

文章编号:1001-3873(2025)02-0163-09 DOI:10.7657/XJPG20250205

引用:廖珂琰,邱楠生,常健,等.塔里木盆地顺托果勒地区深层地温场特征[J].新疆石油地质,2025,46(2):163-171.

LIAO Keyan, QIU Nansheng, CHANG Jian, et al. Characteristics of deep geothermal field in Shuntuogule area of Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2025, 46(2): 163-171.

## 塔里木盆地顺托果勒地区深层地温场特征

廖珂琰<sup>1</sup>,邱楠生<sup>1</sup>,常健<sup>1</sup>,李丹<sup>1</sup>,李慧莉<sup>2</sup>,马安来<sup>2</sup>,李竞瀛<sup>1</sup>

(1.中国石油大学(北京) a.油气资源与工程全国重点实验室; b.地球科学学院,北京 102249;

2.中国石化 石油勘探开发研究院,北京 102206)

**摘要:**塔里木盆地具有较低的地表热流,地层温度差异显著,为了明确盆地中部顺托果勒地区深层地温场特征及控制因素,利用顺托果勒及周缘地区33口井的系统稳态测温数据,研究了地温梯度和深层温度分布特征。在此基础上,对比了沉积地层岩石热物性,及其对热流和温度的影响,结合地球物理资料,构建了地壳分层结构模型,并计算了地壳热流密度。结果表明:顺南、顺托和顺北地区0—5 km平均地温梯度分别为22.5 °C/km、20.0 °C/km和18.6 °C/km,8 km深度处平均地层温度分别约为200 °C、175 °C和135 °C,表现出显著的地温场差异;地壳结构的差异造成了地壳热流的差异,地壳结构是研究区地温场差异的主要控制因素,沉积地层岩石热物性对地温场的影响并不显著;上新世以来顺北地区的快速沉积作用和顺南地区深部热液活动未对现今地温场造成影响。

**关键词:**塔里木盆地;顺托果勒地区;深层;地温场;热流;热物性;地壳结构

中图分类号:TE132

文献标识码:A

### Characteristics of Deep Geothermal Field in Shuntuogule Area of Tarim Basin

LIAO Keyan<sup>1</sup>, QIU Nansheng<sup>1</sup>, CHANG Jian<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, LI Huili<sup>2</sup>, MA Anlai<sup>2</sup>, LI Jingying<sup>1</sup>

(1.China University of Petroleum (Beijing), a.State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, b.School of Geosciences, Beijing 102249, China; 2.Petroleum Exploration and Production Research Institute, Sinopec, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The Tarim Basin is characterized by low surface heat flow and significant variation in formation temperature. To clarify the characteristics and controlling factors of deep geothermal field in the Shuntuogule area of central Tarim Basin, by using the systematic steady-state temperature measurement data from 33 wells in the Shuntuogule and surrounding areas, the geothermal gradients and deep temperature distribution characteristics were investigated. On this basis, the geothermal properties of sedimentary rocks and their impacts on heat flow and temperature were analyzed. Coupling with geophysical data, a layering model for the earth's crust was constructed, and the heat flow density of the crust was calculated. The research results show that in the Shunnan, Shuntuo, and Shunbei areas, the average geothermal gradients at a depth ranging from 0 to 5 km are 22.5 °C/km, 20.0 °C/km, and 18.6 °C/km, respectively, and the average formation temperatures at the depth of 8 km in the 3 areas are approximately 200 °C, 175 °C, and 135 °C, respectively, indicating significant differences in the geothermal fields. The differences in the crustal structure account for variations in the crustal heat flow, and the crustal structure is the primary controlling factor for the geothermal field differences in the study area. The geothermal properties of sedimentary rocks have a negligible impact on the geothermal field. The rapid sedimentation in the Shunbei area since the Pliocene and the deep hydrothermal activity in the Shunnan area have no influence on the present-day geothermal field.

**Keywords:** Tarim Basin; Shuntuogule area; deep stratum; geothermal field; heat flow; geothermal property; crustal structure

塔里木盆地顺托果勒地区具有优越的油气成藏条件,不同区域的油气富集类型存在较大差异。以奥陶系油气藏为例,顺南地区为干气藏和凝析气藏,而顺北地区则以轻质油藏为主<sup>[1-2]</sup>。顺托果勒地区井下7 km处测温资料表明,顺南地区平均地层温度比顺北地区高约30 °C<sup>[3]</sup>,温度差异可能是造成油气藏类型差

异的主要原因<sup>[4]</sup>。前人研究认为,基底隆起使顺南—古城墟地区形成了较高的地温梯度<sup>[5]</sup>;基底构造背景是现今地温场的主控因素,并分析了顺南地区新生代热液活动对深部地层的影响<sup>[3]</sup>。然而,顺南和顺北地区均位于基底构造斜坡区,沿断裂活动的热液影响范围小,难以造成区域上的地温异常。因此,有学者认

©2018 Xinjiang Petroleum Geology. Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

收稿日期:2024-06-20 修订日期:2024-08-16

基金项目:国家自然科学基金(42272135)

第一作者:廖珂琰(1992-),男,河北邯郸人,博士研究生,盆地分析与资源评价,(Tel)15010082289>Emailliaoky2023@163.com

通讯作者:邱楠生(1968-),男,福建连城人,教授,博士,沉积盆地温压场,(Tel)13910633594>Emailqiunsh@cup.edu.cn

为顺北地区现今地温场受控于岩石圈热结构和岩石热导率<sup>[6]</sup>,但对“热”岩石圈厚度的分析缺乏可靠的证据,膏岩盐层的厚度差异也并不显著。总之,对顺托果勒地区地温场差异的控制因素还需进一步研究。

本文利用系统稳态测温资料,研究顺托果勒及周缘地区地温场特征,比较顺南和顺北地区沉积地层岩石热物性和地壳结构,讨论快速沉积作用和热液活动对地温场的影响,明确造成地温场差异的控制因素。

## 1 地质背景

顺托果勒低隆起位于塔里木盆地中部,南北夹持

在塔中隆起和塔北隆起之间,东西介于满加尔坳陷和阿瓦提坳陷之间。顺托果勒低隆起主要包括顺北缓坡、顺托低凸起、顺东缓坡及顺南斜坡4个二级构造单元<sup>[7-8]</sup>(图1a)。

顺托果勒低隆起雏形于中—晚奥陶世形成,经过中志留世碰撞造山运动,形成了东南高、西北低的单斜构造形态<sup>[9-10]</sup>。晚泥盆世之后,该地区构造处于稳定状态,未受到构造运动破坏<sup>[9-10]</sup>。顺托果勒低隆起构造变形弱,发育一系列北东—南西向及北东东—南西西向走滑断裂<sup>[7,9]</sup>(图1a)。这些断裂主要发育和活动时期为加里东运动晚期—海西运动早期,后期在挤

