

李丹, 常健, 邱楠生等. 2023. 塔北—阿满北部地区超深层现今地温场特征. 地球物理学报, 66(8): 3353–3373, doi:10.6038/cjg2022P0771.

Li D, Chang J, Qiu N S, et al. 2023. Present-day superdeep thermal regime of the Tabei—Northern Aman area in the Tarim Basin, Northwest China. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 66(8): 3353–3373, doi:10.6038/cjg2022P0771.

塔北—阿满北部地区超深层现今地温场特征

李丹^{1,2}, 常健^{1,2}, 邱楠生^{1,2}, 吴鲜³, 王祥⁴, 韩俊³, 李慧莉⁵

¹ 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

² 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

³ 中国石化西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011

⁴ 中国石油塔里木油田分公司, 新疆库尔勒 841000

⁵ 中国石油化工股份有限公司石油勘探开发研究院, 北京 100083

摘要 勘探表明塔里木盆地塔北—阿满北部地区超深层仍富含液态烃,但由于与油气相态和保存有关的地温场研究很薄弱,进而制约了该地区的下一步油气勘探. 本文结合多种测温数据和一维稳态热传导方程系统,研究了塔北—阿满北部地区现今地温梯度、大地热流、定深(6000~10000 m)及重点层系温度平面分布特征. 塔北—阿满北部地区 0~5000 m 统一深度现今地温梯度介于 $16.2\sim 25.3\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$ 之间,平均值为 $21.0\pm 1.4\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{km}^{-1}$; 现今大地热流介于 $27.4\sim 44.5\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ 之间,平均值为 $35.4\pm 2.5\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$,表明其现今地温场整体表现为“冷”的热背景. 6000~10000 m 超深层地层温度随着埋深增加而逐渐增大,平面上具有由北向南先减小后增大,由东向西逐渐减小的展布特征,这主要与岩石圈热结构、基底起伏和岩石热物性参数等因素有关. 塔北—阿满北部地区奥陶系底界温度介于 $107.0\sim 171.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 $145.1\text{ }^{\circ}\text{C}$,表明上部奥陶系储层普遍有利于液态烃保存;寒武系底界玉尔吐斯组烃源岩现今温度介于 $120.8\sim 184.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 $155.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,平面上表现为由西北向东南方向逐渐增大的特征. 这种分布特征与奥陶系原油密度呈负相关性,而与气油比和天然气干燥系数呈正相关性. 本文不仅阐明了塔北—阿满北部地区超深层现今地温场特征,而且探讨了超深层地温场与下古生界油气地球化学性质之间的关系,对超深层海相碳酸盐岩下一步油气勘探具有重要的指导意义.

关键词 塔里木盆地; 塔北—阿满北部地区; 超深层; 地温场; 油气地球化学性质

doi:10.6038/cjg2022P0771

中图分类号 P314

收稿日期 2021-10-17, 2022-02-22 收修定稿

Present-day superdeep thermal regime of the Tabei—Northern Aman area in the Tarim Basin, Northwest China

LI Dan^{1,2}, CHANG Jian^{1,2}, QIU NanSheng^{1,2}, WU Xian³, WANG Xiang⁴, HAN Jun³, LI HuiLi⁵

¹ State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

² Research Center for Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

³ Northwest Petroleum Company, SINOPEC, Urumqi 830011, China

⁴ Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla Xinjiang 841000, China

⁵ Sinopec Petroleum Exploration & Production Research Institute, Beijing 100083, China

Abstract Exploration shows that the superdeep layers in the Tabei—Northern Aman area of the Tarim Basin are still rich in liquid hydrocarbons. However, the research on its thermal regime related to the phase and preservation of the oil and gas is still few. This situation restricts further oil and gas exploration. This paper combined massive temperature measurement data and a 1-D

基金项目 国家自然科学基金项目(42272135 和 U19B6003)资助.

第一作者简介 李丹,女,1994 年生,博士研究生,从事区域构造及盆地分析研究. E-mail: lidan941009@163.com

steady-state heat conduction equation to systematically study the present-day geothermal gradients, terrestrial heat flow, and temperature distribution characteristics of different depths and key strata in the Tabei—Northern Aman area. The present-day geothermal gradients at unified depth of 0~5000 m range from 16.2 to 25.3 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ with a mean of 21.0 ± 1.4 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$. The heat flow varies between 27.4~44.5 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$ with an average value of 35.4 ± 2.5 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$. They show that the present-day geothermal field of the Tabei—Northern Aman area is a “cold” thermal background. The formation temperature of 6000~10000 m superdeep layers increases with increasing burial depth. It has a distribution characteristic of decreasing first and then increasing from north to south and decreasing from east to west on the plane, which is mainly related to the lithospheric thermal structure, basement relief and rock's thermophysical parameters. The present-day formation temperature at the bottom of the Ordovician in the Tabei—Northern Aman area is between 107.0~171.0 $^{\circ}\text{C}$ with an average value of 145.1 $^{\circ}\text{C}$, indicating that the upper reservoirs are generally suitable to the preservation of liquid hydrocarbons. The present-day temperature of the Yuertusi Formation source rocks at the bottom of the Cambrian is between 120.8~184.7 $^{\circ}\text{C}$ with an average value of 155.9 $^{\circ}\text{C}$, which shows a gradual increase from northwest to southeast. The temperature distribution feature is negatively correlated with the density of the Ordovician crude oil and positively correlated with the gas-oil ratio and gas dryness coefficient. This study not only clarifies the characteristics of the superdeep geothermal field in the Tabei—Northern Aman area, but also discusses the relationship between the superdeep geothermal field and the oil and gas geochemical properties of the Lower Paleozoic, which are of great significance to the future hydrocarbon exploration in the superdeep marine carbonate rocks.

Keywords Tarim Basin; Tabei—Northern Aman area; Superdeep layers; Geotemperature field; Formation petroleum geochemical characteristics

0 引言

随着能源需求的扩大和勘探技术的成熟,我国的油气勘探正不断向超深层(>6000 m)、古老层系(寒武系和奥陶系碳酸盐岩)挺进(任战利等, 2020; 刘树根等, 2021; 林煜等, 2021). 目前已在塔里木、四川和鄂尔多斯等盆地的超深层取得了一系列油气勘探突破(何登发等, 2019). 超深层油气具有埋藏深、演化时间长的特点, 并且绝大部分以气藏为主, 如四川盆地安岳气田、塔里木盆地克拉苏气田、鄂尔多斯盆地靖边气田等(何登发等, 2019; 杨学文等, 2021). 近年来, 钻探揭示出塔里木盆地塔北—阿满北部地区寒武系和奥陶系碳酸盐岩发育了深度为 6000~8500 m 的大型油田, 突破了传统的油藏赋存深度, 表明塔北—阿满北部地区是塔里木盆地原油增储的重要战略接替领域(陈绪云等, 2017; 杨学文等, 2021; 田军等, 2021a, b).

地层温度往往是制约有机质生烃、油气保存和相态分布的重要因素. 前人研究表明塔里木盆地是

典型的“冷”盆, 平面上普遍具有“隆起区高, 坳陷区低”的横向差异性(冯昌格等, 2009; 刘绍文等, 2017a). 而盆地北缘库车坳陷的大地热流偏高(>50 $\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$), 并受盆山耦合影响从山前带由北向南降低(刘绍文等, 2003, 2017a). 前人利用测温数据和岩石热物性参数分析了塔里木盆地 3000~5000 m 的温度展布特征, 并认为塔北隆起东部的地温梯度和大地热流高于西部地区(王良书等, 1995; 冯昌格等, 2009; 刘绍文等, 2017a). Liu 等(2020)系统剖析了阿满过渡带 6000~8000 m 的现今地温分布特征, 并揭示出深部碳酸盐岩段地温梯度(14.8 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)远低于浅部碎屑岩段(18.7 $^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$), 表明现今地温梯度随深度的增加而减小. 但受钻井深度限制, 对塔北—阿满北部地区超深层现今地温场特征缺少系统性研究. 此外, 前人通过收集塔北隆起及周缘地区的原油密度、气油比和天然气干燥系数等油气地球化学性质探讨了油气运聚特征, 表明油气由东南向西北方向运移(孟祥霞等, 2015; 李洪辉等, 2020; 韩强等, 2021). 但目前关于温度与油气地球化学性质关系的研究较少, 制约了钻井前

对油气相态的评估. 因此系统分析塔北—阿满北部地区超深层现今地温场对油气成熟演化及进一步石油勘探开发具有重要意义.

本文在甄选前人测温数据基础上, 结合近年来获得的多种地温资料, 利用一维稳态热传导方程计算了塔北—阿满北部地区 0~5000 m 统一深度现今地温梯度、大地热流以及超深层现今温度(奥陶系、寒武系底界面和 6000~10000 m 埋深处), 系统分析了研究区超深层现今地温场横向展布规律, 并进一步探讨了研究区现今地温场分布的控制因素及其与油气地球化学性质的关系, 以期为塔里木盆地台盆区超深层海相碳酸盐岩油气勘探提供依据.

1 地质背景

位于中国西北部的塔里木盆地是我国规模最大的含油气盆地(图 1a), 夹持于天山、昆仑山和阿尔金山脉之间(图 1b), 面积约为 $5.6 \times 10^5 \text{ km}^2$. 塔里木盆地隆坳相间, 可分为“三隆四坳”7 个构造单元(图 1b; 安海亭等, 2009; 王步清等, 2009; 李曰俊等, 2012). 其中塔北—阿满北部地区位于塔里木盆地中北部, 横跨塔北隆起的轮台凸起、轮南低凸起、英买力低凸起和北部坳陷的阿满过渡带北部地区(图 1c). 塔北隆起作为一个古隆起, 经多期构造运动影响, 现今深埋于库车前陆盆地南斜坡, 总体近东西向展布, 发育基底逆断裂、走滑断裂和张扭断裂(安海亭等, 2009; 吕海涛等, 2017; 马德波等, 2020). 阿满北部地区是塔里木盆地最稳定的古构造单元, 发育多个高角度深切基底的走滑断裂带(李萌等, 2015; 邓尚等, 2018; 焦方正, 2018).

塔北—阿满北部地区受盆地多期旋回控制, 经历了复杂的构造运动叠加和改造, 包括早古生代形成、晚古生代定型、中生代改造和新生代埋藏 4 个阶段(许志琴等, 2011; 陈横俊等, 2021). 震旦—奥陶纪, 塔北—阿满北部地区发育稳定的碳酸盐岩台地, 钻探揭示其残余厚度为 1383~3013 m(刘丽芳, 2006; 朱井泉等, 2008; 张鹏等, 2013; 邓尚等, 2018; 杨海军等 2020). 塔里木盆地在中奥陶世开始由伸展转变为挤压构造环境, 研究区向西北方向剥蚀程度加强(孟祥霞等, 2015). 志留—泥盆纪, 研究区开始由海相转变为陆相环境, 塔北隆起构造变形最强烈, 阿满过渡带受塔北、塔中强烈挤压发生明显抬升(贾承造, 1997; 邓尚等, 2018; 陈横俊等, 2021). 石炭纪末期, 研究区受塔里木板块与伊犁—中天山陆块

碰撞影响发生不同程度的抬升, 其中英买力部分地区泥盆—石炭系被剥蚀殆尽(李萌等, 2015). 二叠纪时期, 研究区发育沉积厚度为 200~600 m 的火成岩, 并于二叠纪末期遭受抬升剥蚀(贾承造, 1997; 杨树锋等, 2014; 李佳蔚等, 2016). 随后, 研究区进入陆内坳陷沉积阶段, 发育河流—三角洲—半深湖沉积, 沉积厚度为 33~902 m(刘丽芳, 2006). 三叠纪末期, 受羌塘块体与欧亚大陆拼贴事件影响, 阿满过渡带北部地区经历强烈的构造隆升剥蚀, 塔北隆起西部构造变形强于东部地区(李萌等, 2015; 孟祥霞等, 2015). 侏罗—白垩纪, 盆地相对稳定, 侏罗系或白垩系超覆于三叠系之上(李萌等, 2015). 新生代以来, 在印度板块和欧亚板块碰撞的远程效应下, 研究区北部接受了巨厚的陆相碎屑岩沉积, 形成北倾构造格局(Sobel and Dumitru, 1997; Yu et al., 2014).

塔北—阿满北部地区均在超深层碳酸盐岩发现了工业油气流. 但不同的是, 塔北隆起发育与抬升剥蚀作用有关的潜山圈闭和与寒武系膏盐拱张作用有关的背斜圈闭(吕修祥等, 2007). 塔北隆起以古隆起控油、斜坡带聚集为特点, 北部为超重质油藏, 向南过渡为轻质油藏(孟祥霞等, 2015; 田军等, 2021b). 而阿满过渡带发育断溶体油气藏, 由西北向东南方向依次发育轻质油藏、挥发性油藏、凝析气藏和干气藏(焦方正, 2018; 吴鲜等, 2022).

