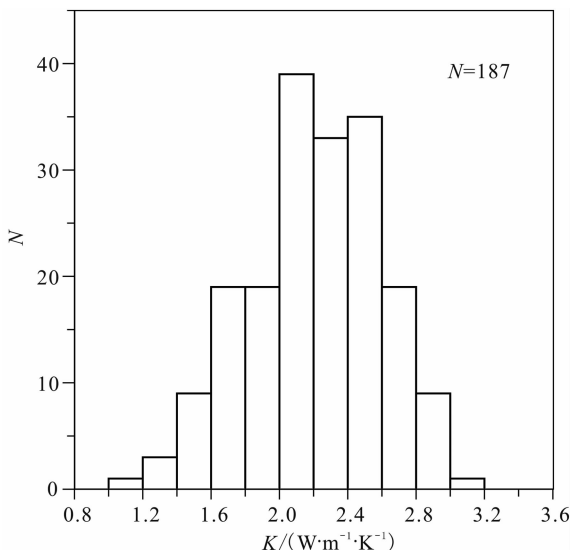


图4 准噶尔盆地岩石热导率统计直方图
Fig. 4 Histogram of thermal conductivity in Junggar Basin

$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_\phi - \Delta t_{ma}} \cdot \frac{1}{C_p},$$

式中, K_m 、 K_c 分别为实测热导率和校正热导率; K_w 为水热导率, 0.600 W/(m·K); K_a 为空气热导率, 0.026 W/(m·K); Δt 为实测声波时差; Δt_{ma} 为砂岩骨架声波时差, 182 μ s/m; Δt_ϕ 为水的声波时差, 620 μ s/m; C_p 为压实校正系数, 对于压实的岩石 $C_p = 1$, 未压实的岩石 $C_p > 1$.

3.3 不同岩类热导率测试结果

作者对准噶尔盆地 15 口钻孔(即伦参 1、陆 9、石 120、陆东 1、滴中 1、风城 1、玛 13、中佳 1、沙门 1、盆 4、莫深 1、盆参 2、霍 10、台 8 和吉 174 井)共 187 块岩石样品进行热导率现场测试,样品选取遵循盆地岩石热导率测试的三个基本原则,即覆盖了盆地 6 个一级构造单元(图 1),包含了盆地沉积盖层所有层位(C、P、T、J、K、E、N)和几乎所有岩石类型(砂砾岩、粗砂岩、中砂岩、细砂岩、粉砂岩、泥岩、火山岩、变质岩). 准噶尔盆地岩石热导率统计直方图(图 4)表明,热导率值相对比较集中,变化于 1.167~3.062 W/(m·K)之间,平均为 2.209±0.383 W/(m·K),主体介于 2.0~2.6 W/(m·K),占测试样品的 57.2%. 这一结果比邱楠生对准噶尔盆地 160 块岩石热导率统计结果 2.048 W/(m·K)^[31]略大,与塔里木盆地平均热导率值 2.304 W/(m·K)^[32]非常接近. 准噶尔盆地不同岩类热导率测试结果汇编于表 1,可见砾岩和变质岩热导率高,泥岩、粉砂岩和砂岩热导率大致相当,不同类型火山岩热导率差别较大.

从不同岩类热导率与深度的关系图(图 5)可以

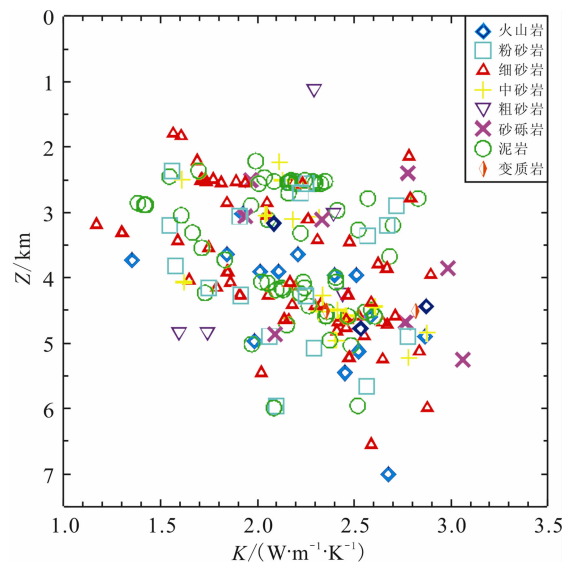


图5 准噶尔盆地不同岩类热导率与深度的关系图
Fig. 5 The relationship between thermal conductivity and depth by different lithology in Junggar Basin