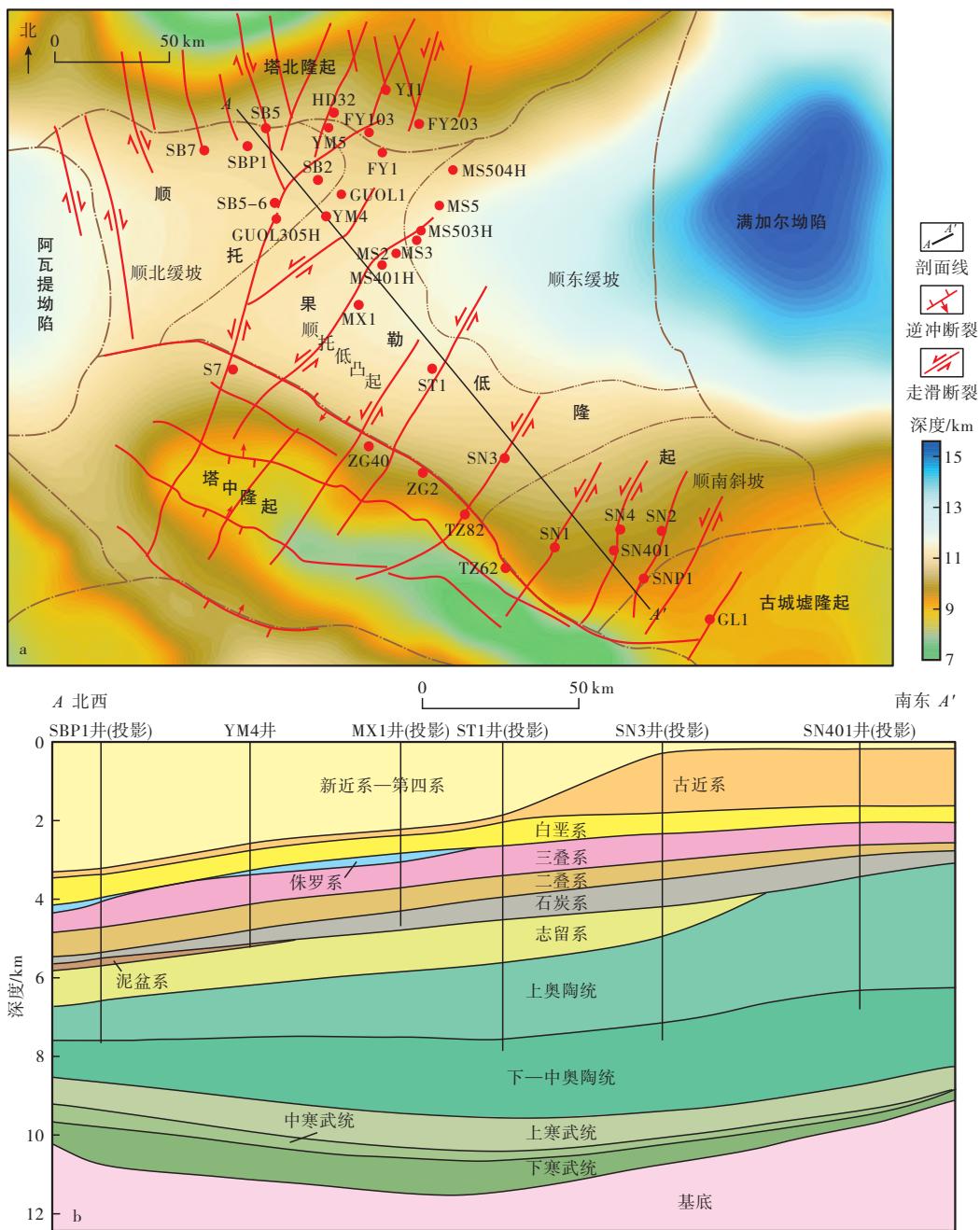


图1 研究区构造位置(a)及地层剖面(b)

Fig. 1. (a) Structural location and (b) stratigraphic section of the study area

压和拉张应力作用下活动较弱<sup>[11]</sup>。寒武系—古近系发育齐全,经历了寒武纪—早二叠世的海相沉积以及晚二叠世—第四纪的陆相沉积<sup>[12]</sup>(图1b)。

## 2 地温场特征

钻井测温数据是描述沉积盆地地温场最直观的资料,包括系统稳态测温、地层试油温度、井底温度等

资料。系统稳态测温数据是在停钻后静井数天甚至数年后,对全钻孔或特定井段进行连续测量获得的温度数据,反映地下真实温度<sup>[13]</sup>。据本文收集的顺托果勒及周缘地区33口钻井的系统稳态测温数据,从顺北缓坡、顺托低凸起到顺南斜坡,系统稳态测温曲线斜率逐渐减小,地温梯度逐渐增大,相同深度下温差逐渐变大(图2)。

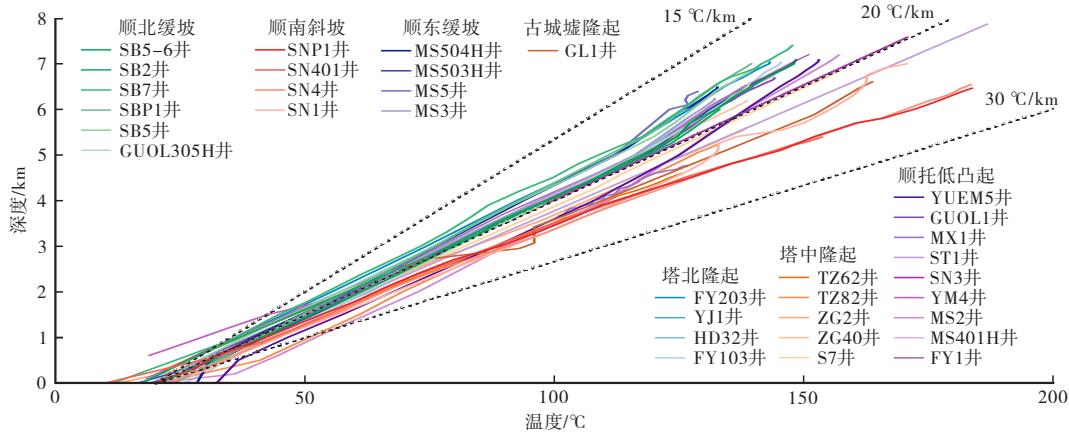


图2 顺托果勒及周缘地区系统稳态测温曲线

Fig. 2. Curves of systematic steady-state temperature measurement in the Shuntuoguole and surrounding areas

依据系统稳态测温数据,计算了顺托果勒及周缘地区深度为0—5 km层段的地温梯度,并通过插值法绘制了地温梯度分布图(图3a)。顺南地区地温梯度为21.5~24.5 °C/km,平均为22.5 °C/km;顺托地区地温梯度为18.5~22.0 °C/km,平均为20.0 °C/km;而顺北地区地温梯度为17.5~20.0 °C/km,平均仅为18.6 °C/km。从顺北地区到顺南地区,地温梯度呈逐渐升高的趋势。塔里木盆地地层分布稳定,深部地层厚度可通过地震资料获得。结合前人实测的地层热导率和放射性生热率,利用一维稳态热传导方程,预测了研究区8 km深度处的地层温度(图3b)。在8 km深度处,顺南地