2 数据和方法

2.1 温度数据

沉积盆地地温场分布特征研究主要是借助具有一定深度的、关井时间长的各种钻孔测温数据, 以规避地表因素、钻头摩擦和井液循环的干扰. 常见的可用于区域地温场研究的测温数据包括系统稳态测温曲线、试油温度和测井井底温度数据. 其中系统稳态测温曲线是在达到钻孔热平衡时间以后对全钻孔或特定井段的连续测温, 可靠性最高; 试油温度是在关井数天或长期关井后对含油层段进行试油测压获取的温度数据, 测温结果比较接近真实; 测井井底温度是在停钻后较短时间内将测量仪器放置一定深度获取的井底温度, 经校正后可参考使用(邱楠生等, 2001; 常健等, 2016; 刘绍文等, 2017a). 本次研究在中石化西北油田分公司和中石油塔里木油田分公司收集了大量近几年新的钻孔测温数据, 并整合了研究区已发表的测温数据(王良书等, 2005; Liu et al., 2016; 刘绍文等, 2017a). 其中系统稳态测温曲

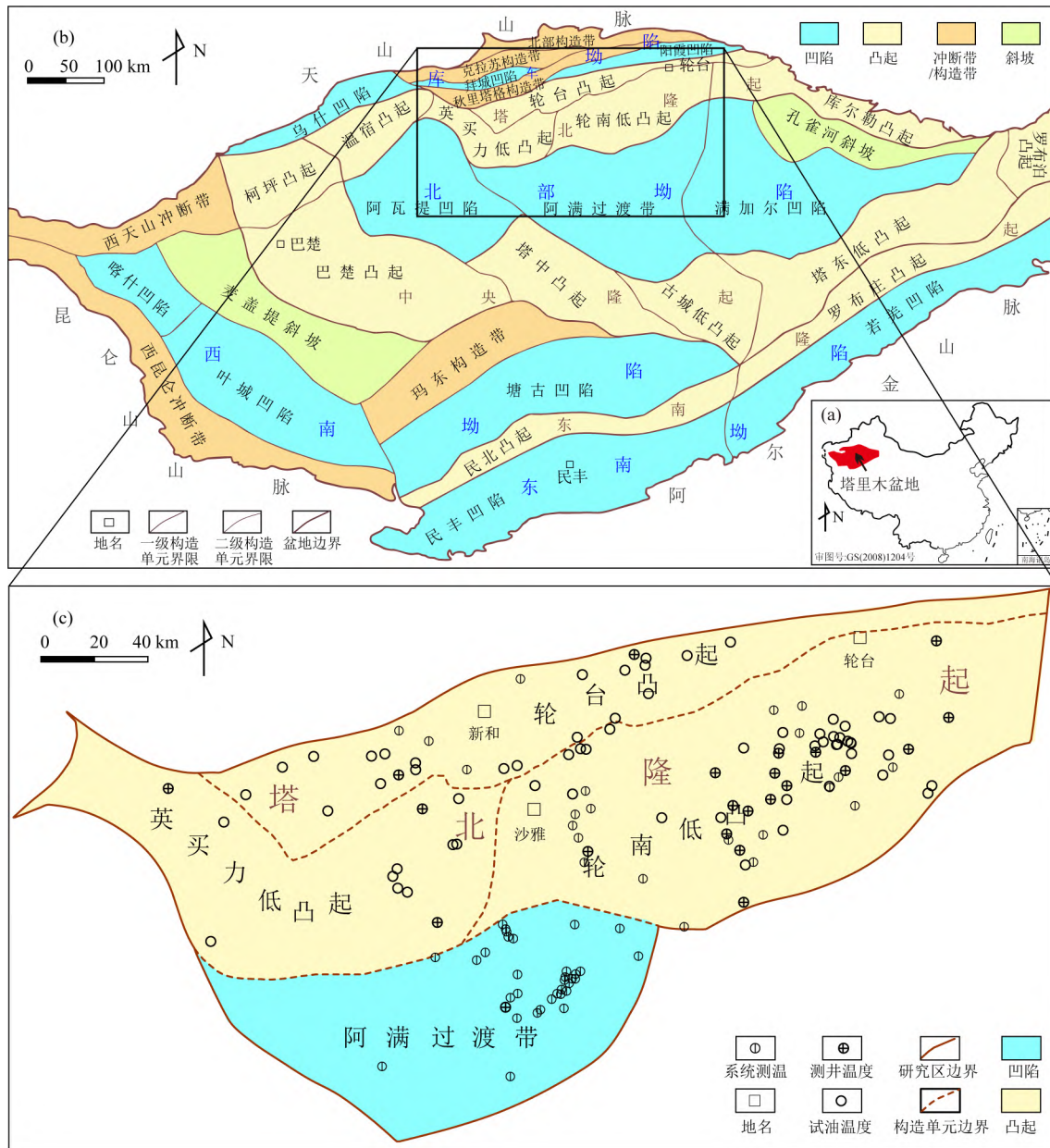


图1 (a) 塔里木盆地位置; (b) 塔里木盆地构造单元划分(修改自杨海军等, 2020);

(c) 塔北—阿满北部地区构造分区及测温井分布

Fig.1 (a) The map of China indicating the location of the Tarim Basin; (b) Tectonic units of the Tarim Basin (modified from Yang et al., 2020); (c) Tectonic units of Tabei—Northern Amani area showing the locations of the temperature-measurement wells

线深度范围为 1607~8220 m, 试油温度和测井井底温度的测温深度分别为 2734~7116 m 和 3102~7723 m(图 2)。剔除明显异常的数据后, 本文共选取了 56 口井的系统稳态测温曲线, 63 口井的试油温度数据和 23 口井的测井井底温度数据开展地温场研究(表 3—5)。通过与系统稳态测温曲线和试油温度数据进行对比, 对测井井底温度数据进行校正。在校正过程中优先考虑可靠性最高的系统稳态测温曲线, 而对于缺少该类数据的地区, 是基于塔北—阿满

北部地区试油温度和测井井底温度数据的线性回归进行校正(邱楠生等, 2001)。受钻井液影响, 测井井底温度总体略低于同等深度下的试油温度, 在同一深度处二者温度相差 4~13 °C(图 3)。本文选取的测温数据随深度增加而线性升高, 代表了典型的热传导特征, 因此可用于沉积盆地现今地温场研究(图 2)。

2.2 岩石热物性参数

岩石热导率和岩石生热率是研究沉积盆地现今地温场分布的重要参数。本文收集了前人测试

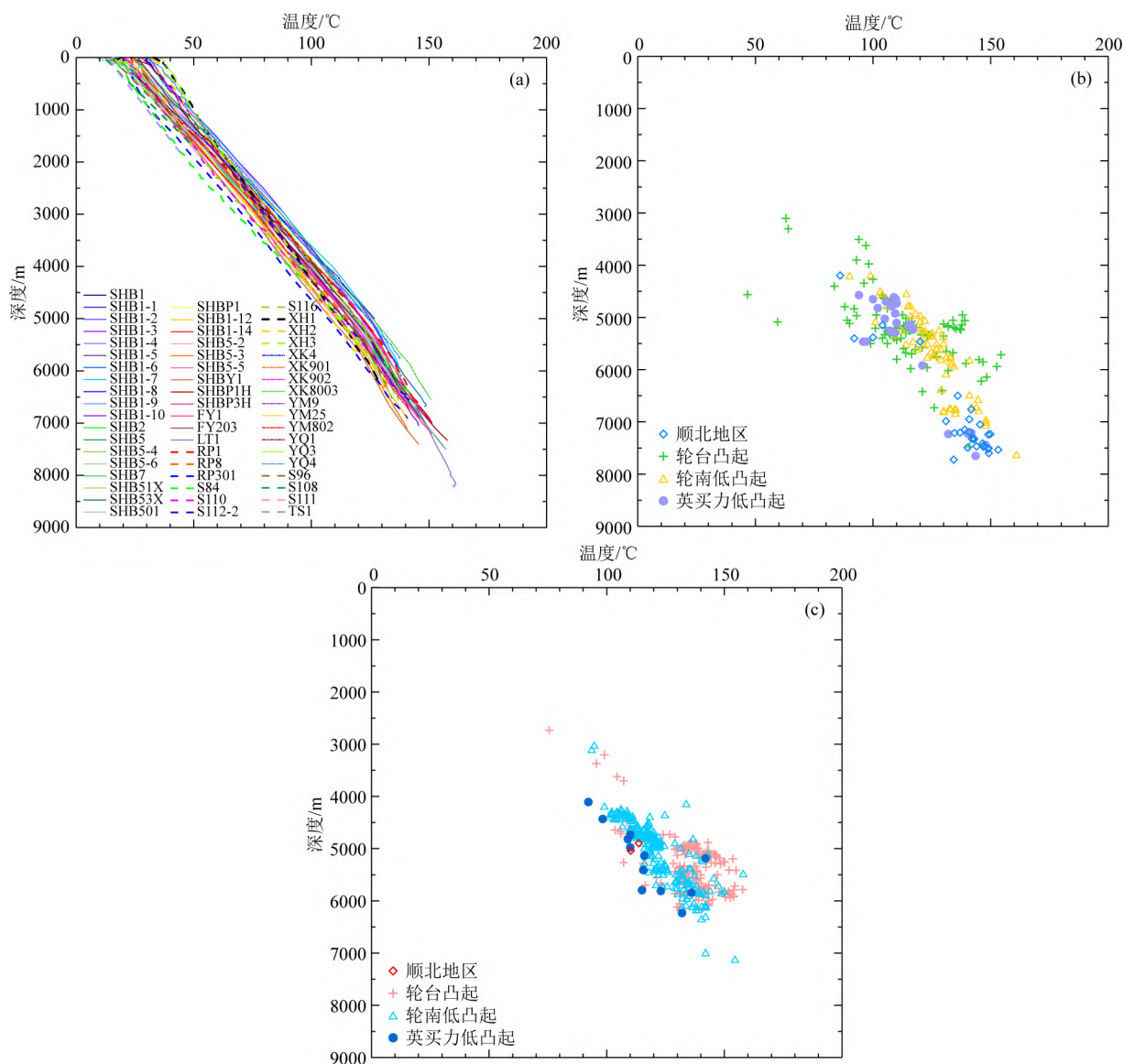


图 2 塔北—阿满北部地区系统稳态测温曲线(a)、测井井底温度数据(b)和试油温度数据(c)剖面

Fig. 2 Steady-state temperature curves of boreholes (a), bottom-hole temperature data (b) and oil-testing temperature data (c) profiles in the Tabei—Northern Aman area

的塔里木盆地震旦—新近系 1887 个岩石热导率和 155 个岩石生热率数据(魏大卫, 1992; 王钧等, 1995; 王社教等, 1999; 邱楠生, 2002; 王良书等, 2005; 冯昌格等, 2009; Liu et al., 2011, 2016, 2020; 罗昕等, 2020). 对于不同岩性的岩石热物性参数采用算数平均值计算, 而不同层位的岩石热物性参数采用调和平均值计算, 力求获得的岩石热导率和岩石生热率对塔北—阿满北部地区现今地温场研究具有代表性. 塔里木盆地岩石生热率介于 $0.07 \sim 3.16 \mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$ 之间, 岩石热导率介于 $0.52 \sim 5.32 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 之间(表 1—2). 图 4 和图 5 分别给出了塔里木盆地岩石热导率和岩石生热率与深度和岩性的关系, 岩石热导率随深度

增加和时代变老而增大, 而岩石生热率相反, 这可能与温度、压力、岩性及岩石压实程度有关; 不同岩性的岩石热导率和岩石生热率差别较大, 岩石热导率: 砂岩 < 泥岩 < 灰岩 < 白云岩 < 膏岩, 而岩石生热率: 灰岩 < 白云岩 < 砂岩 < 泥岩.

2.3 研究方法

地温梯度表示地温随深度的变化率. 对于不同类型的钻孔测温数据, 可以利用相应公式计算得到现今地温梯度. 其中, 系统稳态测温曲线可由温度—深度数据的线性回归求取地温梯度(表 3). 测井井底温度经校正后同试油温度数据利用公式

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

表 1 塔里木盆地不同层位岩石生热率(A)和岩石热导率(K)数据表

Table 1 Compilation of the heat generation (A) and thermal conductivity (K) of the different formations in the Tarim Basin

地层	岩石热导率 K ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	岩石生热率 A ($\mu W \cdot m^{-3}$)	地层	岩石热导率 K ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	岩石生热率 A($\mu W \cdot m^{-3}$)
新近系(N)	1.81 ± 0.20	1.72 ± 0.66	石炭系(C)	2.58 ± 0.27	1.15 ± 0.13
古近系(E)	1.69 ± 0.13	1.23 ± 0.48	泥盆系(D)	2.70 ± 0.21	1.26 ± 0.21
白垩系(K)	1.93 ± 0.29	1.26 ± 0.12	志留系(S)	2.70 ± 0.20	1.27 ± 0.16
侏罗系(J)	2.02 ± 0.26	1.57 ± 0.50	奥陶系(O)	3.01 ± 0.22	1.05 ± 0.36
三叠系(T)	2.14 ± 0.12	1.21 ± 0.14	寒武系(⌒)	3.84 ± 0.11	0.41 ± 0.18
二叠系(P)	2.12 ± 0.17	1.45 ± 0.03	震旦系(Z)	2.75 ± 0.62	0.55 ± 0.62

注:数据来自魏大卫, 1992; 王钧等, 1995; 王社教等, 1999; 邱楠生, 2002; 王良书等, 2005; 冯昌格等, 2009; Liu et al., 2011, 2016, 2020; 罗昕等, 2020.

表 2 塔里木盆地不同岩性的岩石生热率(A)和岩石热导率(K)数据表

Table 2 Compilation of the heat generation (A) and thermal conductivity (K) of the different lithologies in the Tarim Basin

岩性	岩石热导率 K 范围 ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	岩石热导率 K 平均值 ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$)	岩石生热率 A 范围 ($\mu W \cdot m^{-3}$)	岩石生热率 A 平均值 ($\mu W \cdot m^{-3}$)
泥岩	1.04~4.28	2.09 ± 0.40	0.58~3.16	1.94 ± 0.61
砂岩	0.52~4.40	1.94 ± 0.68	0.13~2.58	0.97 ± 0.27
灰岩	1.11~5.32	2.54 ± 0.33	0.07~1.48	0.37 ± 0.19
白云岩	1.81~4.78	3.44 ± 0.34	0.15~1.42	0.44 ± 0.01
膏岩	3.20~5.12	4.62 ± 0.35	—	—

注:数据来自魏大卫, 1992; 王钧等, 1995; 王社教等, 1999; 邱楠生, 2002; 王良书等, 2005; 冯昌格等, 2009; Liu et al., 2011, 2016, 2020; 罗昕等, 2020.