表 1 准噶尔盆地不同岩类热导率统计结果

Table 1 Thermal conductivity data of different lithology in Junggar Basin

岩性	层位	范围 (W/(m·K))	样品 个数	均值±标准偏差 (W/(m·K))
泥岩	E、K、J、T、P	1.384~2.830	60	2.170±0.322
粉砂岩	E、K、J、T、P	1.547~2.777	18	2.162±0.388
砂岩	N、E、K、J、T、P	1.302~2.895	82	2.189±0.162
砾岩	J、T、P	1.937~3.062	8	2.490±0.432
凝灰岩	T、P、C	1.354~2.868	8	2.308±0.474
安山岩	T、C	2.111~2.874	3	2.397±0.339
辉绿岩	J	1.923	1	1.923
流纹岩	C	2.398~2.513	2	2.456±0.056
英安岩	C	2.013	1	2.013
火山角砾岩	P	2.454	1	2.454
石英岩	C	1.984	1	1.984
变质岩	T	2.355~2.818	2	2.587±0.232

看出,此次岩石热导率测试深度变化于 1146~7005 m,主要集中在 2500~5500 m 深度范围. 除个别异常点偏离正常趋势外,总体上热导率随着深度增加略有增大,这符合岩石热导率与深度正相关的普遍规律. 但就不同的岩类而言,热导率与深度的相关性存在差异:粗砂岩和砂砾岩的热导率随深度增加,数值变化不大,即岩石热导率与深度的相关性小;而中砂岩、细砂岩、粉砂岩和泥岩随深度的增加,热导率呈线性增加趋势,火山岩类(凝灰岩居多)的热导率与深度也存在明显的正相关关系. 上述现象说明,以粒间孔为主要储集空间的砂泥岩类和以裂缝为主要储集空间的火山岩类,随深度增加,压实作用增强,孔隙度逐渐降低,岩石热导率随之增加^[14].

3.4 准噶尔盆地岩石热导率柱

前已述及,本次热导率测试包含了盆地沉积盖层所有层位(C、P、T、J、K、E、N). 根据本次测试的 187 块岩石热导率数据,首次建立了准噶尔盆地热导率柱(表 2). 除新近系仅有一个样品外,三叠系热导率最高,平均为 2.505±0.276 W/(m·K);侏罗系和石炭系热导率次之,平均为 2.307±0.332 和 2.218±0.401 W/(m·K);二叠系平均热导率为 2.176±0.299 W/(m·K);白垩系和古近系热导率最低,分别为 1.837±0.286 和 1.794±0.428 W/(m·K). 根据准噶尔盆地热导率柱,按照不同层位厚度加权平均,可以估算各测温井段平均热导率(表 3).

表 2 准噶尔盆地岩石热导率柱

Table 2 Thermal conductivity data of different formation in Junggar Basin

地层时代	岩性	样品 个数	范围 (W/(m·K))	均值±标准偏差 (W/(m·K))
N	粗砂岩	1	2.295	2.295
		1	2.295	2.295
E	粉-细砂岩	8	1.384~2.719	1.794±0.428
		2	1.845~2.049	1.947±0.102
		1	2.719	2.719
		5	1.384~1.967	1.547±0.217
K	砂岩	28	1.302~2.407	1.837±0.286
		11	1.302~2.169	1.700±0.283
		4	1.559~1.916	1.700±0.145
		13	1.665~2.407	1.996±0.234
J	砂砾岩	101	1.547~3.062	2.307±0.332
		5	1.965~3.062	2.711±0.390
		52	1.604~2.876	2.277±0.362
		8	1.547~2.777	2.251±0.352
T	粉砂岩	35	1.971~2.830	2.317±0.210
		1	1.923	1.923
		15	2.085~3.062	2.505±0.276
		1	2.334	2.334
P	砂岩	7	2.137~2.895	2.515±0.309
		1	2.564	2.564
		2	2.085~2.405	2.245±0.160
		1	2.532	2.532
C	安山岩	1	2.874	2.874
		2	2.355~2.818	2.587±0.232
		23	1.597~2.676	2.176±0.299
		2	1.937~2.093	2.015±0.078
P	砂岩	9	1.597~2.588	2.119±0.300
		4	1.909~2.568	2.207±0.241
		5	1.607~2.519	2.185±0.340
		1	2.454	2.454
C	火山角砾岩	2	2.085~2.676	2.380±0.296
		11	1.354~2.868	2.218±0.401
		5	1.354~2.868	2.234±0.554
		2	2.398~2.513	2.456±0.056
C	流纹岩	2	2.398~2.513	2.456±0.056
		1	2.013	2.013
		2	2.111~2.207	2.159±0.048
		1	1.984	1.984

注:每个地层的第一行为该层样品总数,热导率值为平均结果.