区平均地层温度约为200 °C,顺托地区平均地层温度约为175 °C,顺北地区平均地层温度约为135 °C,表现出显著的温度差异。随深度增加,顺南和顺北地区的温度差异逐渐增大。为了便于对比分析,选取顺南地区SN1井和顺北地区SB7井作为代表井进行控制因素分析。

## 3 地温场控制因素分析

### 3.1 沉积地层岩石热物性差异

沉积盆地中,岩石的热物性对地温场有着不可忽视的作用。塔里木盆地941个岩石样品的热导率测

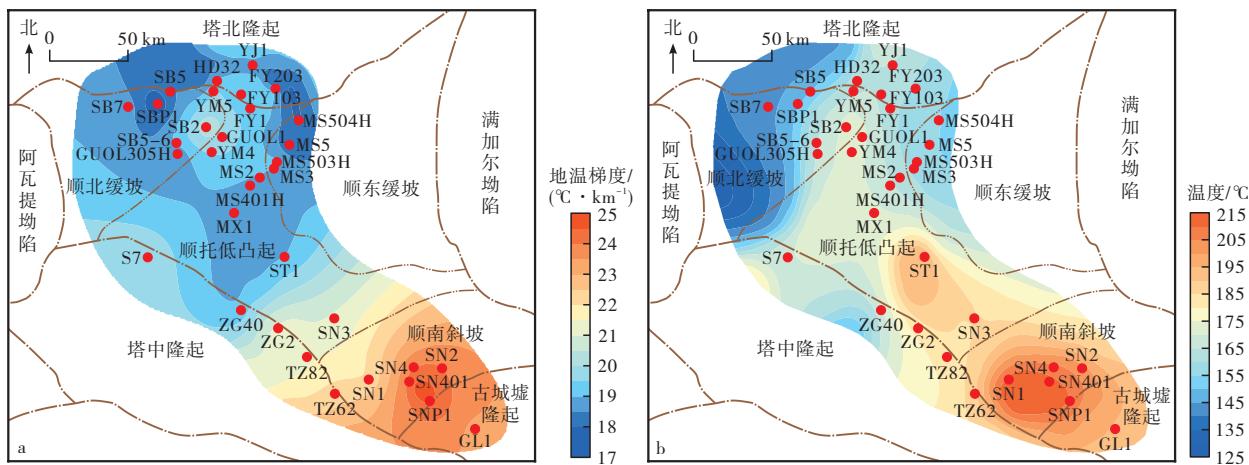


图3 顺托果勒及周缘地区0—5 km地温梯度分布(a)和8 km深度处地层温度分布(b)

Fig. 3. (a) Geothermal gradient distribution at the depth of 0–5 km and (b) formation temperature distribution at the depth of 8 km in the Shuntuoguole and surrounding areas

试结果显示,该盆地的岩石热导率具有显著变化<sup>[14]</sup>。顺托果勒地区高热导率的中寒武统盐岩和低热导率的二叠系火山凝灰岩可能会对地温场造成影响。在计算某一地层热导率之前,需要了解地层的深度、年代和岩性组成。在此基础上,从热导率数据库中确定不同地层各岩性的平均热导率,再根据地层中各岩性所占比例,采用加权平均方法求取各地层的平均热导率,最后采用调和平均方法,求取该地层的平均热导率。

在稳定克拉通盆地,热流由地层岩石中的放射性生热元素产生。塔里木盆地101个沉积岩样品的放射性生热率测量结果显示,该盆地沉积地层岩石平均放射性生热率为 $1.24 \mu\text{W}/\text{m}^3$ <sup>[15]</sup>。研究区沉积地层厚度约为10 km,沉积地层岩石放射性生热元素热流密度约为 $12.4 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。顺托果勒地区平均地表热流密度为 $45.4 \text{ mW}/\text{m}^2$ <sup>[23]</sup>,沉积地层热流密度约占地表热流密度的27.3%。

众多学者建立了利用自然伽马转换得到放射性生热率的经验公式,目前应用较多的是Bucker和Rybäck提出的经验公式<sup>[16]</sup>。该经验公式由大量样品实测放射性生热率和自然伽马测井值拟合得到。对比分析3个经验公式,并将计算值与样品实测值进行对比,认为该经验公式更适用于塔里木盆地<sup>[17]</sup>:

$$A = 0.0158(q_{\text{API}} - 0.8) \quad (1)$$

式中  $A$ —放射性生热率,  $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ;

$q_{\text{API}}$ —自然伽马测井值, API。

采用线性递减理论表征热流密度与平均放射性生热率之间的关系<sup>[18]</sup>:

$$q = G_{\text{Rt}}\lambda + \bar{A}d/2 \quad (2)$$

式中  $d$ —地层厚度, km;

$G_{\text{Rt}}$ —地温梯度,  $^{\circ}\text{C}/\text{km}$ ;

$q$ —顶部热流密度,  $\text{mW}/\text{m}^2$ ;

$\lambda$ —平均热导率,  $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。

已知顶部热流密度的情况下,底部热流密度:

$$q_d = q - \bar{A}d \quad (3)$$

式中  $q_d$ —底部热流密度,  $\text{mW}/\text{m}^2$ 。

热流密度的计算精度取决于温度、热导率和放射性生热率的精度。为了降低热流密度的计算误差,采用高分辨率的连续稳态测温数据,并在地温曲线中选取远离地表且岩性稳定的地层,计算其顶部热流密度。其他深度段热流密度可根据(3)式计算获得。在已知其他深度段地温梯度、顶部热流密度和放射性生热率的情况下,根据(2)式可计算该深度段的热导率。

SN1井和SB7井的地温曲线显示,地表和恒温带温度具有显著差异(图4)。SN1井在5.0—5.4 km和6.7—7.0 km深度段地温梯度变化较大,符合流体向下

运移的特征。测井资料显示,SB7井在4.7—5.4 km深度段发育2期火成岩,岩性变化复杂。因此,本文将地温曲线按深度进行分段,分别为I段(0—2.0 km)、II段(2.0—4.5 km)和III段(4.5—7.0 km)。II段远离地表,2口井在该段不发育特殊热导率的地层,并且没有受到流体活动的影响。2口井II段的地层年代差别较大,地层岩性以砂岩和泥岩为主。因此,在获得岩性和地层层位的基础上,结合样品实测值和统计值,利用加权平均方法和调和平均方法计算II段的平均热导率。在获得自然伽马测井值的基础上,利用(1)式计算II段的放射性生热率。进而结合地温梯度,利用(2)式计算II段的顶部热流密度(图5)。其他段的放射性生热率也可利用(1)式获得,并依此利用(2)式和(3)式计算获得平均热导率和顶部热流密度。