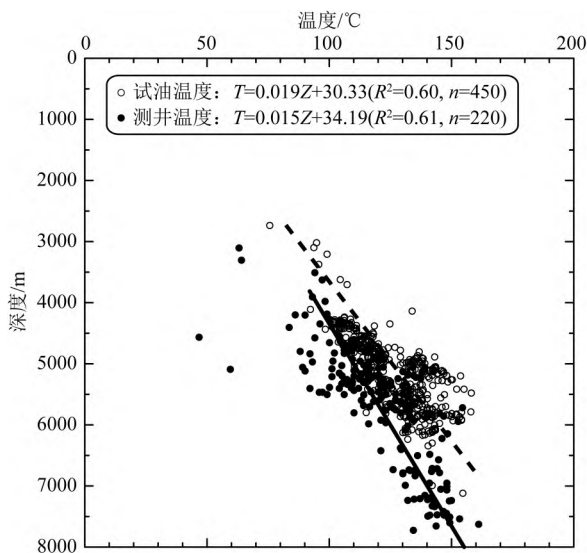


图 3 塔北—阿满北部地区测井底温和试油温度关系
Fig. 3 Relationship between bottom-hole temperature and oil-testing temperature data in the Tabei—Northern Aman area

计算得到地温梯度(表 4—5). 公式(1), G 为地温梯度($^{\circ}C \cdot km^{-1}$); T_s 为实测温度($^{\circ}C$); T_0 为近地表恒温带温度(设为 $14^{\circ}C$); Z 为测温深度(km); Z_0 为恒温带深度(设为 20 m). 由于钻孔测温往往深度不同, 为了避免横向对比的不客观性, 本文在测温数据

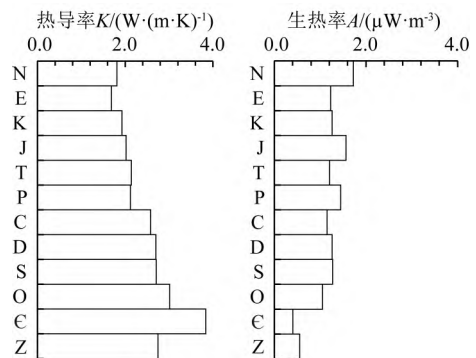


图 4 塔里木盆地不同层位岩石生热率(A)和岩石热导率(K)直方图

Fig. 4 Histogram of heat generation (A) and thermal conductivity data (K) of the different formations in the Tarim Basin

和岩石热物性参数基础上, 将现今地温梯度统一校正到 5000 m, 从而对比分析研究区 0~5000 m 统一深度现今地温梯度分布特征. 具体计算过程如下: 对于 5000 m 埋深处有测温数据的钻井直接利用温度—深度数据线性回归和公式(1)计算 0~5000 m 统一深度现今地温梯度; 对于测温深度未达到 5000 m 的钻井, 首先利用一维稳态热传导方程(4)计算 5000 m 埋深处现今温度, 然后利用公式(1)计算 0~

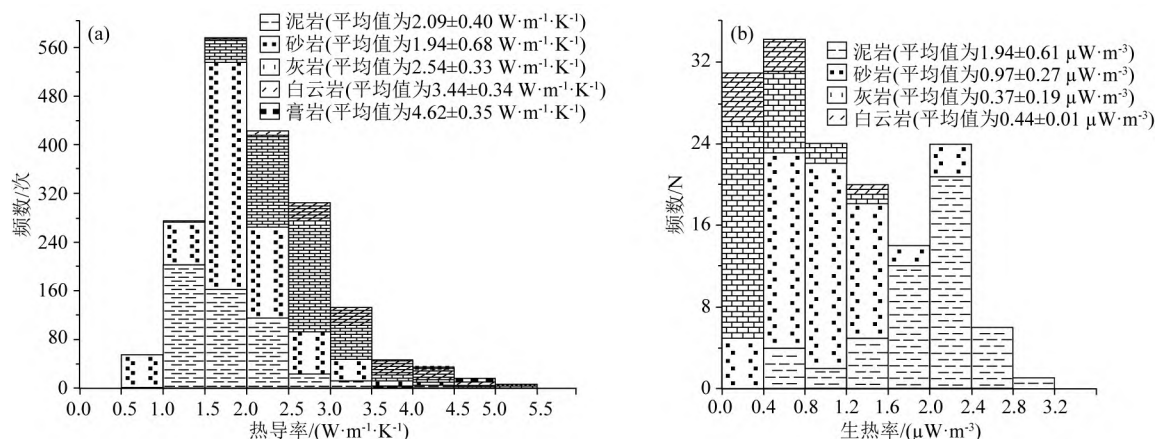


图5 塔里木盆地不同岩性岩石生热率(a)和岩石热导率(b)直方图

Fig. 5 Histogram of heat generation (a) and thermal conductivity data (b) of the different lithologies in the Tarim Basin

5000 m 统一深度现今地温梯度。

大地热流往往是通过测量地温梯度和岩石热导率两个参数而间接得到。不同类型温度数据计算大地热流的方式也存在差异。利用系统稳态测温曲线计算大地热流的公式如下：

$$q_s = -K_i \cdot \frac{dT}{dZ}, \quad (2)$$

其中, q_s 为大地热流 ($mW \cdot m^{-2}$); K_i 为调和岩石热导率 ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$); dT/dZ 为地温梯度 ($^{\circ}C \cdot km^{-1}$); 负号表示大地热流方向与地温梯度方向相反。

测井井底温度数据经校正后同试油温度数据采用 Chapman 等(1984)提出的热阻法计算大地热流：

$$q_s = \frac{T_s - T_0}{\sum_{i=0}^n \frac{Z_i}{K_i}}, \quad (3)$$

其中, Z_i 为相邻构造层间的深度差 (m); K_i 为 Z_i 深度处地层热导率 ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$); T_s 为实测温度 ($^{\circ}C$); T_0 为近地表恒温带温度 ($14^{\circ}C$)。

基于多种测温数据, 本文利用公式(2)和(3)以及岩石热物性参数获得了塔北—阿满北部地区的大地热流值(表3—5)。

由于研究区绝大多数钻孔测温深度低于 6000 m, 超深层温度缺少实测数据的约束。因此, 本文在浅部实测温度数据、岩石热物性参数、钻井分层数据和深部地震资料基础上, 利用一维稳态热传导方程(4)计算了研究区 6000~10000 m 埋深及下古生界奥陶系和寒武系底界面的现今地层温度(表3—5)。以轮探1井为例, 实测温度的深度范围是 0~8220 m, 利用公式

$$T_i^b = T_i^t + \frac{q_i \times Z_i}{K_i} - \frac{A_i \times Z_i^2}{2 \times K_i} \quad (4)$$

计算的温度值与实测值相差 $0.1 \sim 3.5^{\circ}C$, 具有很好的吻合性, 表明这种方法推测深部温度是可靠的(图6)。公式(4)中, i 为构造层数; T_i^t 和 T_i^b 分别为第 i 层顶、底界面的温度 ($^{\circ}C$); q_i 为第 i 层上界面的大地热流值 ($mW \cdot m^{-2}$); Z_i 为第 i 层的厚度 (km); K_i 为第 i 层的岩石热导率 ($W \cdot (m \cdot K)^{-1}$); A_i 为第 i 层的岩石生热率 ($\mu W \cdot m^{-3}$)。

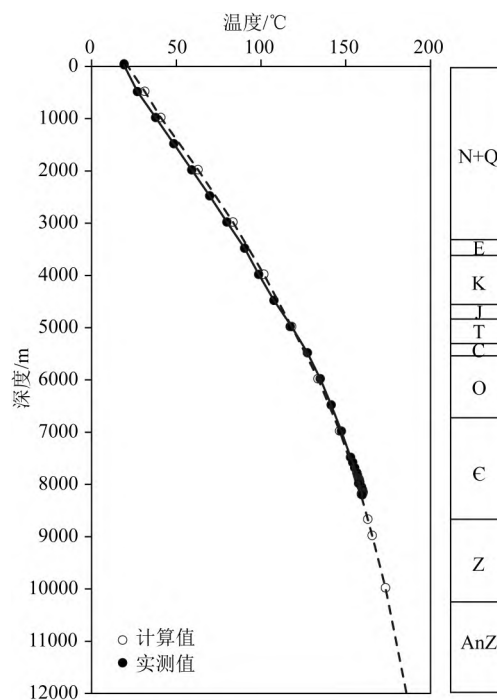


图6 塔北隆起轮探1井温度剖面计算值与实测值对比

Fig. 6 The comparison of the calculated and measured temperature values for the well LT 1 in the Tabei Uplift

表 3 塔北—阿满北部地区 56 口井的系统稳态测温现今地温场计算结果

Table 3 Calculated present-day geothermal regime values of systematically continuously measured temperature from 56 boreholes in the Tabei—Northern Aman area

井号	测温井段 (m)	G_{0-5000} ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)	q_s ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	K_t ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	A_t ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)	T_{6000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{7000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{8000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{9000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{10000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_O ($^{\circ}\text{C}$)	T_{ζ} ($^{\circ}\text{C}$)
富源 1	0~7200	20.6	36.2	2.0	1.3	130.4	147.2	158.4	165.9	172.5	161.7	176.0
富源 203	0~7050	20.5	33.8	2.0	1.3	130.7	145.3	153.3	159.5	165.6	153.0	165.2
轮探 1	0~8220	22.0	34.7	2.1	0.9	136.1	148.5	159.0	166.1	173.2	143.0	163.9
热普 1	0~6600	22.0	34.2	1.9	1.6	136.9	148.4	156.7	162.8	168.9	156.5	167.4
热普 301	0~6900	19.1	34.0	1.9	1.4	124.1	140.7	148.5	154.5	160.6	147.1	159.1
热普 8	0~6300	20.7	31.8	1.9	1.5	129.2	136.4	143.8	149.3	154.9	143.6	153.0
沙 108 *	500~1620	20.3	39.8	1.8	1.7	127.5	138.4	147.5	155.6	164.2	143.2	153.5
沙 110	0~5600	19.8	33.6	1.8	1.5	127.6	136.1	142.5	148.9	155.7	135.7	148.4
沙 111 *	500~1607	20.7	39.9	1.8	1.7	129.7	140.7	149.9	157.8	166.4	145.4	158.9
沙 112-2	50~6550	20.1	32.7	1.9	1.3	130.5	145.0	151.2	157.2	163.4	144.4	160.2
沙 116	0~5800	19.7	34.8	1.8	1.4	128.9	137.6	144.4	151.3	158.5	136.5	147.9
沙 84	50~6400	20.0	37.4	1.8	1.7	134.0	146.9	154.3	161.8	169.2	—	149.9
沙 96 *	500~1714	20.5	41.5	1.8	1.7	129.2	140.7	150.4	159.0	168.2	145.6	156.6
顺北 1	0~5200	21.4	34.4	1.8	1.5	129.4	138.7	147.2	154.8	160.9	152.5	166.5
顺北 1-1	0~6950	20.9	35.6	2.0	1.4	131.1	146.6	155.4	163.5	169.9	161.9	178.4
顺北 1-10	0~7000	21.9	35.8	2.0	1.4	134.3	150.9	159.9	167.9	174.4	165.6	180.8
顺北 1-12	1500~5148	20.9	33.8	1.8	1.5	130.1	139.5	147.7	155.4	161.2	154.4	167.6
顺北 1-14	1500~6996	22.0	34.1	2.0	1.4	135.9	151.2	159.6	167.4	173.4	166.8	179.5
顺北 1-15	1500~7500	21.5	34.8	2.0	1.3	133.9	149.2	163.0	171.3	177.4	171.0	184.3
顺北 1-2	0~7100	20.9	36.1	2.0	1.4	131.1	149.0	159.6	167.9	174.4	166.3	181.7
顺北 1-3	0~6100	22.0	33.6	1.9	1.5	137.3	146.2	154.4	161.6	167.4	159.1	172.5
顺北 1-4	0~6900	22.0	35.5	2.0	1.4	137.5	151.2	160.0	168.1	174.5	166.5	180.0
顺北 1-5	0~6800	21.3	35.1	1.9	1.5	132.8	147.8	156.5	164.5	170.8	163.1	177.0
顺北 1-6	0~6680	22.5	35.3	1.9	1.4	139.7	151.1	159.9	167.7	174.0	165.0	180.1
顺北 1-7	0~6000	22.3	34.6	1.9	1.5	136.8	145.7	154.3	161.9	168.0	159.7	173.9
顺北 1-8	0~6900	21.2	34.9	1.9	1.4	132.4	147.6	156.3	164.0	170.2	161.8	176.2
顺北 1-9	0~6400	21.1	34.9	1.9	1.5	132.1	143.5	152.2	160.0	166.2	158.2	171.9
顺北 2	0~6000	21.0	37.1	1.9	1.5	133.1	143.6	153.0	161.6	168.4	159.6	174.3
顺北 5	0~6528	20.5	33.5	1.9	1.5	128.4	138.5	146.6	153.6	159.4	151.4	163.2
顺北 501	0~7500	21.5	35.8	2.0	1.4	133.9	148.6	161.3	169.4	175.8	167.7	181.0
顺北 51	0~7200	20.9	33.8	2.0	1.4	134.9	148.0	157.2	164.9	170.7	164.1	175.8
顺北 5-2	1500~6900	19.7	34.1	1.9	1.5	127.4	140.9	149.1	156.6	162.5	154.9	166.8
顺北 53	300~7500	21.6	35.4	2.0	1.3	133.5	148.4	161.5	169.9	176.2	169.6	183.9
顺北 5-3	1500~7100	19.8	31.9	1.9	1.4	126.2	139.4	147.4	154.1	159.4	152.4	163.3
顺北 5-4	0~6250	19.9	33.6	1.9	1.5	127.5	137.5	145.5	152.6	158.4	150.4	162.2
顺北 5-5	1500~5450	20.6	34.1	1.8	1.5	129.7	139.3	147.5	155.5	161.4	155.4	167.4
顺北 5-6	300~7000	21.1	35.1	2.0	1.4	132.5	148.1	156.8	164.9	171.1	163.9	178.0
顺北 7	0~7400	19.3	33.5	1.9	1.4	125.0	138.5	150.3	157.9	163.6	157.3	169.7

续表 3

井号	测温井段 (m)	$G_{0\sim 5000}$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)	q_s ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	K_t ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	A_t ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)	T_{6000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{7000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{8000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{9000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{10000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_O ($^{\circ}\text{C}$)	T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)
顺北蓬 1	0~7000	19.8	31.8	1.9	1.4	125.9	139.5	147.0	154.1	159.5	153.7	165.2
顺北评 1	1500~7330	21.3	35.9	2.0	1.3	133.5	150.8	163.8	172.0	178.5	170.2	184.7
顺北评 3	1500~6900	20.9	34.4	2.0	1.4	131.2	145.8	154.3	161.9	168.0	160.2	173.6
顺北鹰 1	1500~7400	19.3	32.5	2.0	1.4	125.0	138.5	150.2	157.5	163.0	157.4	169.2
新垦 4	0~5000	22.7	36.8	1.7	1.6	140.7	151.0	159.0	165.7	172.8	155.4	168.3
新垦 8003	0~6550	22.9	35.3	1.8	1.6	143.3	154.9	162.5	168.9	175.5	159.0	171.8
新垦 901	0~5926	22.3	31.5	1.8	1.6	136.8	145.1	151.4	156.7	162.3	148.5	159.2
新垦 902	0~5892	21.8	32.0	1.8	1.6	134.2	142.6	149.1	154.6	160.3	146.1	157.2
星火 1	0~6147	19.5	27.6	1.8	1.4	126.3	132.5	137.5	142.4	147.2	—	124.0
星火 2	0~5630	18.9	27.4	1.8	1.4	120.8	126.1	131.3	136.3	141.1	—	120.8
星火 3	50~6550	19.7	28.6	1.8	1.6	129.0	139.4	144.5	149.5	154.3	—	—
塔深 1*	500~1807	18.9	41.0	1.8	1.7	121.3	132.0	140.4	148.7	157.8	131.1	148.1
于奇 1	50~5000	21.2	31.7	1.7	1.6	129.4	137.1	142.9	148.9	155.0	136.7	146.0
于奇 3	0~6100	21.1	31.0	1.8	1.5	136.0	145.3	150.9	156.7	162.6	142.1	153.3
于奇 4	0~5770	22.1	32.9	1.8	1.5	139.9	147.1	153.2	159.6	166.1	143.6	155.7
跃满 25	0~6950	19.7	33.9	1.9	1.4	128.2	140.9	149.1	155.2	161.1	148.9	161.5
跃满 802	0~6760	20.5	34.8	1.9	1.4	129.5	143.8	152.4	158.8	165.1	152.1	164.9
跃满 9	100~7050	20.5	33.4	1.9	1.4	130.7	145.3	153.1	159.0	164.8	152.9	164.7