表 3 准噶尔盆地新增大地热流数据表
Table 3 Data of new heat flow in Junggar Basin

序号 ^a	井号	东经/E	北纬/N	测温井段/m	地温梯度		热导率 (W/(m·K))	热流值 (mW/m ²)
					G/(°C/km)	相关系数		
36	夏盐 15	86°28'34"	45°43'38"	100~2680	23.85	0.999	1.878	44.8
37	西泉 092	88°32'33"	44°14'15"	160~1860	21.28	0.999	1.840	39.2
38	沙 19	88°34'19"	44°14'15"	1375~1445	20.69	0.991	2.231	46.2
39	莫 15	88°32'33"	44°48'43"	300~4200	19.36	1.000	2.003	38.8
40	彩深 1	88°49'11"	45°8'6"	500~2380	25.60	0.999	2.191	56.1
41	玛纳 1	86°0'60"	44°10'41"	1000~2200	15.41	0.991	2.077	32.0
42	拐 19	85°16'52"	45°11'30"	100~2625	19.93	0.994	1.930	38.5
43	阜东 5	88°25'14"	44°11'28"	150~2950	21.66	0.994	2.039	44.2
44	彩 504	88°9'39"	44°58'55"	1200~2550	23.80	0.998	2.000	47.6
45	彩 47	88°0'25"	44°51'19"	1500~2600	20.26	1.000	1.837	37.2
46	彩 45	88°10'37"	44°58'54"	1200~2400	25.31	0.999	1.991	50.4

注: * 序号续王社教等^[14], 与图 1 中热流测点编号一致。

4 大地热流

4.1 大地热流数据质量分析

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,它是地球内部的各种动力学过程的能量平衡在地表最直接的反映,在数值上,大地热流值等于地温梯度与地层热导率之积:

$$q = -K \frac{dT}{dZ}$$

式中, q 为大地热流(或称地表热流)值(mW/m²); K 为热导率(W/(m·K)); $\frac{dT}{dZ}$ 为地温梯度(°C/km); 负号表示热流方向与地温梯度方向相反。

很显然,大地热流数据质量取决于地温梯度和岩石热导率的测试精度.本次研究工作,计算热流的 11 口钻孔均为系统试油温度,井温数据线性很好,代表了传导性地温特征;热导率根据准噶尔盆地岩石热导率柱,按照不同层位厚度加权平均计算获得,因此获得的大地热流数据质量很高,为 A 类数据。

4.2 准噶尔盆地大地热流特征

夏盐 15 等 11 口钻孔的大地热流计算结果如表 3 所示.结合王社教等报道的准噶尔盆地首批 35 个大地热流数据^[14],编制了准噶尔盆地现今大地热流分布图(图 6),各构造单元平均大地热流统计见表 4.结果显示,准噶尔盆地大地热流介于 23.4~56.1 mW/m²,平均为 42.5±7.4 mW/m²,与塔里木盆地大地热流