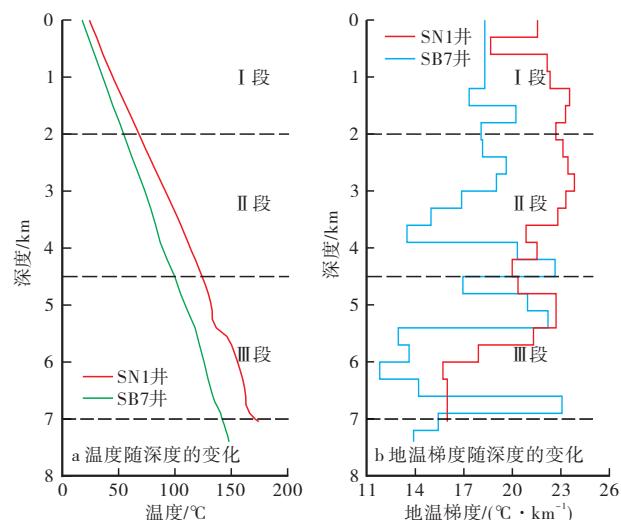


图4 研究区SN1井和SB7井温度和地温梯度随深度的变化

Fig. 4. Variations of temperature and geothermal gradient with depth in Wells SN1 and SB7 in the study area

综合研究区热物性和热流密度计算结果(表1),顺南和顺北地区代表井SN1井和SB7井沉积地层的加权平均热导率分别为 $2.54 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 和 $2.43 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ;加权平均放射性生热率分别为 $0.97 \mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 $1.06 \mu\text{W}/\text{m}^3$ ;地表热流密度中的沉积地层岩石放射性生热元素热流密度分别为 $9.7 \text{ mW}/\text{m}^2$ 和 $11.6 \text{ mW}/\text{m}^2$ 。沉积地层岩石热物性差异并不显著。相较于地表热流密度,顺南和顺北地区基底的热流密度表现出更大的差异。因此,沉积地层岩石热物性的差异并不是造成研究区地温场差异的主要控制因素。

### 3.2 地壳结构对热流的影响

地表热流是地壳热流和地幔热流的总和。在稳定的大陆区域,从地幔发出的热流在大的波长范围内变化。在一定深度(400—500 km)内,寒武系沉积之前克拉通地幔热流基本不变<sup>[19]</sup>。因此,在分析研究区

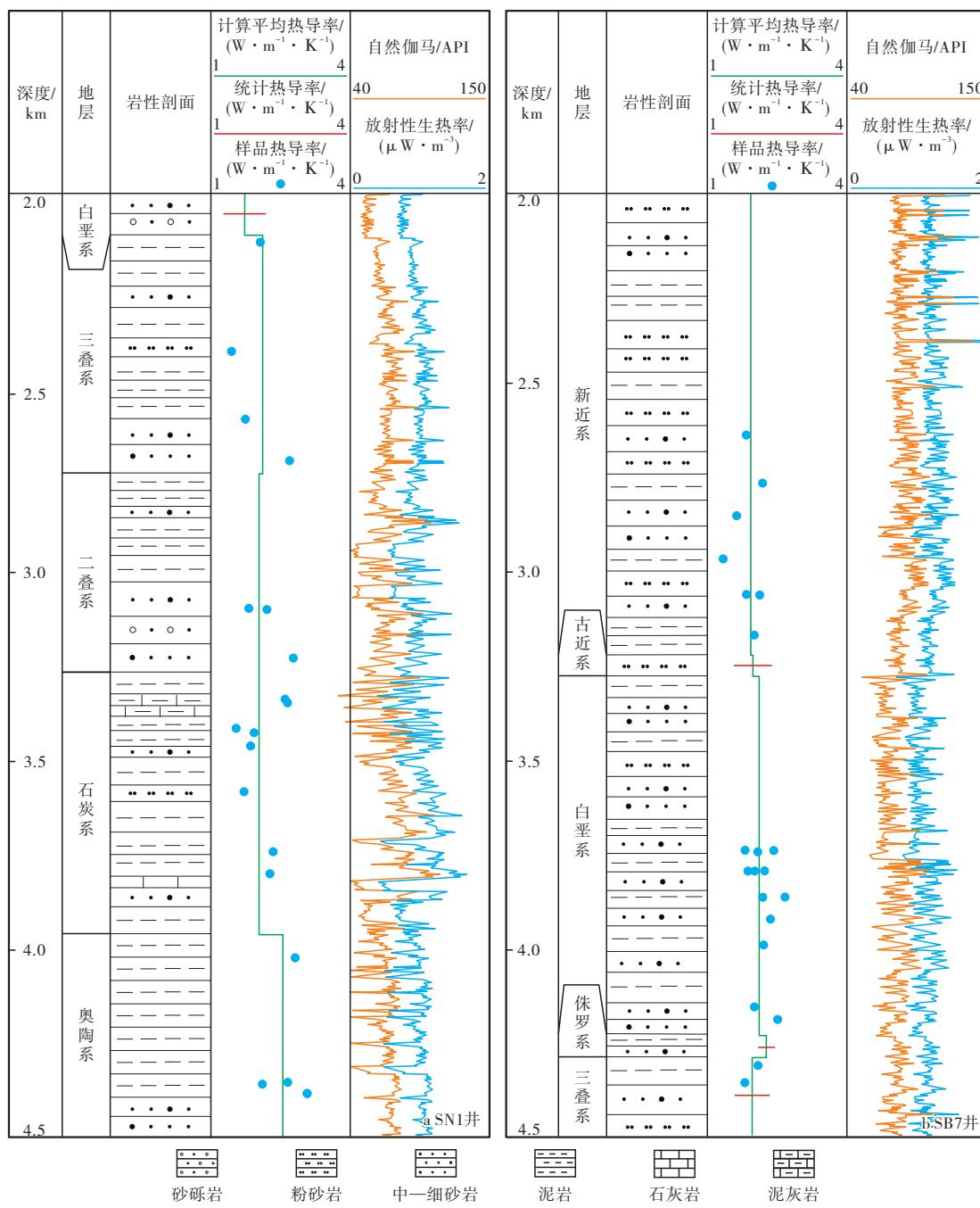


图5 研究区SN1井和SB7井Ⅱ段岩性和热物性

Fig. 5. Lithology and geothermal properties of section II in Wells SN1 and SB7 in the study area

地表热流变化时,仅需要考虑地壳内部的差异。

塔里木盆地少数钻至基底的深钻井为基底研究提供了重要支撑<sup>[20-21]</sup>。航磁异常特征显示,东西向高航磁异常带穿过顺托果勒低隆起<sup>[22]</sup>,分隔了顺南和顺北地区(图6)。该航磁异常带磁异常强度为100~350 nT,长度可达1 500 km,宽度为30~100 km。通过20~75 km的向上延拓,航磁异常带仍然保留了高磁异常强度,表明具有大量强磁性磁源<sup>[23]</sup>。高航磁异常带被部分学者解释为塔里木北部地块和南部地块的拼接带<sup>[24]</sup>。寒武系沉积之前基底的地质特征和这2个