注: $G_{0\sim 5000}$ 为 0~5000 m 统一深度现今地温梯度; q_s 为大地热流; K_t 为调和热导率; A_t 为调和生热率; T_{6000} , T_{7000} , T_{8000} , T_{9000} 和 T_{10000} 分别为 6000 m, 7000 m, 8000 m, 9000 m 和 10000 m 埋深处的现今温度; T_O , T_{∞} 分别为奥陶系和寒武系底界的现今温度; * 为笔者收集的已公开发表的数据 (Liu et al., 2016; 刘绍文等, 2017a)。

表 4 塔北—阿满北部地区 63 口井的试油温度现今地温场计算结果

Table 4 Calculated present-day geothermal regime values of oil-testing temperature from 63 boreholes in the Tabai—Northern Aman area

井号	测温深度 (m)	试油温度 ($^{\circ}\text{C}$)	$G_{0\sim 5000}$ ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$)	q_s ($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$)	K_t ($\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$)	A_t ($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$)	T_{6000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{7000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{8000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{9000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_{10000} ($^{\circ}\text{C}$)	T_O ($^{\circ}\text{C}$)	T_{∞} ($^{\circ}\text{C}$)
东河 1	5718	140.0	22.8	38.4	1.7	1.6	143.3	152.1	160.3	168.3	176.2	148.2	151.9
东河 12	5631	135.0	21.8	37.5	1.7	1.7	138.8	147.3	155.3	163.0	170.7	143.6	147.2
东河 21	5566	135.0	22.2	37.9	1.7	1.7	140.7	149.2	157.3	165.1	172.8	145.4	149.1
东河 24	5660	139.0	22.7	38.5	1.7	1.7	142.6	151.4	159.7	167.8	175.7	147.5	151.3
东河 4	6118	142.0	22.4	37.1	1.8	1.7	140.6	150.6	158.8	165.5	172.8	156.0	166.1
东河 5	6086	143.3	22.7	37.6	1.8	1.7	142.2	152.5	160.7	167.6	175.1	157.4	168.2
东河 6	5972	145.0	23.3	38.7	1.8	1.7	145.4	156.1	164.6	171.9	179.7	161.3	172.5
红旗 1	4559	110.0	20.9	37.1	1.8	1.7	131.6	139.1	146.9	154.8	162.6	—	139.0
红旗 5	4183	99.0	19.5	35.7	1.8	1.7	125.7	132.8	140.2	147.6	154.9	125.6	132.6
解放 123	5251	123.0	21.2	37.0	1.8	1.6	130.5	139.4	146.5	154.0	161.7	136.7	151.1
轮东 1	7116	154.5	23.4	37.9	1.9	1.2	143.2	153.4	162.5	169.9	177.9	160.3	169.3
轮古 1	5186	120.3	20.9	36.2	1.8	1.6	128.0	136.2	143.2	150.6	158.1	132.1	146.2
轮古 2	5301	124.9	21.5	37.1	1.8	1.6	131.9	140.3	147.6	155.2	163.0	136.1	150.6
轮古 2-1	5273	124.5	21.5	37.1	1.8	1.6	131.9	140.3	147.6	155.2	162.9	136.2	150.7
轮古 2-2	5260	119.9	20.6	35.7	1.8	1.6	127.4	135.3	142.2	149.4	156.7	131.4	145.1

续表 4

井号	测温深度 (m)	试油温度 (℃)	G_{0-5000} (℃·km ⁻¹)	q_s (mW·m ⁻²)	K_t (W·(m·K) ⁻¹)	A_t (μW·m ⁻³)	T_{6000} (℃)	T_{7000} (℃)	T_{8000} (℃)	T_{9000} (℃)	T_{10000} (℃)	T_O (℃)	T_{∞} (℃)
轮古 3	5056	118.2	20.8	36.1	1.8	1.6	128.4	136.5	143.5	150.8	158.2	132.5	146.5
轮古 4	5401	125.3	21.4	34.3	1.7	1.4	130.8	138.8	145.6	152.8	160.1	134.8	148.5
轮古 40	5710	125.8	20.8	35.2	1.8	1.6	128.4	136.9	143.6	150.9	158.0	135.8	143.2
轮古 42	5745	129.8	21.5	36.2	1.8	1.6	132.2	140.2	147.2	154.6	162.0	136.3	148.8
轮古 6	5304	122.1	20.9	36.2	1.8	1.6	129.1	137.2	144.2	151.5	159.0	133.2	147.2
轮古 6C	5129	119.5	20.9	36.2	1.8	1.6	128.5	136.6	143.6	151.0	158.5	132.5	146.5
轮古 8	4892	115.6	20.7	36.3	1.7	1.7	127.0	135.2	142.3	149.7	157.3	131.1	145.2
轮南 1	5109	117.0	20.4	35.3	1.8	1.6	125.2	133.2	140.1	147.4	154.8	129.2	141.7
轮南 10	5769	132.8	22.1	37.6	1.8	1.4	135.1	143.4	150.9	158.7	166.7	138.4	153.7
轮南 12	5120	122.0	21.4	36.8	1.7	1.6	130.8	138.9	146.2	153.9	161.7	134.0	149.0
轮南 14	5120	118.3	20.6	36.0	1.8	1.6	127.3	136.9	143.9	151.6	159.4	134.0	146.6
轮南 26	4977	122.2	21.6	37.6	1.7	1.7	131.8	140.6	148.1	155.8	163.6	134.0	150.8
轮南 4	5404	120.0	20.5	34.9	1.8	1.6	125.4	133.1	139.6	146.5	153.6	129.3	142.4
轮南 46	4983	116.0	20.5	36.2	1.8	1.5	127.3	135.8	142.9	150.3	158.0	138.9	148.1
轮南 57	5266	116.0	19.8	35.0	1.8	1.6	123.6	132.6	140.4	146.8	153.2	138.0	153.9
轮南 59	5437	118.0	19.8	34.7	1.8	1.6	123.2	132.1	139.9	146.3	152.6	137.5	153.4
沙 106-2	5717	123.7	20.4	34.8	1.8	1.5	126.4	135.5	143.1	150.2	157.3	139.4	144.1
沙 101	5388	125.6	21.4	37.8	1.8	1.5	132.0	142.2	150.2	157.9	165.9	144.5	155.7
沙 112	6167	138.1	21.7	38.0	1.9	1.3	136.3	146.6	156.2	163.6	171.6	155.8	164.7
沙 117	5939	132.2	21.6	36.9	1.9	1.4	132.8	142.7	151.9	159.3	167.0	151.4	155.7
胜利 1	4976	110.0	19.3	34.3	1.8	1.7	121.3	131.0	140.1	147.7	154.0	151.3	162.2
托甫 1	5490	122.0	20.5	35.1	1.8	1.5	126.9	135.7	142.5	149.2	156.4	135.7	148.4
托甫 4	5694	138.0	22.9	38.8	1.8	1.6	141.7	152.2	160.9	168.4	176.5	156.8	168.0
新垦 5	5630	133.9	22.2	37.2	1.7	1.6	138.7	148.9	155.9	163.5	170.9	148.7	155.7
牙哈 1	5340	137.9	23.6	40.8	1.8	1.7	150.0	164.1	172.6	181.5	189.9	—	161.4
牙哈 15	5942	152.6	24.3	40.7	1.7	1.7	153.7	161.9	170.5	179.3	187.8	—	163.2
牙哈 3	5909	154.0	24.7	41.4	1.7	1.7	155.0	164.0	173.0	181.9	190.7	155.0	157.6
牙哈 4**	4911	138.3	25.3	45.5	1.8	1.7	159.0	168.1	177.6	187.5	197.2	—	172.3
牙哈 5	5791	154.0	25.0	42.3	1.8	1.7	156.5	165.8	175.2	184.4	193.5	—	158.3
牙哈 7X-1	5864	153.3	24.8	41.8	1.8	1.6	154.8	163.9	173.2	182.2	191.1	—	157.4
羊塔 1	5266	107.2	18.1	31.3	1.8	1.7	115.5	—	—	—	—	—	—
羊塔 2**	5287	115.6	19.6	36.1	1.8	1.7	122.0	128.5	134.9	141.5	148.3	—	138.7
英买 1	4432	98.3	18.5	32.9	1.7	1.7	114.7	122.1	128.2	134.6	141.3	118.8	131.1
英买 10	4818	109.0	19.6	34.4	1.7	1.7	121.3	128.0	135.0	142.1	149.0	119.8	127.8
英买 101	5811	123.0	20.4	34.6	1.8	1.4	124.7	132.4	139.0	145.6	152.6	129.0	144.7
英买 2	5795	115.0	18.9	32.4	1.9	1.5	116.7	123.4	129.3	135.5	141.9	119.1	132.2
英买 201	6054	131.0	21.4	36.5	1.9	1.4	130.5	138.8	145.9	152.9	160.3	135.2	154.2
英买 23**	4641	103.6	18.9	38.7	1.8	1.7	117.7	125.1	131.5	138.4	145.1	121.9	131.4
英买 3	6233	132.0	21.1	35.8	1.9	1.4	129.8	137.4	144.2	151.3	158.7	132.5	147.5
英买 31	4107	92.2	18.2	33.2	1.7	1.7	114.0	120.8	126.9	133.3	139.9	116.4	129.9

续表 4

井号	测温深度 (m)	试油温度 (℃)	$G_{0\sim 5000}$ (℃·km ⁻¹)	q_s (mW·m ⁻²)	K_t (W·(m·K) ⁻¹)	A_t (μW·m ⁻³)	T_{6000} (℃)	T_{7000} (℃)	T_{8000} (℃)	T_{9000} (℃)	T_{10000} (℃)	T_O (℃)	T_{∞} (℃)
英买 321	5366	123.0	20.7	35.7	1.8	1.6	127.5	134.4	141.7	149.2	156.5	—	137.8
英买 322	5554	121.1	20.1	34.2	1.8	1.6	124.1	130.6	137.1	144.2	151.1	121.2	133.5
英买 35	5678	134.0	21.9	37.3	1.8	1.7	136.5	143.7	151.0	158.9	166.6	134.3	146.9
英买 37	5648	131.1	21.4	36.4	1.8	1.7	133.9	141.0	148.7	156.3	163.7	—	141.6
英买 6	5420	123.3	20.7	35.2	1.7	1.7	128.8	135.6	143.0	150.2	157.2	128.8	134.9
英买 7**	4671	106.0	19.6	38.6	1.8	1.7	121.0	127.8	134.9	142.1	149.2	118.3	127.6
玉东 1	5700	116.4	18.8	31.8	1.8	1.6	118.8	126.2	133.7	139.2	145.1	133.7	139.2
玉东 2**	5137	116.0	20.2	40.0	1.8	1.6	126.0	134.9	143.6	150.3	157.5	143.7	150.4

注: $G_{0\sim 5000}$ 为0~5000 m统一深度现今地温梯度; q_s 为大地热流; K_t 为调和热导率; A_t 为调和生热率; T_{6000} , T_{7000} , T_{8000} , T_{9000} 和 T_{10000} 分别为6000 m, 7000 m, 8000 m, 9000 m和10000 m埋深处的现今温度; T_O , T_{∞} 分别为奥陶系和寒武系底界的现今温度;**为笔者收集的已公开发表的数据(王良书等, 2005)。

表 5 塔北—阿满北部地区 23 口井的测井井底温度现今地温场计算结果

Table 5 Calculated present-day geothermal regime values of bottom-hole temperature from 23 boreholes in the Tabei—Northern Aman area

井号	测温深度 (m)	测井井底温度 (℃)	$G_{0\sim 5000}$ (℃·km ⁻¹)	q_s (mW·m ⁻²)	K_t (W·(m·K) ⁻¹)	A_t (μW·m ⁻³)	T_{6000} (℃)	T_{7000} (℃)	T_{8000} (℃)	T_{9000} (℃)	T_{10000} (℃)	T_O (℃)	T_{∞} (℃)
阿满 1	4197	86.0	16.2	29.9	1.7	1.7	103.6	111.6	118.2	124.5	129.2	124.6	135.1
草 2	5809	141.1	23.2	38.7	1.8	1.6	143.6	153.8	161.5	169.7	177.7	153.2	160.9
哈得 13	6618	142.9	22.3	38.1	2.0	1.3	137.1	146.7	156.7	165.2	172.4	161.1	172.0
鹿场 4	7652	143.6	21.0	33.5	2.0	1.3	129.3	138.3	146.3	152.2	158.0	146.2	157.9
轮东 2	6950	148.0	22.6	36.4	1.9	1.3	139.3	148.5	156.9	163.8	170.8	155.0	167.3
轮古 39	5605	118.7	19.7	33.5	1.8	1.5	122.2	130.8	137.6	143.9	150.7	132.8	142.8
热普 12	7005	148.0	22.4	36.3	1.9	1.4	138.0	148.0	157.0	164.0	170.8	158.5	168.5
沙 60	5300	122.0	20.9	36.9	1.8	1.5	133.3	141.7	149.1	157.1	164.9	137.6	148.6
沙 75	4966	116.0	20.6	36.6	1.8	1.6	127.8	136.1	143.4	151.2	158.9	132.0	142.9
沙 88	6083	131.0	21.1	36.0	1.9	1.4	130.2	138.4	145.5	153.1	160.6	134.4	145.0
沙 98	5246	112.3	19.1	34.3	1.8	1.5	119.4	128.0	135.0	141.5	148.6	129.3	141.1
玉中 1	5534	121.0	20.0	34.1	1.8	1.7	125.6	133.3	140.0	146.8	153.4	130.7	135.1
沙 99	5742	132.9	21.9	37.6	1.8	1.5	135.9	145.5	153.4	160.6	168.4	147.9	161.0
顺 8	6500	136.0	21.0	36.5	1.9	1.5	130.6	140.7	150.0	158.7	165.3	157.9	178.1
塔河 443	5292	125.0	21.5	38.5	1.8	1.5	133.2	143.5	151.2	159.6	167.8	143.0	151.5
塔河 502	5327	124.7	21.4	37.5	1.8	1.5	131.6	141.5	149.0	157.0	165.0	141.0	149.2
塔河 701	5726	126.3	20.8	36.3	1.9	1.5	128.9	138.4	145.5	153.2	160.8	138.0	145.8
塔河 704	5400	121.1	20.5	36.0	1.8	1.6	127.4	136.8	143.8	151.4	158.9	136.4	144.1
塔河 705	5500	123.1	20.7	35.4	1.8	1.5	128.2	137.3	144.1	151.5	158.8	136.9	144.4
塔河 749	5750	131.3	21.7	37.2	1.8	1.5	133.8	143.6	151.0	158.9	166.7	143.2	151.3
新和 1	6400	129.3	19.9	33.8	1.9	1.3	126.7	133.2	139.5	146.4	153.1	126.5	139.5
牙哈 10	6142	148.3	23.1	38.2	1.7	1.7	145.8	158.3	166.0	173.9	181.5	—	159.7
英买 4	4652	100.0	18.2	32.3	1.7	1.7	111.9	117.9	123.8	130.1	136.6	107.0	126.2