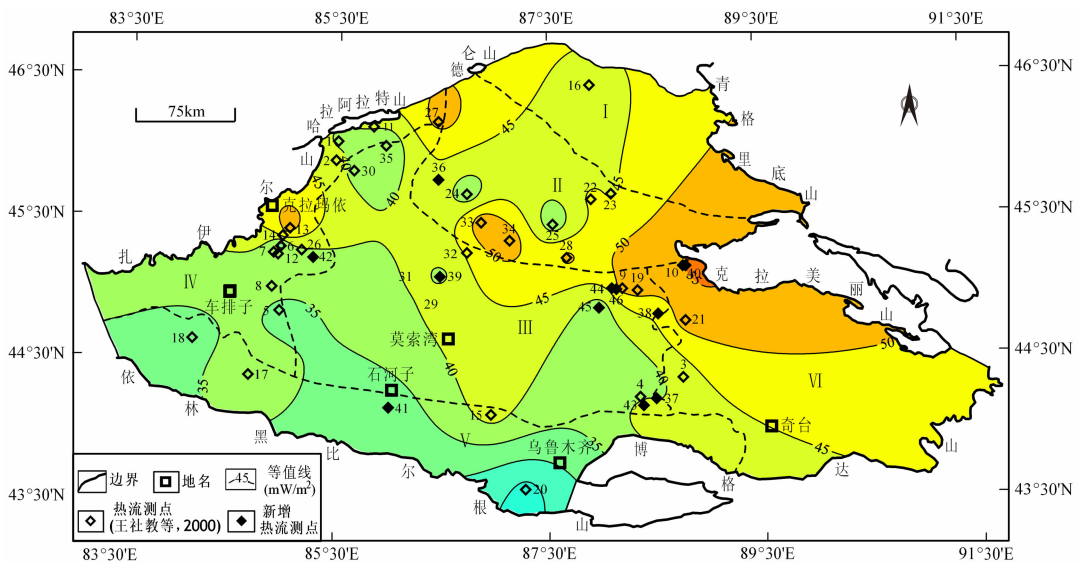


图 6 准噶尔盆地现今大地热流分布图

Fig. 6 Distribution pattern of present-day heat flow in Junggar Basin

表 4 准噶尔盆地不同构造单元地温梯度和大地热流统计表

Table 4 Data of geothermal gradient and heat flow of different structural units in Junggar Basin

构造单元	热流测点数量(个)	地温梯度(°C/km)		大地热流(mW/m ²)	
		范围	平均值	范围	平均值
乌伦古坳陷	1		19.5		43.2
陆梁隆起	8	16.7~26.2	23.0	35.4~53.7	45.5
中央坳陷	6	17.9~26.5	21.3	35.7~52.1	42.4
北天山山前坳陷	5	11.6~21.4	17.1	23.4~42.4	33.9
西部隆起	13	15.8~27.6	20.5	30.2~52.3	40.7
东部隆起	13	18.5~26.9	23.4	35.8~56.1	46.9

平均值 $43.0 \pm 8.5 \text{ mW/m}^2$ 非常接近^[21], 低于我国中部、东部和海域大中型沉积盆地^[18-26], 也低于我国大陆地区大地热流平均值 $63 \pm 24.2 \text{ mW/m}^2$ ^[33], 属于典型的“冷”盆(热流 $< 50 \text{ mW/m}^2$ ^[34]), 反映了较为稳定陆块的构造背景, 与世界典型克拉通盆地如 Michigan 盆地^[35] 和 Williston 盆地^[36] 热背景一致。区域上, 准噶尔盆地大地热流与地温梯度分布规律基本一致, 主要受控于盆地内基底的构造形态, 表现为东部隆起大地热流最高, 变化范围在 $35.8 \sim 56.1 \text{ mW/m}^2$ 之间, 平均为 46.9 mW/m^2 ; 其次为陆梁隆起, 介于 $35.4 \sim 53.7 \text{ mW/m}^2$, 平均为 45.5 mW/m^2 ; 乌伦古坳陷、中央坳陷和西部隆起大地热流较低, 分别为 43.2 、 42.4 和 40.7 mW/m^2 ; 北天山山前坳陷大地热流最低, 变化于 $23.4 \sim 42.4 \text{ mW/m}^2$, 平均仅为 33.9 mW/m^2 。

5 岩石圈热结构

大地热流由两部分组成, 即地壳岩石中 U、Th、

K 等放射性元素蜕变产生的热量(地壳热流, q_c) 和来自地球深部的热量(地幔热流, q_m)。壳、幔两部分热量的配分比例及其组成关系, 构成了某个地区岩石圈热结构, 它直接影响到现今地壳、上地幔的活动性及深部温度状况。在准噶尔盆地分层地壳模型建立的基础上, 利用“回剥法”逐层计算由地壳放射性元素生热产生的热流(q_A), 得到 $q_c = \sum q_A$, 由 $q_m = q - q_c$ 计算地幔热流。准噶尔盆地分层地壳模型参考邵学钟等^[4], 生热率模型及参数取值见表 5。

大地热流受基底构造形态及其上覆沉积层厚度所控制, 基底坳陷区沉积岩厚度大, 而沉积岩相对于基底岩石热导率较低, 对来自地壳深部的热流起着屏蔽作用, 使热流在侧向上发生“折射”, 导致盆地隆起区的热流高于坳陷区。此外, 快速的沉积作用对地温场和大地热流产生强烈的压制作用, 使地表热流迅速降低。准噶尔盆地东部隆起 M 界面(莫霍界面)埋深 43.5 km , B 界面(褶皱基底面)埋深 6 km , 沉积层的厚度仅 3.5 km ; 而北天山山前坳陷 M 界面埋深 50 km , B 界面埋深 13.8 km , 沉积层的厚度达 12.9 km ^[4]。基底构造起伏及其沉积盖层厚度的巨大差异, 可以导致东部隆起大地热流较北天山山前坳陷增大, 而北天山山前坳陷新生代以来的快速沉积, 将进一步引起地表热流值降低。因此在计算之前有必要进行地表热流的还原, 以消除热流汇聚和快速沉积作用引起的热流异常。