地块之间的火山活动,表明它们经历了独立的寒武纪之前的演化。在演化过程中,南部地块发生了多次变质和火山活动,镁铁质和花岗岩类火成岩侵入体均有出现<sup>[20,25]</sup>,而北部地块变质和火山活动较弱,仅发现镁铁质火成岩侵入体<sup>[26]</sup>。

靠近顺南地区的TC1井钻穿至寒武系沉积之前的基底(图6),基底岩心样品分析结果为花岗岩和花岗闪长岩的侵入体<sup>[21]</sup>。花岗岩类型为地壳源与少量地幔源成分的混合Ⅰ型花岗岩,侵入体的形成过程与地壳碰撞和俯冲事件有关<sup>[20,25]</sup>。SN4井奥陶系石英脉

表1 研究区SN1井和SB7井热物性和热流密度计算结果  
Table 1. Thermophysical properties and calculated heat flow density in Wells SN1 and SB7 in the study area

井名	深度段/km	地温梯度/(°C·km <sup>-1</sup> )	平均热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	放射性生热率/(μW·m <sup>-3</sup> )	顶部热流密度/(mW·m <sup>-2</sup> )
SN1井	0—2.0	22.0	2.20	0.75	49.1
	2.0—4.5	22.3	2.08	0.95	47.6
	4.5—7.0	18.8	2.31	1.45	45.3
	7.0—10.0		3.34	0.73	41.6
	基底				39.4
SB7井	0—2.0	18.4	2.04	1.01	38.7
	2.0—4.5	18.1	1.94	1.22	36.7
	4.5—7.0	16.8	1.90	1.43	33.6
	7.0—10.9		3.28	0.75	30.1
	基底				27.1

流体的地球化学特征表明深部火成岩物质的加入<sup>[27]</sup>。这些证据均表明,在顺南地区地壳中发育花岗岩侵入体。在塔里木南部地块和北部地块拼合过程中,中间的洋壳基底向2个地块下部俯冲<sup>[28]</sup>。在盆地西北缘的阿克苏地区采集到的寒武系沉积之前蓝片岩表现出洋壳玄武岩的地球化学特征<sup>[26]</sup>。北部坳陷发育于巴楚—塔东南联合古陆和塔里木北部古陆之间的残余洋壳之上<sup>[29]</sup>,其地壳具有相对高的地震波速和磁化率<sup>[30]</sup>。依据均衡调整原理,以残余洋壳为底的坳陷将

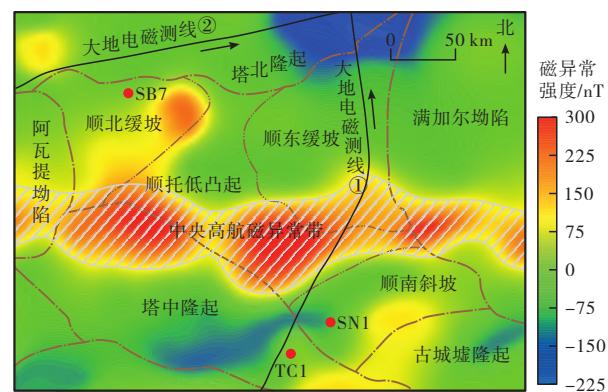


图6 顺托果勒及周缘地区航磁异常带分布  
Fig. 6. Distribution of aeromagnetic anomalies in the Shuntuogule and surrounding areas

会成为最厚的沉积物充填区<sup>[31]</sup>。

截至目前,塔里木盆地共部署了9条大地电磁格架线剖面<sup>[32]</sup>。根据对盆地内部及周缘寒武系沉积之前基底地层年代和地球化学的研究成果,在对地球物理资料综合分析的基础上,本文重新解释了过研究区的大地电磁测线,得到地质解释剖面(图7)。塔里木地块的拼接面为向南倾的斜面,北部地块有向南部地块下部俯冲的趋势(图7a)。顺托果勒地区在拼接面两侧呈现出明显不同的地壳类型。顺南地区基底类型为复合型基底,太古宇—元古宇各构造层齐全,地

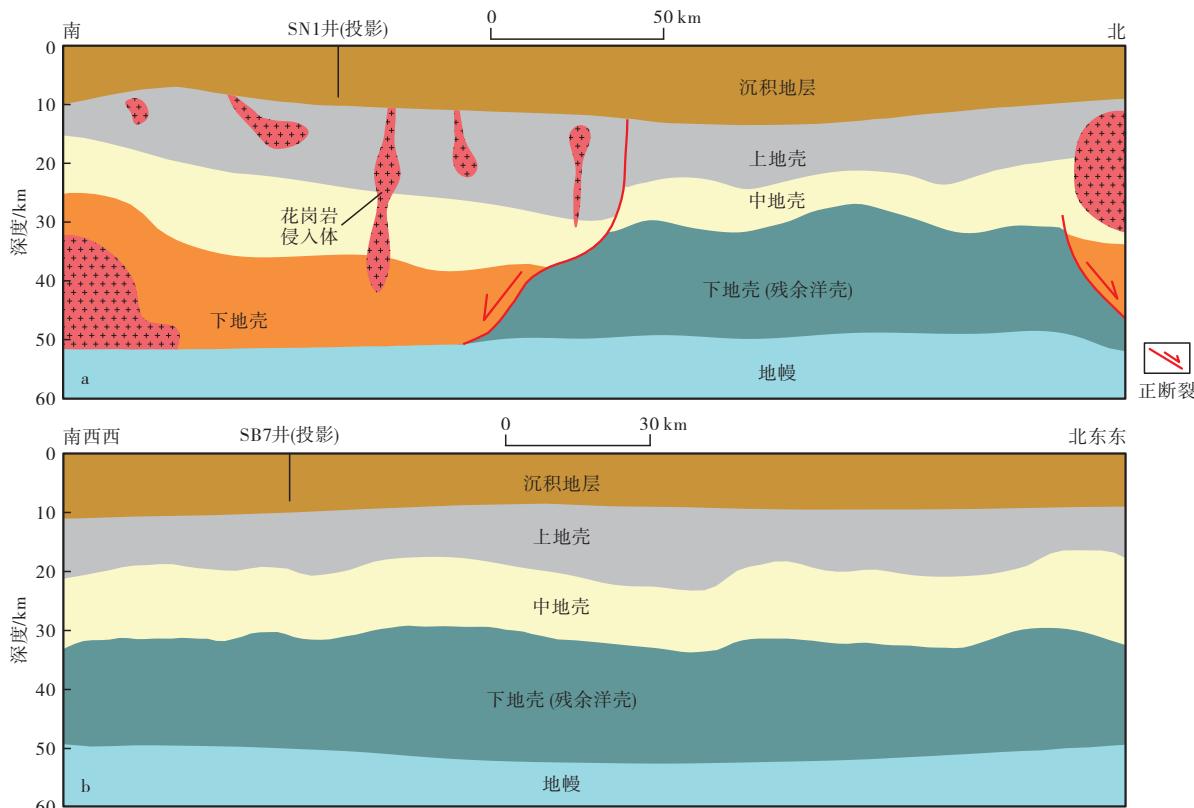


图7 大地电磁测线①(a)和测线②(b)地质解释剖面(据文献[29]修改,测线位置见图6)  
Fig. 7. Geological interpretation profiles of (a) geoelectromagnetic survey line ① and (b) geoelectromagnetic survey line ② (modified after Reference [29]; survey line locations shown in Fig. 6)