注: $G_{0\sim 5000}$ 为0~5000 m统一深度现今地温梯度; q_s 为大地热流; K_t 为调和热导率; A_t 为调和生热率; T_{6000} , T_{7000} , T_{8000} , T_{9000} 和 T_{10000} 分别为6000 m, 7000 m, 8000 m, 9000 m和10000 m埋深处的现今温度; T_O , T_{∞} 分别为奥陶系和寒武系底界的现今温度。

3 塔北—阿满北部地区现今地温梯度和大地热流展布特征

3.1 现今地温梯度分布特征

塔里木盆地塔北—阿满北部地区 0~5000 m 统一深度现今地温梯度介于 $16.2 \sim 25.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,平均值为 $21.0 \pm 1.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ (图 7). 轮台凸起 0~5000 m 统一深度现今地温梯度介于 $18.1 \sim 25.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,其中西部地区地温梯度较低,介于 $18.1 \sim 21.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,而东部地区高达 $25.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,与“东高西低”的基底起伏特征一致(安海亭等, 2009; 图 7). 英买力低凸起 0~5000 m 统

一深度现今地温梯度介于 $18.2 \sim 21.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,平均值为 $19.7 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$. 轮南低凸起 0~5000 m 统一深度现今地温梯度介于 $19.1 \sim 23.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,平均值为 $21.2 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,其中哈拉哈塘和塔河地区地温梯度偏低,可能与背斜翼部的构造位置和基底埋深较大有关(李日俊等, 2012; 图 7). 阿满北部地区 0~5000 m 统一深度现今地温梯度介于 $16.2 \sim 22.5 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,具有由西北向东南增大的趋势,地温梯度在临近阿瓦提凹陷的区域偏低(图 7). 总体上,塔北—阿满北部地区东部 0~5000 m 统一深度现今地温梯度高于西部地区,塔北隆起地温梯度由北向南降低,与下伏基底起伏一致,而阿满北部地区地温梯度由北向南升高,与下伏基底起伏相反(图 7).

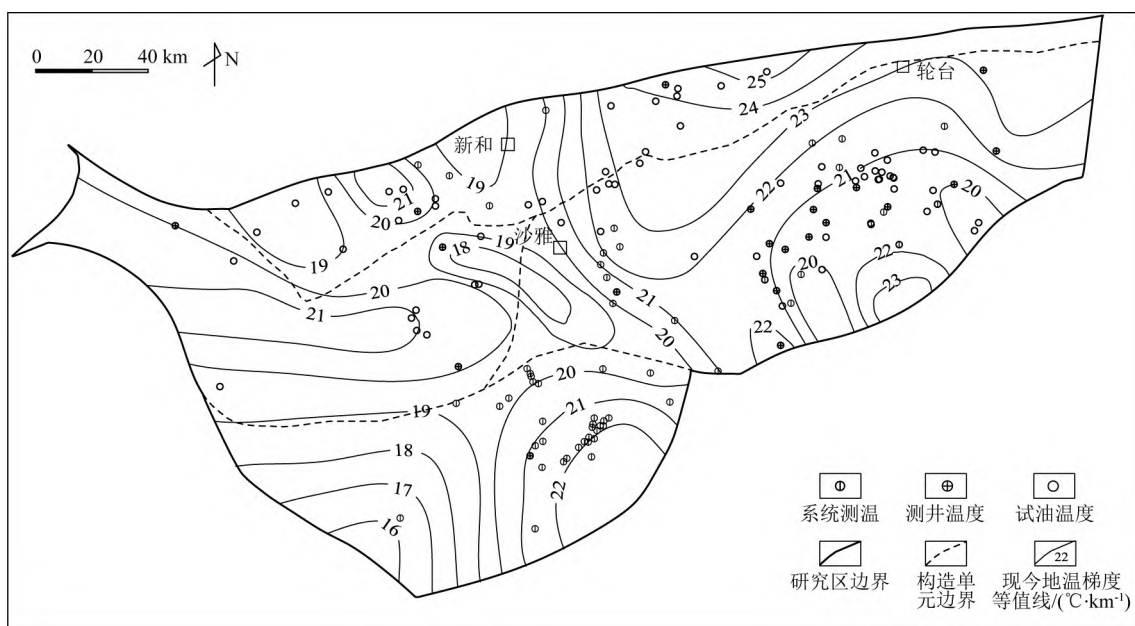


图 7 塔北—阿满北部地区 0~5000 m 统一深度现今地温梯度平面分布图

Fig. 7 Plane distribution map of present-day geothermal gradients at a unified depth of 0~5000 m in the Tabei—Northern Aman area

3.2 现今大地热流分布特征

塔里木盆地塔北—阿满北部地区现今大地热流介于 $27.4 \sim 44.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,平均值为 $35.4 \pm 2.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8). 塔北—阿满北部地区东部大地热流高于西部地区,如轮台凸起东部的大地热流高达 $44.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,西部的英买力低凸起降至 $34.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (图 8). 此外,塔北隆起的大地热流由北部 ($36.1 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$) 向南部地区降低 ($34.0 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$),体现了基底起伏和岩性横向差异引起的热折射效应对大地热流的影响(图 8). 而阿满北部地区大地热流由西北向东南方向增大,可能受到了岩石热物性参数差异的一定影响(图 8).

4 塔北—阿满北部地区超深层温度展布特征

4.1 6000~10000 m 埋深现今温度分布特征

塔里木盆地塔北—阿满北部地区 6000 m 埋深处现今温度介于 $103.6 \sim 159.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 $131.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 9a). 塔北—阿满北部地区西部 6000 m 埋深处现今温度相对较低,介于 $103.6 \sim 121.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间,向东部地区温度增大至 $143.6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (图 9a). 塔北隆起内 6000 m 埋深处现今温度由北向南降低,如北部的轮台凸起现今温度平均为 $134.7 \text{ }^{\circ}\text{C}$,到南部

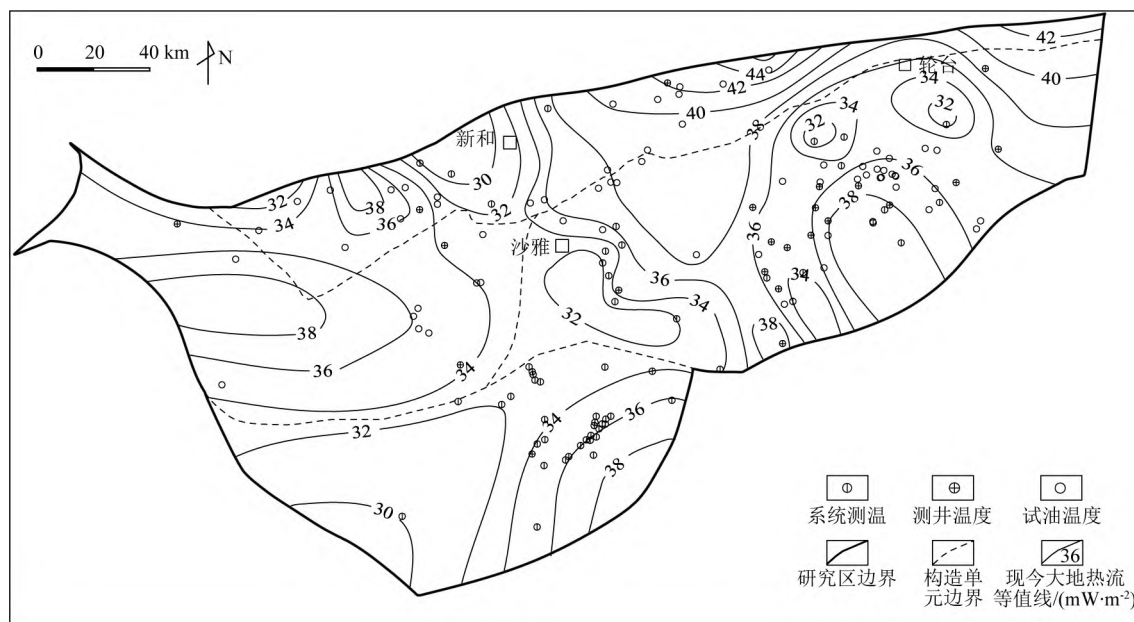


图8 塔北—阿满北部地区现今大地热流平面分布图

Fig. 8 Plane distribution map of present-day heat flow values in the Tabei—Northern Aman area

英买力低凸起降至 121.4°C ,与大地热流和地温梯度分布规律一致,体现了基底起伏和热折射效应对现今地温场的控制作用.而阿满北部地区相反,其南部现今温度($\sim 140^{\circ}\text{C}$)高于北部地区($100\sim 120^{\circ}\text{C}$)(图 9a).7000~10000 m 埋深现今温度与 6000 m 埋深具有相似的分布规律,并且温度随埋深增加而逐渐增大(图 9).7000 m 埋深处温度介于 $111.6\sim 168.1^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 141.5°C ,8000 m 埋深处温度介于 $118.2\sim 177.6^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 149.4°C ,9000 m 埋深处温度介于 $124.5\sim 187.5^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 156.7°C ,10000 m 埋深处温度介于 $129.2\sim 197.2^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 163.6°C (图 9b—e).

4.2 下古生界重要层系界面现今温度分布特征

本文计算得到塔北—阿满北部地区奥陶系底界面现今温度介于 $107.0\sim 171.0^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 145.1°C (图 10a).奥陶系底界面埋深浅的英买力凸起温度偏低($110.0\sim 135.0^{\circ}\text{C}$),而埋深大的东南部地区温度偏高($>150^{\circ}\text{C}$),体现了层系界面埋深横向差异性对现今温度的影响作用(图 10a).然而,阿满过渡带西部地区临近阿瓦提凹陷,该区域奥陶系底界面埋深较大,但现今温度却很低($<120.0^{\circ}\text{C}$),这是由大地热流偏低造成的.寒武系底界面温度介于 $120.8\sim 184.7^{\circ}\text{C}$ 之间,平均值为 155.9°C ,与奥陶系底界面现今温度空间展布特征相似,仅在温度变化幅度方面存在差异(图 10b).寒武系底界面现今温度的低温区集中在英买力低凸起北部和阿满过

渡带西部地区($<145.0^{\circ}\text{C}$),高温区集中在阿满过渡带东南部地区,最高温度超过 195.0°C (图 10b).总体而言,下古生界重要层系界面现今温度与埋藏深度和大地热流有关,即埋藏深度大、大地热流高的层系界面现今温度较高.

5 讨论

5.1 塔北—阿满北部地区超深层现今地温场影响因素

沉积盆地现今地温场往往受到深部和浅部因素的共同影响,深部因素包括区域地质构造和地壳结构,浅部因素包含岩石热物性参数、地下水活动、断裂活动和火山活动等.本研究认为塔北—阿满北部地区现今地温场分布规律与岩石圈热结构、基底起伏和岩石热物性参数有关.

塔里木盆地现今大地热流平均值为 $43\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$ (刘绍文等, 2017a),低于中国东部琼东南盆地($75\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$; 甘军等, 2019)、渤海湾盆地($59\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$; 常健等, 2016)和查干凹陷($68.3\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$; Zuo et al., 2020),而与西部准噶尔盆地($42.5\text{ mW}\cdot\text{m}^{-2}$; 饶松等, 2013)相近,同属于“冷”盆.中国东部中生代以来受滨太平洋构造域的影响发育裂陷盆地(靳久强和宋建国, 2005),尤其在新生代以来岩浆活动频繁(钟志洪等, 2004; 左银辉等, 2013),深部热物质沿深大断裂上传导致大地热流较高;而西部塔里木