研究中, 选取准噶尔盆地最具代表性的两个构造单元, 即大地热流最高而沉积层厚度最小的东部隆起, 和大地热流最低而沉积层厚度最大的北天山山前坳陷分别计算岩石圈热结构, 其计算结果可以大致作为准噶尔盆地壳幔热流比值的下限和上限。为了方便对比研究, 两个构造单元地表热流值均取

表 5 准噶尔盆地地壳生热模型及参数取值

Table 5 The crustal heat production model and parameter in Junggar Basin

构造层	构造亚层	生热率(A)模型	生热率	备注及资料来源
沉积盖层	K+E+N+Q	$A = \text{const.}$		根据 GR 测井值(API 单位)计算各构造亚层生热率 ^[38]
	J	$A = \text{const.}$	$A = 0.0158[\text{GR}(\text{API}) - 0.8]$	
	T+P	$A = \text{const.}$		
古生界褶皱基底层	C+D	$A = \text{const.}$	$0.99 \sim 1.66$	新疆北部地区实测生热率 ^[39]
	P _{z1}	$A = \text{const.}$	$1.31 \sim 1.69$	
结晶地壳层	结晶基底上层	$A = A_0 e^{-z/D}$	$A_0 = 1.4 \mu\text{W/m}^3$ $D = z_0 / \ln(A_0/A_1)$	按照指数模型计算生热率 ^[40] (z_0 为结晶基底上层厚度, A_0 和 A_1 分别为古生界褶皱基底层和结晶地壳中层生热率)
	结晶地壳中层	$A = \text{const.}$	$\ln A = 12.6 - 2.17v_p$	根据地震波速 v_p 估算生热率 ^[41]
	结晶地壳下层	$A = \text{const.}$		

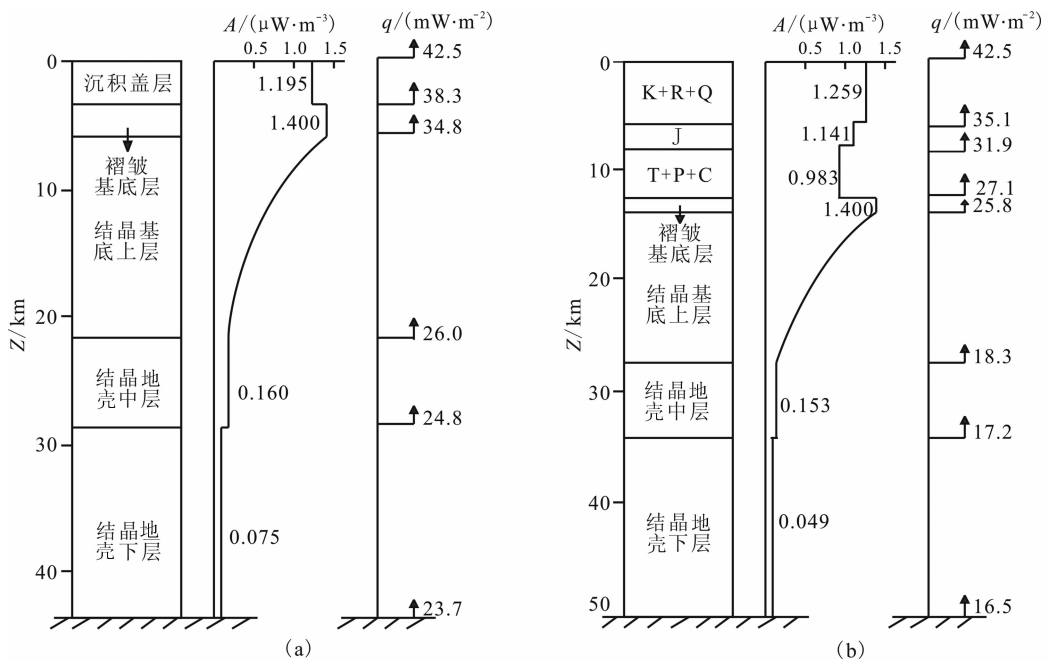


图 7 准噶尔盆地东部隆起(a)和北天山山前拗陷(b)地壳结构、
生热模型和热结构特征(地壳分层模型据邵学钟等^[4])

Fig. 7 The crustal structure, heat production model and thermal structure of Eastern Uplift (a) and Southern Depression (b) in Junggar Basin (The crustal structure is from Shao et al^[4].)