壳内发育大规模火成岩侵入体,这些侵入体呈纵向穿刺形态。顺北地区为残余洋壳型基底,中元古界直接覆盖于洋壳之上,缺少太古宇—古元古界,火山活动弱,仅在盆地边缘发育火成岩侵入体(图7b)。

在已知地表热流密度、各构造层厚度和岩石热物性的前提下,用(3)式计算各构造层界面的热流密度。本文根据大地电磁地质解释剖面建立了顺南和顺北地区代表井附近的地壳分层结构模型(图8),并结合前人研究成果,确定了地壳各构造层的放射性生热率<sup>[13,33]</sup>。与放射性生热率随深度呈指数下降相比,目前更常用的是对地壳和地幔放射性生热率进行与岩性相关的逐步赋值。

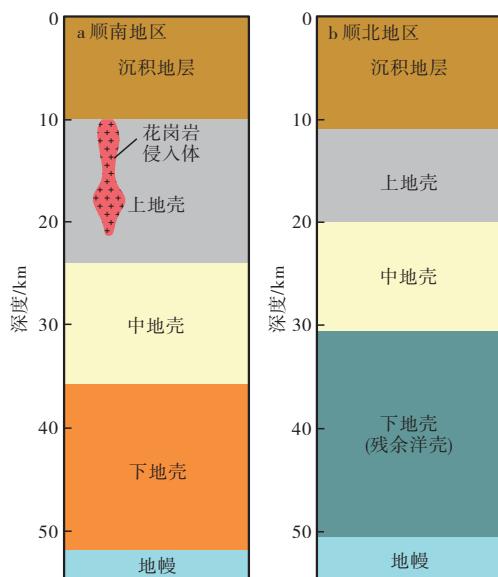


图8 顺南和顺北地区地壳分层结构模型

Fig. 8. Crustal layering models for the Shunnan and Shunbei areas

顺南地区基底地壳中存在不规则的花岗岩侵入体,无法利用回剥法计算侵入体的热流密度。因此,先计算顺北地区的地壳热流密度(图9a)。顺北地区

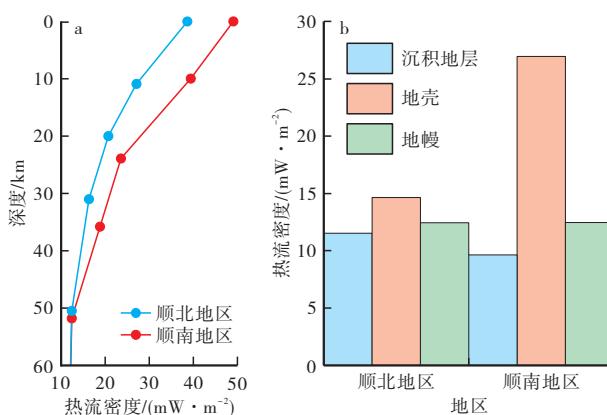


图9 顺北和顺南地区地壳热流密度(a)和热流密度直方图(b)

Fig. 9. (a) Crustal heat flow density and (b) histogram of heat flow density in the Shunbei and Shunnan areas

基底地壳放射性元素产生的热流密度为  $14.7 \text{ mW/m}^2$ ,而地幔热流密度为  $12.5 \text{ mW/m}^2$ 。在相同地幔热流密度的情况下,可推算出顺南地区基底地壳热流密度为  $26.9 \text{ mW/m}^2$ 。不考虑花岗岩侵入体,根据地壳分层结构模型可计算得顺南地区基底地壳热流密度为  $20.8 \text{ mW/m}^2$ 。基底地壳中的花岗岩侵入体热流密度约为  $6.1 \text{ mW/m}^2$ (图9b)。顺南地区地壳结构组成的差异使得其地表热流密度高于顺北地区,是研究区地温场差异的主要控制因素。

### 3.3 快速沉积作用和热液活动的影响

顺北地区靠近塔里木盆地新近纪沉积中心,因此,要考虑快速沉积作用对热流的影响。根据测井资料可知,上新世以来,顺北地区沉积厚度为  $2.7\text{--}3.7 \text{ km}$ ,沉积速率为  $510\text{--}700 \text{ m/Ma}$ 。当沉积速率超过  $250 \text{ m/Ma}$  时,会对地表热流产生显著影响<sup>[34]</sup>。然而,快速沉积地层岩石的放射性生热也会使地层增温,从而缩短地层达到热平衡所需的时间。当地层放射性生热率与沉积速率的比值大于  $10^{-9} \text{ WMa/m}^4$  时,地层温度不受沉积速率的影响<sup>[34]</sup>。上新统一全新统的岩石平均放射性生热率为  $1.25 \mu\text{W/m}^3$ ,则地层放射性生热率与沉积速率的比值为  $1.8 \times 10^{-9}\text{--}2.5 \times 10^{-9} \text{ WMa/m}^4$ 。因此,上新世以来,顺北地区的快速沉积作用并不会使地表热流降低。

测温资料显示,顺南地区存在局部地温异常,SN4井和SNP1井的地温梯度明显高于周围井(图3)。根据SN1井地层平均热导率,SN4井地表热流密度可达  $54.0 \text{ mW/m}^2$ 。前期研究中,学者在SN4井奥陶系鹰山组碳酸盐岩中发现了可能是热液成因的硅质岩<sup>[35]</sup>,该地层盐水包裹体的均一温度高达  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ ,超过演化过程中地层经历的最高温度,约为  $190 \text{ }^\circ\text{C}$ ;碳氧同位素分析也证实了SN4井所在的断裂带附近经历了热液活动<sup>[36]</sup>;燕山运动晚期—喜马拉雅运动期的大规模热液迁移使断裂附近的地层升温<sup>[3]</sup>。热液活动结束后,现今地层尚未达到热平衡,从而表现为SN4井和SNP1井附近地层高温异常。然而,SN4井地温曲线并没有显示出受热液活动影响的特征。热液沿深部断裂向上运移,使断裂附近地层升温。浅层在热传导的作用下,温度也会升高。热液活动结束后,地层在恢复热稳态的过程中,深层地温梯度应低于浅层。SN4井所在的断裂向下断穿至基底,向上断穿的埋深为  $3\text{--}4 \text{ km}$ 。根据测温资料,SN4井在  $0\text{--}3.0 \text{ km}$  的地温梯度为  $22.6 \text{ }^\circ\text{C/km}$ ,而在  $4.0\text{--}6.5 \text{ km}$  的地温梯度却高达  $27.0 \text{ }^\circ\text{C/km}$ ,这种地温特征显然并不是热液活动的结果。因此,前期的热液活动对地温场的影响已经消失,顺南地区地温场处于稳定状态。