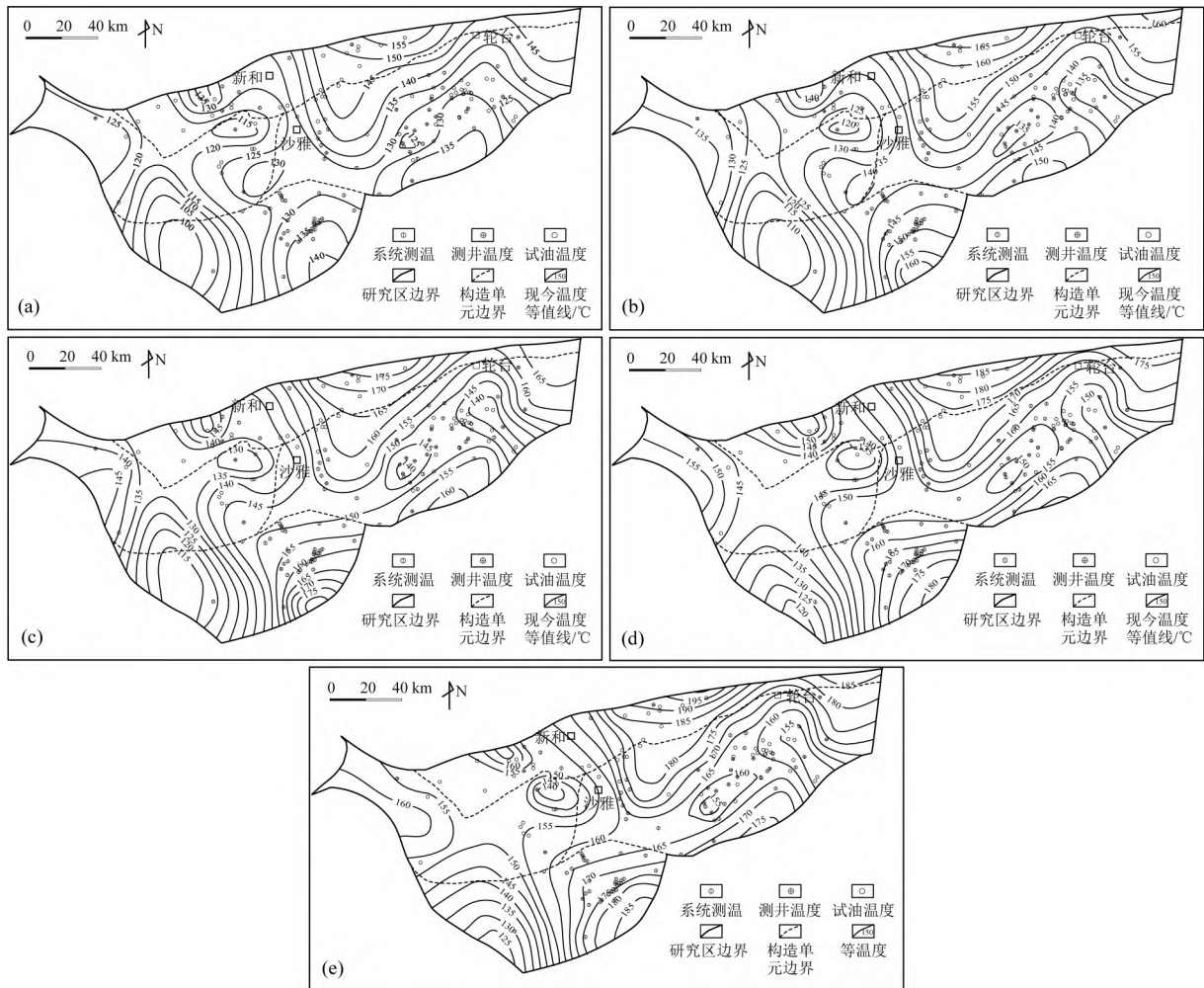


图9 塔北—阿满北部地区 6000 m (a)、7000 m (b)、8000 m (c)、9000 m (d)和 10000 m (e)埋深处现今温度平面分布图

Fig. 9 Distribution of the present-day temperatures at the depths of 6000 m (a), 7000 m (b), 8000 m (c), 9000 m (d) and 10000 m (e) in the Tabei—Northern Aman area

盆地相对稳定,新生代以来未遭受强烈的构造活动,热岩石圈厚度由 130 km 增加至 190 km,大地热流逐渐降低(邱楠生等, 2015; 曹厚臻等, 2019). 本文利用“回剥”法:

$$q_m = q_s - q_c = q_s - \sum A_i D_i \quad (5)$$

计算得到塔北—阿满北部地区的地壳热流为 $18.8 \sim 24.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,地幔热流为 $11.3 \sim 21.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,表现出典型的“冷壳热幔”热结构特征. 这说明研究区相对稳定,大地热流的变化与地壳热流关系更大,与前人对塔里木盆地的研究认识一致(邱楠生等, 2015; 刘绍文等, 2017a). 式(5)中, q_c , q_m 和 q_s 分别为地壳、地幔和地表热流($\text{mW} \cdot \text{m}^{-2}$); A_i 为第 i 层的放射性生热率($\mu\text{W} \cdot \text{m}^{-3}$); D_i 为第 i 层的厚度(km).

塔里木盆地现今地温场整体表现为隆起区高而坳陷区低,这与基底起伏有关(冯昌格等, 2009; 刘绍文等, 2017a). 作为构造隆起区,塔北隆起的轮探

1 井 0~5000 m 统一深度现今地温梯度约为 $22.0 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$;而位于阿满北部地区(坳陷区)的顺北 7 井 0~5000 m 统一深度现今地温梯度仅为 $19.3 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ (表 3). 这表明基底埋深越大,现今地温梯度越小. 所以,塔北隆起现今地温梯度整体上高于阿满北部地区. 另外,由于塔北—阿满北部地区基底埋深由北向南逐渐增大(程海艳等, 2009; 吴鲜等, 2022),塔北隆起现今地温场表现为由北向南降低. 这说明塔北隆起现今地温场的横向展布特征受到了基底起伏的控制作用(图 7—9).

除深部的控制因素外,浅部的影响因素对现今地温场也至关重要. 塔里木盆地岩石热导率具有分层性,浅部的碎屑岩热导率较低介于 $0.52 \sim 4.40 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 之间,而深部的碳酸盐岩热导率较高介于 $1.11 \sim 4.78 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 之间(表 2). 由于岩石热导率高的岩层传热性能好,导致塔北—阿满北部地区地温梯度会随着深度增加而减小(图 9,

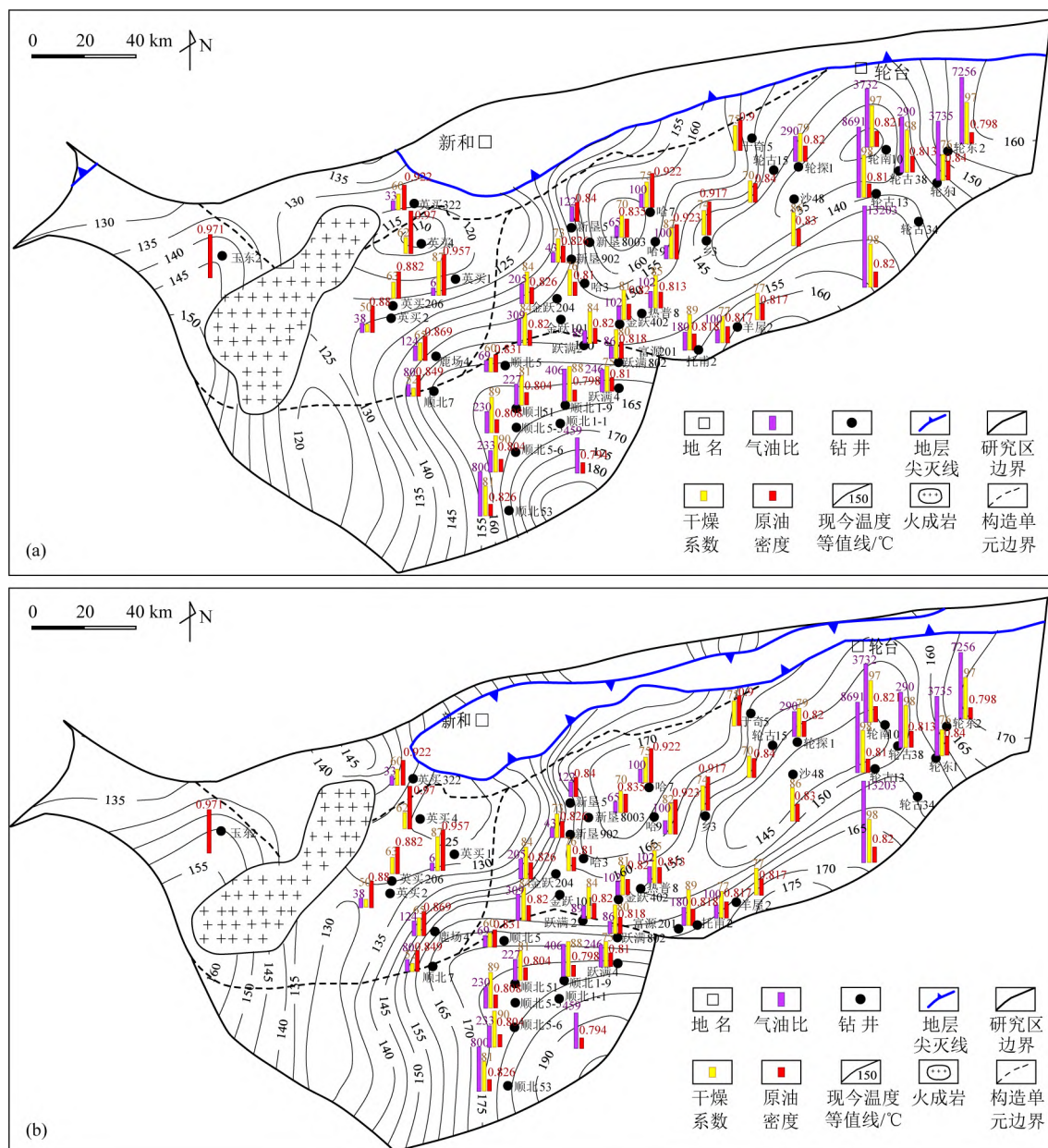


图 10 塔北—阿满北部地区下古生界奥陶系底界面(a)和寒武系底界面(b)现今温度与油气地球化学性质平面分布图

Fig. 10 Distribution of the present-day temperatures and oil-gas geochemical characteristics of Lower Paleozoic Ordovician bottom interface (a) and Cambrian bottom interface (b) in the Tabei—Northern Aman area

11). 此外,塔北隆起的轮探 1 井底部钻遇寒武系膏盐岩,而塔里木盆地膏盐岩的岩石热导率高达 $3.20 \sim 5.12 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$,使盐下地温梯度明显降低(图 11; 刘绍文等, 2017b). 但受完钻深度影响,顺北 7 井未钻遇寒武系膏盐岩,暂时无法对该层段测温. 前人综合野外、地震和钻井资料揭示出台盆地西部的寒武系膏盐岩厚度大于东部地区(樊奇等, 2021). 膏盐岩的横向分布差异造成了塔北—阿满北部地区西部的盐下地层降温更明显(图 9).

前人通过测量比斯开大陆边缘的大地热流,揭示出断层附近产生热对流会造成局部低温(Foucher

and Sibuet, 1980);而对川西高原断裂带的数值模拟表明剪切摩擦产生的大地热流可达 $5 \sim 50 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (Ai et al., 2021). 然而,早期断裂活动产生的热异常难以延续至今,仅晚期断裂活动对现今地温场影响较大. 李宗星等(2016)探讨了柴达木盆地断裂活动对温度的影响,揭示出中新世以来的断裂活动对现今地温场影响很大. 塔北—阿满北部地区断裂活动均发生在白垩纪之前,断裂附近温度无异常变化,因此这些断裂对现今地温场影响不大(图 9; 赵岩等, 2012; 邓尚等, 2018). 断裂活动对古温度及油气成藏可能会造成一定程度的影响,其影响机理及程度

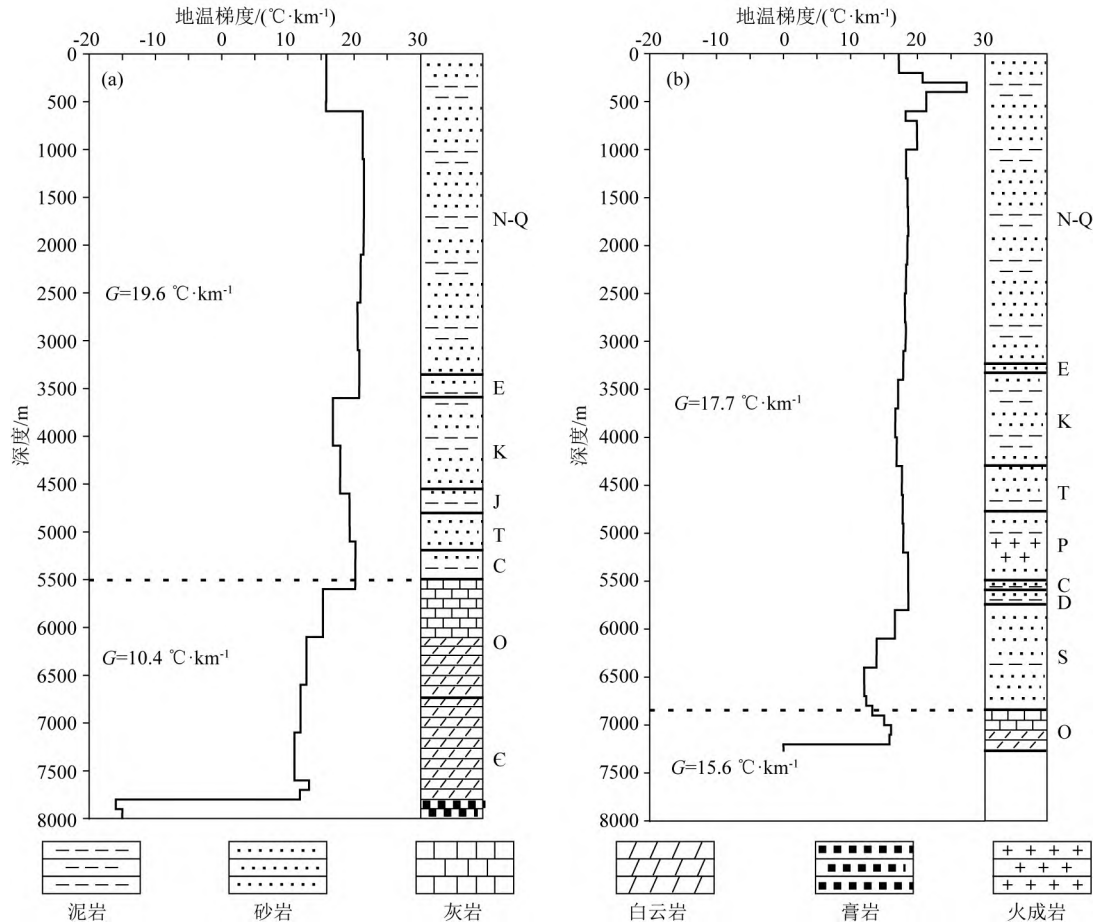


图 11 塔北—阿满北部地区轮探 1 井(a)和顺北 7 井(b)地温梯度-深度剖面图

Fig. 11 Correlation of the geothermal gradient and the depths of the wells LT1 (a) and SHB7 (b) in the Tabei—Northern Aman area

有待于进一步研究。

岩浆活动的时间越晚,岩体规模越大,对现今地温场的影响就越强烈。如南海地区岩浆活动以燕山期和喜马拉雅期为主且分布范围较广,其周缘的琼东南盆地现今大地热流高达 $75 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ (甘军等, 2019; 祝嵩等, 2021)。塔里木作为稳定的克拉通盆地,仅在二叠纪出现大范围的岩浆活动,分布范围只涉及到塔北—阿满北部地区的西部(杨树锋等, 2014; 李佳蔚等, 2016)。由于热事件发生时间比较久远($300 \sim 275 \text{ Ma}$),无法对塔北—阿满北部地区现今地温场造成影响。

5.2 现今地温场与油气地球化学性质关系

地层温度控制着深层、超深层油气生成、保存和相态分布。塔北—阿满北部地区的下寒武统玉尔吐斯组烃源岩在英买力部分地区、哈拉哈塘和塔河地区地层温度普遍低于 150°C ,与研究区碳酸盐岩油藏分布一致(图 10b; 杨学文等, 2021)。此外,塔北—阿满北部地区超深层油气藏具有大