盆地平均值 42.5 mW/m^2 。计算结果(图 7)表明,东部隆起地壳热流为 18.8 mW/m^2 ,地幔热流为 23.7 mW/m^2 ,壳幔热流比值为 0.79 ;北天山山前拗陷地壳热流 26.0 mW/m^2 ,地幔热流为 16.5 mW/m^2 ,壳幔热流比值为 1.58 。这一计算结果与汪洋利用地下流体氦同位素比值估算的准噶尔盆地壳幔热流比例 1.5 和地幔热流 21 mW/m^2 ^[37]基本一致。

6 结论与认识

准噶尔盆地现今地温梯度较低,介于 $11.6 \sim 27.6 \text{ }^\circ\text{C/km}$,平均为 $21.3 \pm 3.7 \text{ }^\circ\text{C/km}$ 。区域上,地温梯度的分布与基底的构造形态密切相关,东部隆起地温梯度最高,平均为 $23.4 \text{ }^\circ\text{C/km}$;陆梁隆起次之,平均为 $23.0 \text{ }^\circ\text{C/km}$;中央拗陷、西部隆起和乌伦古拗陷地温梯度大致相当,分别为 21.3 、 20.5 和 $19.5 \text{ }^\circ\text{C/km}$;北天山山前拗陷的地温梯度最低,平均仅为 $17.1 \text{ }^\circ\text{C/km}$ 。

准噶尔盆地岩石热导率值相对比较集中,变化于 $1.167 \sim 3.062 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 之间,平均为 $2.209 \pm 0.383 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$,主体介于 $2.0 \sim 2.6 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。不同岩类热导率统计结果表明,砾岩和变质岩热导率高,泥岩、粉砂岩和砂岩热导率大致相当,不同类型火山岩热导率差别较大。总体上,准噶尔盆地岩石

热导率随着深度增加略有增大,符合岩石热导率与深度正相关的普遍规律。根据本次测试的 187 个岩石热导率数据,首次建立了准噶尔盆地热导率柱:三叠系热导率最高,侏罗系、石炭系和二叠系热导率次之,白垩系和古近系热导率最低。

基于高质量的地温资料和高精度的热导率数据,为准噶尔盆地新增了 11 个高质量的(A类)大地热流数据。大地热流数据统计结果显示,准噶尔盆地大地热流介于 $23.4 \sim 56.1 \text{ mW/m}^2$,平均为 $42.5 \pm 7.4 \text{ mW/m}^2$,表现为“冷”盆特征。准噶尔盆地大地热流与地温梯度分布规律基本一致,主要受控于基底构造形态,东部隆起大地热流最高,平均为 46.9 mW/m^2 ;陆梁隆起次之,平均为 45.5 mW/m^2 ;乌伦古拗陷、中央拗陷和西部隆起大地热流较低,平均为 43.2 、 42.4 和 40.7 mW/m^2 ;北天山山前拗陷的大地热流最低,平均仅为 33.9 mW/m^2 。

在分层地壳模型建立的基础上,计算了准噶尔盆地东部隆起和北天山山前拗陷的岩石圈热结构。结果表明,准噶尔盆地地壳热流介于 $18.8 \sim 26.0 \text{ mW/m}^2$,地幔热流介于 $16.5 \sim 23.7 \text{ mW/m}^2$,壳幔热流比值介于 $0.79 \sim 1.58$,属于典型的“冷壳冷幔”型热结构。横向上,准噶尔盆地地幔热流值与莫霍面起伏一致:莫霍面隆起区地幔热流高,莫霍面拗陷区地幔热流低。

致谢 地温资料收集得到中国石油勘探开发研究院的大力帮助,岩心热导率现场测试得到新疆油田勘探开发研究院和新疆油田勘探处的配合与协作,两位审稿专家为稿件提出了宝贵的修改意见,在此一并致谢!