## 4 结论

(1) 顺南、顺托和顺北地区0—5 km的平均地温梯度分别为22.5 °C/km、20.0 °C/km和18.6 °C/km, 8 km深度处的平均地层温度分别约为200 °C、175 °C和135 °C, 地温场差异显著。

(2) 顺南地区SN1井沉积地层加权平均热导率为2.54 W/(m·K), 加权平均放射性生热率为0.97 μW/m<sup>3</sup>; 顺北地区SB7井沉积地层加权平均热导率为2.43 W/(m·K), 加权平均放射性生热率为1.06 μW/m<sup>3</sup>。顺南与顺北地区沉积层岩石热物性差异较小。

(3) 顺南和顺北地区具有不同的地壳结构组成, 除地壳厚度的差异外, 还表现为顺南地区上地壳中发育花岗岩侵入体, 而顺北地区下地壳为残余洋壳。顺北地区基底地壳产生的热流密度为14.7 mW/m<sup>2</sup>, 顺南地区基底地壳产生的热流密度为26.9 mW/m<sup>2</sup>, 其上地壳中花岗岩侵入体产生了6.1 mW/m<sup>2</sup>的热流密度。地壳结构是研究区地温场的主要控制因素。

(4) 上新世以来, 顺北地区快速沉积作用产生的冷却效应已经被沉积物放射性生热的增温作用所抵消。顺南地区深部热液活动产生的热扰动也已经消失。

## 参考文献:

- [1] 王清华, 蔡振忠, 张银涛, 等. 塔里木盆地超深层走滑控油气藏研究进展与趋势[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(4):379–386.  
WANG Qinghua, CAI Zhenzhong, ZHANG Yintao, et al. Research progress and trend of ultra-deep strike-slip fault-controlled hydrocarbon reservoirs in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(4):379–386.
- [2] 马永生, 蔡勋育, 云露, 等. 塔里木盆地顺北超深层碳酸盐岩油气田勘探开发实践与理论技术进展[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1):1–17.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, YUN Lu, et al. Practice and theoretical and technical progress in exploration and development of Shunbei ultra-deep carbonate oil and gas field, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2022, 49(1):1–17.
- [3] LIU Yuchen, QIU Nansheng, LI Huili, et al. Terrestrial heat flow and crustal thermal structure in the northern slope of Tazhong uplift in Tarim Basin[J]. Geothermics, 2020, 83:101709.
- [4] 陈强路, 席斌斌, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺托果勒地区超深层油藏保存及影响因素: 来自流体包裹体的证据[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(3):121–133.  
CHEN Qianglu, XI Binbin, HAN Jun, et al. Preservation and influence factors of ultra-deep oil reservoirs in Shuntuogule area, Tarim Basin: Evidence from fluid inclusions [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3):121–133.
- [5] 万旸璐, 顾忆, 傅强, 等. 塔里木盆地顺南-古隆地区深层奥陶系地温-地压特征与油气分布关系[J]. 矿物岩石, 2017, 37(1):74–83.  
WAN Yanglu, GU Yi, FU Qiang, et al. Characteristics of geothermal-geopressure field and its implications for the process of hydrocarbon distribution in deep Ordovician stratum in Shunnan-Gulong area of Tarim Basin [J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2017, 37(1):74–83.
- [6] 吴鲜, 李丹, 韩俊, 等. 塔里木盆地顺托果勒北部地区超深层现今地温场特征[J]. 石油学报, 2022, 43(1):29–40.  
WU Xian, LI Dan, HAN Jun, et al. Characteristics of present ultra-deep geothermal field in the northern Shuntuogule low uplift, Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(1):29–40.
- [7] 焦方正. 塔里木盆地顺托果勒地区北东向走滑断裂带的油气勘探意义[J]. 石油与天然气地质, 2017, 38(5):831–839.  
JIAO Fangzheng. Significance of oil and gas exploration in NE strike-slip fault belts in Shuntuogule area of Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2017, 38(5):831–839.
- [8] 漆立新, 丁勇. 塔里木盆地顺北地区东西部海相油气成藏差异[J]. 石油实验地质, 2023, 45(1):20–28.  
QI Lixin, DING Yong. Differences in marine hydrocarbon accumulation between the eastern and western parts of Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(1):20–28.
- [9] 陈平, 能源, 吴鲜, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂带分层分段特征及构造演化[J]. 新疆石油地质, 2023, 44(1):33–42.  
CHEN Ping, NENG Yuan, WU Xian, et al. Stratification and segmentation characteristics and tectonic evolution of Shunbei No. 5 strike-slip fault zone in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2023, 44(1):33–42.
- [10] 张红波, 周雨双, 沙旭光, 等. 塔里木盆地顺北5号走滑断裂带起段发育特征与演化机制[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(2):321–334.  
ZHANG Hongbo, ZHOU Yushuang, SHA Xuguang, et al. Development characteristics and evolution mechanism of the uplifted segment of the No.5 strike-slip fault zone in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(2):321–334.
- [11] 黄太柱. 塔里木盆地塔中北坡构造解析与油气勘探方向[J]. 石油实验地质, 2014, 36(3):257–267.  
HUANG Taizhu. Structural interpretation and petroleum exploration targets in northern slope of middle Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2014, 36(3):257–267.
- [12] 贾承造, 魏国齐. 塔里木盆地构造特征与含油气性[J]. 科学通报, 2002, 47(增刊):1–8.  
JIA Chengzao, WEI Guoqi. Structural characteristics and hydrocarbon potential in Tarim Basin [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(Supp.):1–8.
- [13] 刘绍文, 李香兰, 郝春艳, 等. 塔里木盆地的热流、深部温度和热结构[J]. 地学前缘, 2017, 24(3):41–55.  
LIU Shaowen, LI Xianglan, HAO Chunyan, et al. Heat flow, deep formation temperature and thermal structure of the Tarim Basin, northwest China [J]. Earth Science Frontiers, 2017, 24(3):41–55.
- [14] 冯昌格, 刘绍文, 王良书, 等. 塔里木盆地现今地热特征[J]. 地球物理学报, 2009, 52(11):2752–2762.  
FENG Changge, LIU Shaowen, WANG Liangshu, et al. Present-day geothermal regime in Tarim Basin, northwest China [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2009, 52(11):2752–2762.
- [15] LI Xianglan, LIU Shaowen, FENG Changge. Thermal properties of sedimentary rocks in the Tarim Basin, northwestern China [J].