埋深($>6000 \text{ m}$)、低热流($35.4 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$)和高压($>60 \text{ MPa}$)的特点,可有效抑制烃源岩生烃演化,使玉尔吐斯组烃源岩至今仍可能提供液态烃(吴鲜等, 2022)。Zhou 等(2021)依据生物标志物、金刚烷浓度等也验证了这一观点。塔北—阿满北部地区奥陶系底界面现今温度介于 $107.0 \sim 171.0^\circ\text{C}$ 之间,平均值为 145.1°C ,现今地层温度绝大部分低于 150°C ,表明其上部储层普遍利于液态烃的保存(图 10a)。然而同为“冷”盆的四川盆地超深层却以气藏为主,这主要与温压场和构造演化过程有关。塔里木盆地现今大地热流为 $43 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,现今地温梯度为 $20.7^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$, 10000 m 埋深处现今地层温度为 $120 \sim 280^\circ\text{C}$,未超过油藏赋存温度;而四川盆地现今地温场普遍偏高,现今大地热流、地温梯度和 10000 m 埋深处现今地层温度分别为 $53 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $22.7^\circ\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 和 $180 \sim 330^\circ\text{C}$,已发生原油裂解(徐明等, 2011; 刘绍文等, 2017a; Qiu et al., 2022)。Qiu 等(2022)利用古温标法对比分析了四川盆地和

塔里木盆地超深层下寒武统烃源岩的温压演化特征,其中塔里木盆地经历了早期快速加热—晚期缓慢持续加热过程,现今达到最高温度,压力整体表现为常压状态;而四川盆地更为复杂,经历了快速加热—加热停滞—快速加热—降温和常压—弱超压/强超压—卸压过程,从而造成了塔里木盆地相比于四川盆地生油高峰持续时间更长。此外,中生代构造演化差异性导致四川盆地后期改造较强,主要发育改造或者调整型气藏,而塔里木盆地以原生油藏为主(孙冬胜等, 2022)。

塔北—阿满北部地区油气藏类型丰富,以满加尔坳陷为环带呈现“外油内气”的展布特征(邓尚等, 2018)。本研究收集整理了塔北—阿满北部地区大量的油气地球化学性质数据。塔北—阿满北部地区奥陶系原油密度由西北($0.971 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)向东南($0.794 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)方向降低,与下古生界奥陶系和寒武系底界面现今温度具有明显的负相关性(图 10)。推测这可能是由于塔北—阿满北部地区东南部的烃源岩在高温条件下产生更多轻烃组分,从而造成原油密度降低。奥陶系气油比和天然气干燥系数分布特征与原油密度相反,如塔北隆起北部的干燥系数和气油比(60% 和 $33 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)向南部地区增大(81% 和 $800 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$),西部的英买力低凸起(50% 和 $38 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)向东部的轮南低凸起(98% 和 $13203 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)增大,与层系界面温度呈正相关性(图 10)。这是由于高温促使烃源岩成熟演化,产生更多以甲烷为主的天然气,从而造成了天然气干燥系数和气油比增大。

6 结论

(1) 塔北—阿满北部地区 $0 \sim 5000 \text{ m}$ 统一深度现今地温梯度介于 $16.2 \sim 25.3 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$ 之间,平均值为 $21.0 \pm 1.4 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{km}^{-1}$,现今大地热流介于 $27.4 \sim 44.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 之间,平均值为 $35.4 \pm 2.5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$,整体表现为“冷”的热背景。

(2) 塔北—阿满北部地区 $6000 \sim 10000 \text{ m}$ 埋深处现今温度随埋深增加而增大,均表现出由北向南先减小再增大,由东向西逐渐减小的特征。下古生界奥陶系和寒武系底界面现今温度受埋深影响表现为由西北向东南增大的特征。

(3) 塔北—阿满北部地区具有“冷壳热幔”热结构,且其热岩石圈厚度达 $172 \sim 249 \text{ km}$ 。塔北隆起现今高温区集中在基底高、膏盐岩沉积较薄的西南部地

区;而阿满北部地区仅受岩石热物性影响,现今地温表现出西北低东南高的特征。

(4) 塔北—阿满北部地区奥陶系原油密度由西北向东南逐渐减小,与奥陶系储层和寒武系烃源岩温度呈负相关性;而气油比和天然气干燥系数由西北向东南逐渐增大,与地层温度呈正相关性。

References

- Ai Y F, Zhang J, Dong M, et al. 2021. Heat generation effects from shear friction along Xianshui river strike-slip fault in western Sichuan, China. *Geothermics*, 89: 101936, doi: 10.1016/j.geothermics.2020.101936.
- An H T, Li H Y, Wang J Z, et al. 2009. Tectonic evolution and its controlling on oil and gas accumulation in the northern Tarim Basin. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 33(1): 142-147, doi: 10.3969/j.issn.1001-1552.2009.01.019.
- Cao H Z, He L J, Zhang L Y. 2019. Inversion of background thermal history since the Formation of the Tarim Craton. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 62(1): 236-247, doi: 10.6038/cjg2019L0802.
- Chang J, Qiu N G, Zhao X Z, et al. 2016. Present-day geothermal regime of the Jizhong Depression in Bohai Bay Basin, East China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(3): 1003-1016, doi: 10.6038/cjg20160322.
- Chapman D S, Keho T H, Bauer M S, et al. 1984. Heat flow in the Uinta Basin determined from bottom hole temperature (BHT) data. *Geophysics*, 49(4): 453-466, doi: 10.1190/1.1441680.
- Chen J J, He D F, Sun F Y, et al. 2021. Framework evolution of North Tarim Paleo-uplift from the Late Ordovician to Middle Devonian. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 42(2): 285-298, doi: 10.11743/ogg20210203.
- Chen X Y, Zhu X X, Cao Z C, et al. 2017. Distribution characteristics and origin of Ordovician oil and gas reservoirs in Shuntuoguole region and its periphery. *Xinjiang Geology* (in Chinese), 35(1): 74-78, doi: 10.3969/j.issn.1000-8845.2017.01.012.
- Cheng H Y, Li J H, Zhao X. 2009. Paleozoic structural styles and evolution of the North Tarim Uplift. *Geology in China* (in Chinese), 36(2): 314-321, doi: 10.3969/j.issn.1000-3657.2009.02.005.
- Deng S, Li H L, Zhang Z P, et al. 2018. Characteristics of differential activities in major strike-slip fault zones and their control on hydrocarbon enrichment in Shunbei area and its surroundings, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 39(5): 878-888, doi: 10.11743/ogg20180503.
- Fan Q, Fan T L, Li Q P, et al. 2021. Sedimentary characteristics and development model of Cambrian gypsum-salt rocks, Tarim Basin. *Petroleum Geology & Experiment* (in Chinese), 43(2): 217-226, doi: 10.11781/sysydz202102217.
- Feng C G, Liu S W, Wang L S, et al. 2009. Present-day geothermal regime in Tarim Basin, northwest China. *Chinese Journal of*

- Geophysics* (in Chinese), 52(11): 2752-2762, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.010.
- Foucher J P, Sibuet J C. 1980. Thermal regime of the northern bay of biscay continental margin in the vicinity of DSDP sites 400 to 402. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 294(1409): 157-167, doi: 10.1098/rsta.1980.0022.
- Gan J, Wu D, Zhang Y C, et al. 2019. Distribution pattern of present-day Formation temperature in the Qiongdongnan Basin: Implications for hydrocarbon generation and preservation. *Geological Journal of China Universities* (in Chinese), 25(6): 952-960, doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2019053.
- Han Q, Yun L, Jiang H S, et al. 2021. Marine oil and gas filling and accumulation process in the north of Shuntuoguole area in northern Tarim Basin. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)* (in Chinese), 51(3): 645-658, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200141.
- He D F, Ma Y S, Liu B, et al. 2019. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous Basins in China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 26(1): 1-12, doi: 10.13745/j.esf.sf.2019.1.20.
- Jiao F Z. 2018. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 39(2): 207-216, doi: 10.11743/ogg20180201.
- Jin J Q, Song J G. 2005. Control of plate tectonics over evolution of petroliferous Basins and characteristic of oil and gas distribution in China. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 26(1): 2-8, 22, doi: 10.3321/j.issn:0253-9985.2005.01.002.
- Li H H, Cao Y H, Chen Z Y, et al. 2020. The faults and deep petroleum exploration in the Lunnan Lower uplift of the Tabei rise, Tarim Basin. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 31(12): 1677-1686, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.07.006.
- Li J W, Li Z, Qiu N S, et al. 2016. Carboniferous-Permian abnormal thermal evolution of the Tarim Basin and its implication for deep structure and magmatic activity. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 59(9): 3318-3329, doi: 10.6038/cjg20160916.
- Li M, Tang L J, Qi L X, et al. 2015. Differential tectonic evolution and its controlling on hydrocarbon accumulation in the south slope of Tabei Uplift. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 26(2): 218-228, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2015.02.0218.
- Li Y J, Yang H J, Zhang G Y, et al. 2012. Redivision of the tectonic units of Tabei Rise in Tarim Basin, NW China. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 28(8): 2466-2478.
- Li Z X, Gao J, Li W F, et al. 2016. The characteristics of geothermal field and controlling factors in Qaidam Basin, Northwest China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 23(5): 23-32, doi: 10.13745/j.esf.2016.05.003.
- Lin Y, Li X W, Chen K, et al. 2021. Key seismic techniques for predicting deep marine carbonate reservoirs and the effect analysis: a case study on the Sinian-Cambrian reservoirs in the Sichuan Basin and the Ordovician reservoirs in the Tarim Basin. *Oil & Gas Geology* (in Chinese), 42(3): 717-727, doi: 10.11743/ogg20210316.
- Liu L F. 2006. Study on petroleum accumulation systems in Tabei Uplift [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: China University of Geosciences (Beijing).
- Liu S G, Li Z Q, Deng B, et al. 2021. Occurrence morphology of bitumen in Dengying Formation deep and ultra-deep carbonate reservoirs of the Sichuan Basin and its indicating significance to oil and gas reservoirs. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 41(8): 102-112, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.010.
- Liu S W, Feng C G, Wang L S, et al. 2011. Measurement and analysis of thermal conductivity of rocks in the Tarim Basin, northwest China. *Acta Geologica Sinica-English Edition*, 85(3): 598-609, doi: 10.1111/j.1755-6724.2011.00454.x.
- Liu S W, Lei X, Feng C G, et al. 2016. Estimation of subsurface Formation temperature in the Tarim Basin, Northwest China: implications for hydrocarbon generation and preservation. *International Journal of Earth Sciences*, 105(5): 1329-1351, doi: 10.1007/s00531-015-1253-4.
- Liu S W, Li X L, Hao C Y, et al. 2017a. Heat flow, deep Formation temperature and thermal structure of the Tarim Basin, Northwest China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 24(3): 41-55, doi: 10.13745/j.esf.2017.03.004.
- Liu S W, Yang X Q, Qiu N S, et al. 2017b. Geothermal effects of salt structures on marine sedimentary Basins and implications for hydrocarbon thermal evolution. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 62(15): 1631-1644, doi: 10.1360/N972017-00076.
- Liu Y C, Qiu N S, Li H L, et al. 2020. Terrestrial heat flow and crustal thermal structure in the northern slope of Tazhong uplift in Tarim Basin. *Geothermics*, 83: 101709, doi: 10.1016/j.geothermics.2019.101709.
- Lü H T, Zhang S N, Ma Q Y. 2017. Classification and Formation mechanism of fault systems in the central and northern Tarim Basin. *Petroleum Geology and Experiment* (in Chinese), 39(4): 444-452, doi: 10.11781/sysydz201704444.
- Lü X X, Zhou X Y, Li J J, et al. 2007. Hydrocarbon accumulation characteristics of the Carbonate rock in the northern Uplift of the Tarim Basin. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 81(8): 1057-1064, doi: 10.3321/j.issn:0001-5717.2007.08.005.
- Luo X, Zhu C Q, Zhang B S, et al. 2020. Heat production rate calculation using gamma-ray logging of the sedimentary Formation in the Tarim Basin, Northwest China. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 94(7): 2078-2088, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020219.
- Ma D B, Cui W J, Tao X W, et al. 2020. Structural characteristics and evolution process of faults in the Lunnan low uplift, Tabei Uplift in the Tarim Basin, NW China. *Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 31(5): 647-657, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.04.014.
- Meng X X, Wang H B, Yao Q Z, et al. 2015. Tectonic evolution characteristics of Tabei Uplift and its controlling effect on the reservoir and hydrocarbon accumulation of Ordovician carbonate.