参考文献 (References)

- [1] 陈业全, 王伟锋. 准噶尔盆地构造演化与油气成藏特征. 石油大学学报(自然科学版), 2004, 28(3): 4-8.
Chen Y Q, Wang W F. Structural evolution and pool-forming in Junggar Basin. *Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science)* (in Chinese), 2004, 28(3): 4-8.
- [2] 陈发景, 汪新文, 汪新伟. 准噶尔盆地的原型和构造演化. 地学前缘, 2005, 12(3): 77-89.
Chen F J, Wang X W, Wang X W. Prototype and tectonic evolution of the Junggar basin, northwestern China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 2005, 12(3): 77-89.
- [3] 张朝军, 何登发, 吴晓智等. 准噶尔多旋回叠合盆地的形成与演化. 中国石油勘探, 2006, (1): 47-58.
Zhang C J, He D F, Wu X Z, et al. Formation and evolution of multicycle superimposed basins in Junggar Basin. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 2006, (1): 47-58.
- [4] 邵学钟, 张家茹, 范会吉等. 准噶尔盆地基底结构的地震转换波探测. 新疆石油地质, 2008, 29(4): 439-444.
Shao X Z, Zhang J R, Fan H J, et al. The basement structure in Junggar Basin: deep-sounding by converted waves of earthquakes. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 2008, 29(4): 439-444.
- [5] 赵俊猛, 黄英, 马宗晋等. 准噶尔盆地北部基底结构与属性问题探讨. 地球物理学报, 2008, 51(6): 1767-1775.
Zhao J M, Huang Y, Ma Z J, et al. Discussion on the basement structure and property of northern Junggar basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, 51(6): 1767-1775.
- [6] 潘长春, 周中毅, 范善发等. 准噶尔盆地热历史. 地球化学, 1997, 26(6): 1-7.
Pan C C, Zhou Z Y, Fan S F, et al. Thermal history of Junggar Basin. *Geochimica* (in Chinese), 1997, 26(6): 1-7.
- [7] Wang S J, He L J, Wang J Y. Thermal regime and petroleum systems in Junggar Basin, northwest China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(3-4): 237-248.
- [8] Qiu N S, Zha M, Wang X L, et al. Tectono-thermal evolution of the Junggar Basin, NW China: constraints from Ro and apatite fission track modeling. *Petroleum Geoscience*, 2005, 11(4): 361-372.
- [9] 杨海波, 陈磊, 孔玉华. 准噶尔盆地构造单元划分新方案. 新疆石油地质, 2004, 25(6): 686-688.
Yang H B, Chen L, Kong Y H. A novel classification of structural units in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 2004, 25(6): 686-688.
- [10] 刘国璧, 张惠蓉. 准噶尔盆地地热场特征与油气. 新疆石油地质, 1992, 13(2): 100-107.
Liu G B, Zhang H R. The hydrocarbon occurrence and characteristics of geothermal field in Junggar Basin. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 1992, 13(2): 100-107.
- [11] 张惠蓉, 宋运维. 火烧山油田地热流值测定. 新疆石油地质, 1993, 14(4): 314-317.
Zhang H R, Song Y W. Heat flow measurements of Huoshaoshan oilfield. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 1993, 14(4): 314-317.
- [12] 祖金华, 吴乾蕃, 廉雨方等. 新疆 305 地学断面北段的地热特征. 地震学报, 1999, 21(4): 103-106.
Zu J H, Wu Q F, Lian Y F, et al. The geothermal characteristics of northern section of Xinjiang 305 geoscience transect. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1999, 21(4): 103-106.
- [13] 邱楠生, 王绪龙, 杨海波等. 准噶尔盆地地温分布特征. 地质科学, 2001, 36(3): 350-358.
Qiu N S, Wang X L, Yang H B, et al. The characteristics of temperature distribution in the Junggar basin. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 2001, 36(3): 350-358.
- [14] 王社教, 胡圣标, 汪集扬. 准噶尔盆地热流及地温场特征. 地球物理学报, 2000, 43(6): 771-779.
Wang S J, Hu S B, Wang J Y. The characteristics of heat flow and geothermal fields in Junggar Basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(6): 771-779.
- [15] Popov Y A, Pribnow D F C, Sass J H, et al. Characterization of rock thermal conductivity by high-resolution optical scanning. *Geothermics*, 1999, 28(2): 253-276.
- [16] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地地热体制研究的理论与应用. 北京: 石油工业出版社, 2004: 6-9.
Qiu N S, Hu S B, He L J. Principles and Applications on Thermal Regime of Sedimentary Basins (in Chinese). Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 6-9.
- [17] 冯昌格, 刘绍文, 王良书等. 塔里木盆地现今地热特征. 地球物理学报, 2009, 52(11): 2752-2762.
Feng C G, Liu S W, Wang L S, et al. Present-day geothermal regime in Tarim basin, northwest China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, 52(11): 2752-2762.
- [18] Qiu N S, Kang Y S, Jin Z J. Temperature and pressure field in the Tertiary succession of the western Qaidam basin, northeast Qinghai-Tibet Plateau, China. *Marine and Petroleum Geology*, 2003, 20(5): 493-507.
- [19] Ren Z L, Zhang S, Gao S L, et al. 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: Earth Sciences*, 2007, 50(Suppl. II): 27-38.
- [20] 徐明, 朱传庆, 田云涛等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征. 地球物理学报, 2011, 54(4): 1052-1060.