- AAPG Bulletin, 2019, 103(7):1605–1624.
- [16] BÜCKER C, RYBACH L. A simple method to determine heat production from gamma-ray logs [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, 13(4):373–375.
- [17] 罗昕,朱传庆,张宝收,等.利用自然伽马测井估算塔里木盆地沉积层生热率[J].*地质学报*,2020,94(7):2078–2088.
- LUO Xin, ZHU Chuanqing, ZHANG Baoshou, et al. Heat production rate calculation using gamma-ray logging of the sedimentary formation in the Tarim Basin, northwest China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2020, 94(7):2078–2088.
- [18] BEARDMORE G, CULL J. Crustal heat flow: A guide to measurement and modelling [M]. London: Cambridge University Press, 2001.
- [19] JAUPART C, MARESCHAL J C. 6.05–Heat flow and thermal structure of the lithosphere [J]. *Treatise on Geophysics*, 2007, 6: 217–251.
- [20] YANG Haijun, WU Guanghui, KUSKY T M, et al. Paleoproterozoic assembly of the north and south Tarim terranes: New insights from deep seismic profiles and Precambrian granite cores [J]. *Precambrian Research*, 2018, 305:151–165.
- [21] 李曰俊,孙龙德,胡世玲,等.塔里木盆地塔参1井底部花岗闪长岩的<sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar年代学研究[J].*岩石学报*,2003,19(3):530–536. LI Yuejun, SUN Longde, HU Shiling, et al. <sup>40</sup>Ar–<sup>39</sup>Ar geochronology of the granite and diorite revealed at the bottom of Tacan 1, the deepest well in China [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2003, 19 (3) : 530–536.
- [22] 何碧竹,焦存礼,蔡志慧,等.塔里木盆地中部航磁异常带新解译[J].*中国地质*,2011,38(4):961–969.
- HE Bizhu, JIAO Cunli, CAI Zihui, et al. A new interpretation of the high aeromagnetic anomaly zone in central Tarim Basin [J]. *Geology in China*, 2011, 38(4):961–969.
- [23] 李文山,李江海,周肖贝,等.塔里木盆地中央高磁异常带成因:来自地震反射剖面的新证据[J].*北京大学学报(自然科学版)*,2014,50(2):281–287.
- LI Wenshan, LI Jianghai, ZHOU Xiaobei, et al. Genesis of high aeromagnetic anomaly zone in central Tarim Basin: New evidence from seismic profiles [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2014, 50(2):281–287.
- [24] ZHOU Xiaojun, TIAN Weizhen, WU Guanghui, et al. Geochemistry and U-Pb-Hf zircon systematics of Cryogenian syn-rift magmatic rocks from the subsurface of the Tarim craton: Implications for subduction-related continental rifting [J]. *Precambrian Research*, 2022, 377:106733.
- [25] 何碧竹,焦存礼,黄太柱,等.塔里木盆地新元古代裂陷群结构构造及其形成动力学[J].*中国科学:地球科学*,2019,49(4):635–655.
- HE Bizhu, JIAO Cunli, HUANG Taizhu, et al. Structural architecture of Neoproterozoic rifting depression groups in the Tarim Basin and their formation dynamics [J]. *Science China: Earth Sciences*, 2019, 49(4):635–655.
- [26] ZHU Guangyou, CHEN Zhiyong, CHEN Weiyang, et al. Revisiting to the Neoproterozoic tectonic evolution of the Tarim block, NW China [J]. *Precambrian Research*, 2021, 352:106013.
- [27] 陈红汉,鲁子野,曹自成,等.塔里木盆地塔中地区北坡奥陶系热液蚀变作用[J].*石油学报*,2016,37(1):43–63.
- CHEN Honghan, LU Ziye, CAO Zicheng, et al. Hydrothermal alteration of Ordovician reservoir in northeastern slope of Tazhong uplift, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2016, 37(1):43–63.
- [28] 石开波,刘波,姜伟民,等.塔里木盆地南华纪—震旦纪构造—沉积格局[J].*石油与天然气地质*,2018,39(5):862–877.
- SHI Kaibo, LIU Bo, JIANG Weimin, et al. Nanhua–Sinian tectono-sedimentary framework of Tarim Basin, NW China [J]. *Oil & Gas Geology*, 2018, 39(5):862–877.
- [29] 杨书江,师骏,许士朝,等.塔里木盆地超深层古板块地质结构特征[C].成都:中国石油学会2021年物探技术研讨会论文集,2021:1413–1416.
- YANG Shujiang, SHI Jun, XU Shizhao, et al. Geological structure characteristics of ultra deep paleoplate in Tarim Basin [C]. Chengdu: Collection of Papers from the 2021 Geophysical Exploration Technology Seminar of the Chinese Petroleum Society, 2021: 1413–1416.
- [30] WANG Tengfei, JIN Zhenkai, YU Xiaoxia, et al. New discovery of upper crustal high- and low-velocity belts and high-velocity core in the Tarim Basin [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2019, 93(1):229–230.
- [31] 许靖华.残留弧后盆地及其辨识准则和实例[J].*石油学报*,1993,14(1):1–13.
- HSÜ K J. Relict back-arc basins: Principles of recognition and possible new examples from China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1993, 14 (1):1–13.
- [32] 杨敏,于鹏,朱光有,等.耦合地震约束信息的重磁电联合反演方法及其应用:以塔里木盆地深层地质结构解析为例[J].*天然气地球科学*,2022,33(1):168–179.
- YANG Min, YU Peng, ZHU Guangyou, et al. Gravity-magnetic-magnetotelluric joint inversion method coupled with seismic constraint information and its application: Case study of the analysis of deep geological structure in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(1):168–179.
- [33] MARESCHAL J C, JAUPART C. Radiogenic heat production, thermal regime and evolution of continental crust [J]. *Tectonophysics*, 2013, 609:524–534.
- [34] WANGEN M. The blanketing effect in sedimentary basins [J]. *Basin Research*, 1995, 7(4):283–298.
- [35] 李映涛,叶宁,袁晓宇,等.塔里木盆地顺南4井中硅化热液的地质与地球化学特征[J].*石油与天然气地质*,2015,36(6):934–944.
- LI Yingtao, YE Ning, YUAN Xiaoyu, et al. Geological and geochemical characteristics of silicified hydrothermal fluids in Well Shunnan 4, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2015, 36 (6) : 934–944.
- [36] LU Ziye, CHEN Honghan, QING Hairuo, et al. Petrography, fluid inclusion and isotope studies in Ordovician carbonate reservoirs in the Shunnan area, Tarim Basin, NW China: Implications for the nature and timing of silicification [J]. *Sedimentary Geology*, 2017, 359:29–43.

(编辑 潘晓慧)