- Xu M, Zhu C Q, Tian Y T, et al. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan basin. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(4): 1052-1060.
- [21] He L J, Wang K L, Xiong L P, et al. Heat flow and thermal history of the South China Sea. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 2001, 126(3-4): 211-220.
- [22] He L J, Xiong L P, Wang J Y. Heat flow and thermal modeling of the Yinggehai Basin, South China Sea. *Tectonophysics*, 2002, 351(3): 245-253.
- [23] Yang S C, Hu S B, Cai D S, et al. Present-day heat flow, thermal history and tectonic subsidence of the East China Sea Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(9): 1095-1105.
- [24] Yuan Y S, Zhu W L, Mi L J, et al. "Uniform geothermal gradient" and heat flow in the Qiongdongnan and Pearl River Mouth Basins of the South China Sea. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, 26(7): 1152-1162.
- [25] 徐明, 赵平, 朱传庆等. 江汉盆地钻井地温测量和大地热流分布. *地质科学*, 2010, 45(1): 317-323.
Xu M, Zhao P, Zhu C Q, et al. Borehole temperature logging and terrestrial heat flow distribution in Jianghan Basin. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 2010, 45(1): 317-323.
- [26] 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.
- [27] 沈显杰, 杨淑贞, 张文仁. 岩石热物理性质及其测试. 北京: 科学出版社, 1998: 53-67.
Shen X J, Yang S Z, Zhang W R. Rock Thermal Physical Properties and Testing (in Chinese). Beijing: Science Press, 1998: 53-67.
- [28] Popov Y A, Pinenov V P, Pevzner L A, et al. Geothermal characteristics of the Vorotilovo deep borehole drilled into the Puchezh-Katunk impact structure. *Tectonophysics*, 1998, 291(1-4): 205-223.
- [29] Popov Y A, Pevzner S L, Pinenov V P, et al. New geothermal data from the Kola superdeep well SG-3. *Tectonophysics*, 1999, 306(3-4): 345-366.
- [30] He L J, Hu S B, Huang S P, et al. Heat flow study at the Chinese Continental Scientific Drilling site: Borehole temperature, thermal conductivity, and radiogenic heat production. *J. Geophys. Res.*, 2008, 113, B02404, doi: 10.1029/2007JB004958.
- [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] Liu S W, Feng C G, Wang L S, et al. Measurement and analysis of thermal conductivity of rocks in the Tarim basin, northwest China. *Acta Geologica Sinica*, 2011, 85(3): 598-609.
- [33] Hu S B, He L J, Wang J Y. Heat flow in the continental area of China: a new data set. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 407-419.
- [34] Wang J Y. Geothermics in China. Beijing: Seismological Press, 1996: 1-299.
- [35] Speece M A, Bowen T D, Folcik J L, et al. Analysis of temperatures in sedimentary basins: the Michigan basin. *Geophysics*, 1985, 50(8): 1318-1334.
- [36] Osadetz K G, Kohn B P, Feinstein S, et al. Thermal history of Canadian Williston basin from apatite fission-track thermochronology-implications for petroleum systems and geodynamic history. *Tectonophysics*, 2002, 349(1-4): 221-249.
- [37] 汪洋. 利用地下流体氦同位素比值估算大陆壳幔热流比例. *地球物理学报*, 2000, 43(6): 762-770.
Wang Y. Estimations of the ratio of crust/mantle heat flow using Helium isotope ratio of underground fluid. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2000, 43(6): 762-770.
- [38] Bucker C, Rybach L. A simple method to determine heat production from gamma-ray logs. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, 13(4): 373-375.
- [39] 倪守斌, 满发胜, 王兆荣等. 新疆北部地区岩石生热率分布特征. *中国科学技术大学学报*, 1999, 29(4): 408-414.
Ni S C, Man F S, Wang J R, et al. Characteristics of heat production distribution in northern Xinjiang. *Journal of China University of Science and Technology* (in Chinese), 1999, 29(4): 408-414.
- [40] Lachenbruch A H. Crustal temperature and heat production: implications of the linear heat-flow relation. *J. Geophys. Res.*, 1970, 75(17): 3291-3300.
- [41] Rybach L, Buntbarth G. The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere. *Tectonophysics*, 1984, 103(1-4): 335-344.

(本文编辑 胡素芳)