- Natural Gas Geoscience* (in Chinese), 26(S1): 109-120, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2015.S1.0109.
- Qiu N S, Chang J, Zhu C Q, et al. 2022. Thermal regime of sedimentary Basins in the Tarim, Upper Yangtze and North China Cratons, China. *Earth-Science Reviews*, 224: 103884, doi: 10.1016/j.earscirev.2021.103884.
- Qiu N S, Wang X L, Yang H B. 2001. The characteristics of temperature distribution in the Junggar Basin. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 36(3): 350-358, doi: 10.3321/j.issn:0563-5020.2001.03.010.
- Qiu N S, Zuo Y H, Chang J, et al. 2015. Characteristics of Mesozoic thermal regimes in typical eastern and western sedimentary Basins of China. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 22(1): 157-168, doi: 10.13745/j.esf.2015.01.013.
- Qiu N S. 2002. Characters of thermal conductivity and radiogenic heat production rate in Basins of Northwest China. *Chinese Journal of Geology* (in Chinese), 37(2): 196-206, doi: 10.3321/j.issn:0563-5020.2002.02.007.
- Rao S, Hu S B, Zhu C Q, et al. 2013. The characteristics of heat flow and lithospheric thermal structure in Junggar Basin, northwest China. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 56(8): 2760-2770, doi: 10.6038/cjg20130824.
- Ren Z L, Cui J P, Qi K, et al. 2020. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history. *Natural Gas Industry* (in Chinese), 40(2): 22-30, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.003.
- Sobel E R, Dumitru T A. 1997. Thrusting and exhumation around the margins of the western Tarim Basin during the India-Asia collision. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 102(B3): 5043-5063, doi: 10.1029/96JB03267.
- Sun D S, Li S J, Li J J, et al. 2022. Insights from a comparison of hydrocarbon accumulation conditions of Sinian-Cambrian between the Tarim and the Sichuan Basins. *Acta Geologica Sinica*, 96(1): 249-264, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022274.
- Tian J, Wang Q H, Yang H J, et al. 2021a. Petroleum exploration history and enlightenment in Tarim Basin. *Xinjiang Petroleum Geology* (in Chinese), 42(3): 272-282, doi: 10.7657/XJPG20210303.
- Tian J, Yang H J, Zhu Y F, et al. 2021b. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman oilfield, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 42(8): 971-985, doi: 10.7623/syxb202108001.
- Wang B Q, Huang Z B, Ma P L, et al. 2009. Establishment of division standard, evidence and principle of structural units in Tarim Basin. *Geotectonica et Metallogenia* (in Chinese), 33(1): 86-93, doi: 10.3969/j.issn.1001-1552.2009.01.011.
- Wang J, Wang J A, Shen J Y, et al. 1995. Heat flow in Tarim Basin. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* (in Chinese), 20(4): 399-404.
- 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* (in Chinese), 32(4): 79-83, doi: 10.3321/j.issn:1000-0747.2005.04.013.
- Wang L S, Li C, Shi Y S. 1995. Distribution of terrestrial heat flow density in Tarim Basin, western China. *Acta Geophysica Sinica* (in Chinese), 38(6): 855-856.
- Wang S J, Hu S B, Wang J Y. 1999. The Geothermal effect of radioactive heat generation and its significance to hydrocarbon maturation in Tarim Basin. *Petroleum Exploration and Development* (in Chinese), 26(5): 36-38.
- Wei D W. 1992. Terrestrial heat flow on the northern side of Tarim Basin. *Scientia Geologica Sinica* (in Chinese), (1): 93-96.
- Wu X, Li D, Han J, et al. Characteristics of present ultra-deep geothermal field in the northern Shuntuoguole low uplift, Tarim Basin. *Acta Petrolei Sinica* (in Chinese), 43(1): 29-40.
- Xu M, Zhu C Q, Tian Y T, et al. 2011. Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin. *Chinese Journal of Geophysics* (in Chinese), 54(4): 1052-1060, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.020.
- Xu Z Q, Li S T, Zhang J X, et al. 2011. Paleo-Asian and Tethyan tectonic systems with docking the Tarim block. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 27(1): 1-22.
- Yang H J, Chen Y Q, Tian J, et al. 2020. An important discovery in Well Luntan-1 of the Tarim Basin, China, and its significance for ultra-deep oil and gas exploration. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 25(2): 62-72, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2020.02.007.
- Yang S F, Chen H L, Li Z L, et al. 2013. Early Permian Tarim large igneous province in northwest China. *Science China Earth Sciences*, 56(12): 2015-2026, doi: 10.1007/s11430-013-4653-y.
- Yang X W, Tian J, Wang Q H, et al. 2021. Geological understanding and favorable exploration fields of ultra-deep Formations in Tarim Basin. *China Petroleum Exploration* (in Chinese), 26(4): 17-28, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.04.002.
- Yu S, Chen W, Evans N J, et al. 2014. Cenozoic uplift, exhumation and deformation in the north Kuqa Depression, China as constrained by (U-Th)/He thermochronometry. *Tectonophysics*, 630: 166-182, doi: 10.1016/j.tecto.2014.05.021.
- Zhang P, Hou G T, Pan W Q, et al. 2013. Research on the effectiveness of fractures in Sinian-Cambrian dolomite reservoir in Tarim Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis* (in Chinese), 49(6): 993-1001, doi: 10.13209/j.0479-8023.2013.132.
- Zhao Y, Li Y J, Sun L D, et al. 2012. Mesozoic-Cenozoic extensional structure in North Uplift of Tarim Basin and its genetic discussion. *Acta Petrologica Sinica* (in Chinese), 28(8): 2557-2568.
- Zhong Z H, Wang L S, Li X X, et al. 2004. The Paleogene Basin-filling evolution of Qiongdongnan Basin and its relation with seafloor spreading of the South China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 24(1): 29-36, doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2004.01.004.
- Zhou C X, Yu S, Huang W Y, et al. 2021. Oil maturities, mixing

- and charging episodes in the cratonic regions of the Tarim Basin, NW China: Insight from biomarker and diamondoid concentrations and oil bulk properties. *Marine and Petroleum Geology*, 126: 104903, doi: 10.1016/J. MARPETGEO. 2021. 104903.
- Zhu J Q, Wu S Q, Wang G X, et al. 2008. Types and porosity characteristics of the Cambrian Ordovician dolostones in Tarim Basin. *Earth Science Frontiers* (in Chinese), 15(2): 67-79.
- Zhu S, Yao Y J, Li X J. 2021. Spatio-temporal distribution pattern of magmatic rocks and mechanism in the South China Sea and adjacent areas. *Marine Geology & Quaternary Geology* (in Chinese), 41(4): 87-115, doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020052001.
- Zuo Y H, Jiang S, Wu S H, et al. 2020. Terrestrial heat flow and lithospheric thermal structure in the Chagan Depression of the Yingen-Ejinaqi Basin, north central China. *Basin Research*, 32(6): 1328-1346, doi: 10.1111/bre.12430.
- Zuo Y H, Qiu N S, Chang J, et al. 2013. Meso-Cenozoic lithospheric thermal structure in the Bohai Bay Basin. *Acta Geologica Sinica* (in Chinese), 87(2): 145-153, doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2013.02.001.
- ### 附中文参考文献
- 安海亭, 李海银, 王建忠等. 2009. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制. *大地构造与成矿学*, 33(1): 142-147, doi: 10.3969/j.issn.1001-1552.2009.01.019.
- 曹厚臻, 何丽娟, 张林友. 2019. 塔里木克拉通形成以来的背景地质研究. *地球物理学报*, 62(1): 236-247, doi: 10.6038/cjg2019L0802.
- 常健, 邱楠生, 赵贤正等. 2016. 渤海湾盆地冀中坳陷现今地热特征. *地球物理学报*, 59(3): 1003-1016, doi: 10.6038/cjg20160322.
- 陈横俊, 何登发, 孙方源等. 2021. 塔北隆起晚奥陶世-中泥盆世古隆起格局演变. *石油与天然气地质*, 42(2): 285-298, doi: 10.11743/ogg20210203.
- 陈绪云, 朱秀香, 曹自成等. 2017. 顺托果勒地区及周缘奥陶系油气藏分布特征与成因浅析. *新疆地质*, 35(1): 74-78, doi: 10.3969/j.issn.1000-8845.2017.01.012.
- 程海艳, 李江海, 赵星. 2009. 塔北隆起古生代构造样式和构造反演. *中国地质*, 36(2): 314-321, doi: 10.3969/j.issn.1000-3657.2009.02.005.
- 邓尚, 李慧莉, 张仲培等. 2018. 塔里木盆地顺北及邻区主干走滑断裂带差异活动特征及其与油气富集的关系. *石油与天然气地质*, 39(5): 878-888, doi: 10.11743/ogg20180503.
- 樊奇, 樊太亮, 李清平等. 2021. 塔里木盆地寒武系膏盐岩沉积特征与发育模式. *石油实验地质*, 43(2): 217-226, doi: 10.11781/sysydz202102217.
- 冯昌格, 刘绍文, 王良书等. 2009. 塔里木盆地现今地热特征. *地球物理学报*, 52(11): 2752-2762, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2009.11.010.
- 甘军, 吴迪, 张迎朝等. 2019. 琼东南盆地现今地层温度分布特征及油气地质意义. *高校地质学报*, 25(6): 952-960, doi: 10.16108/j.issn1006-7493.2019053.
- 韩强, 云露, 蒋华山等. 2021. 塔里木盆地顺北地区奥陶系油气充注过程分析. *吉林大学学报(地球科学版)*, 51(3): 645-658, doi: 10.13278/j.cnki.jjuese.20200141.
- 何登发, 马永生, 刘波等. 2019. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题. *地学前缘*, 26(1): 1-12, doi: 10.13745/j.esf.sf.2019.1.20.
- 焦方正. 2018. 塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景. *石油与天然气地质*, 39(2): 207-216, doi: 10.11743/ogg20180201.
- 靳久强, 宋建国. 2005. 中国板块构造对油气盆地演化 and 油气分布特征的控制. *石油与天然气地质*, 26(1): 2-8, 22, doi: 10.3321/j.issn.0253-9985.2005.01.002.
- 李洪辉, 曹颖辉, 陈志勇等. 2020. 塔里木盆地塔北隆起轮南低凸起断裂与深层油气勘探. *天然气地球科学*, 31(12): 1677-1686, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.07.006.
- 李佳蔚, 李忠, 邱楠生等. 2016. 塔里木盆地石炭-二叠纪异常热演化及其对深部构造-岩浆活动的指示. *地球物理学报*, 59(9): 3318-3329, doi: 10.6038/cjg20160916.
- 李萌, 汤良杰, 漆立新等. 2015. 塔北隆起南坡差异构造演化及其对油气成藏的控制. *天然气地球科学*, 26(2): 218-228, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2015.02.0218.
- 李曰俊, 杨海军, 张光亚等. 2012. 重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元. *岩石学报*, 28(8): 2466-2478.
- 李宗星, 高俊, 李文飞等. 2016. 柴达木盆地地温场分布特征及控制因素. *地学前缘*, 23(5): 23-32, doi: 10.13745/j.esf.2016.05.003.
- 林煜, 李相文, 陈康等. 2021. 深层海相碳酸盐岩储层地震预测关键技术及效果——以四川盆地震旦系-寒武系与塔里木盆地奥陶系油气藏为例. *石油与天然气地质*, 42(3): 717-727, doi: 10.11743/ogg20210316.
- 刘丽芳. 2006. 塔北隆起油气成藏体系研究[博士论文]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 刘绍文, 李香兰, 郝春艳等. 2017a. 塔里木盆地的热流、深部温度和热结构. *地学前缘*, 24(3): 41-55, doi: 10.13745/j.esf.2017.03.004.
- 刘绍文, 王良书, 李成等. 2003. 塔里木北缘岩石圈热-流变结构及其地球动力学意义. *中国科学(D 辑)*, 33(9): 852-863, doi: 10.3969/j.issn.1674-7240.2003.09.004.
- 刘绍文, 杨小秋, 邱楠生等. 2017b. 沉积盆地盐构造热效应及其油气地质意义. *科学通报*, 62(15): 1631-1644, doi: 10.1360/N972017-00076.
- 刘树根, 李泽奇, 邓宾等. 2021. 四川盆地震旦系灯影组深层碳酸盐岩储层沥青赋存形态及其油气藏示踪作用. *天然气工业*, 41(8): 102-112, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2021.08.010.
- 罗昕, 朱传庆, 张宝收等. 2020. 利用自然伽马测井估算塔里木盆地沉积层生热率. *地质学报*, 94(7): 2078-2088, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2020219.
- 吕海涛, 张哨楠, 马庆佑. 2017. 塔里木盆地中北部断裂体系划分及形成机制探讨. *石油实验地质*, 39(4): 444-452, doi: 10.11781/sysydz201704444.
- 吕修祥, 周新源, 李建交等. 2007. 塔里木盆地塔北隆起碳酸盐岩

- 油气成藏特点. 地质学报, 81(8): 1057-1064, doi: 10.3321/j.issn:0001-5717.2007.08.005.
- 马德波, 崔文娟, 陶小晚等. 2020. 塔北隆起轮南低凸起断裂构造特征与形成演化. 天然气地球科学, 31(5): 647-657, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2020.04.014.
- 孟祥霞, 王宏斌, 姚清洲等. 2015. 塔北隆起构造演化特征及对奥陶系碳酸盐岩的控储控藏作用. 天然气地球科学, 26(S1): 109-120, doi: 10.11764/j.issn.1672-1926.2015.S1.0109.
- 邱楠生, 王绪龙, 杨海波等. 2001. 准噶尔盆地地温分布特征. 地质科学, 36(3): 350-358, doi: 10.3321/j.issn:0563-5020.2001.03.010.
- 邱楠生, 左银辉, 常健等. 2015. 中国东西部典型盆地中—新生代热体制对比. 地学前缘, 22(1): 157-168, doi: 10.13745/j.esf.2015.01.013.
- 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, doi: 10.3321/j.issn:0563-5020.2002.02.007.
- 饶松, 胡圣标, 朱传庆等. 2013. 准噶尔盆地大地热流特征与岩石圈热结构. 地球物理学报, 56(8): 2760-2770, doi: 10.6038/cjg20130824.
- 任战利, 崔军平, 祁凯等. 2020. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用. 天然气工业, 40(2): 22-30, doi: 10.3787/j.issn.1000-0976.2020.02.003.
- 孙冬胜, 李双建, 李建交等. 2022. 塔里木与四川盆地震旦系—寒武系油气成藏条件对比与启示. 地质学报, 96(1): 249-264, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2022274.
- 田军, 王清华, 杨海军等. 2021a. 塔里木盆地油气勘探历程与启示. 新疆石油地质, 42(3): 272-282, doi: 10.7657/XJPG20210303.
- 田军, 杨海军, 朱永峰等. 2021b. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术. 石油学报, 42(8): 971-985, doi: 10.7623/syxb202108001.
- 王步清, 黄智斌, 马培领等. 2009. 塔里木盆地构造单元划分标准、依据和原则的建立. 大地构造与成矿学, 33(1): 86-93, doi: 10.3969/j.issn.1001-1552.2009.01.011.
- 王钧, 汪缉安, 沈继英等. 1995. 塔里木盆地的大地热流. 地球科学, 20(4): 399-404.
- 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, doi: 10.3321/j.issn:1000-0747.2005.04.013.
- 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.
- 王社教, 胡圣标, 汪集旸. 1999. 塔里木盆地沉积层放射性生热的热效应及其意义. 石油勘探与开发, 26(5): 36-38.
- 魏大卫. 1992. 塔里木盆地北缘大地热流测定. 地质科学, (1): 93-96.
- 吴鲜, 李丹, 韩俊等. 2022. 塔里木盆地顺托果勒北部地区超深层现今地温场特征. 石油学报, 43(1): 29-40.
- 徐明, 朱传庆, 田云涛等. 2011. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征. 地球物理学报, 54(4): 1052-1060, doi: 10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.020.
- 许志琴, 李思田, 张建新等. 2011. 塔里木地块与古亚洲/特提斯构造体系的对接. 岩石学报, 27(1): 1-22.
- 杨海军, 陈永权, 田军等. 2020. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义. 中国石油勘探, 25(2): 62-72, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2020.02.007.
- 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙等. 2014. 塔里木早二叠世大火成岩省. 中国科学: 地球科学, 44(2): 187-199, doi: 10.1007/s11430-013-4653-y.
- 杨学文, 田军, 王清华等. 2021. 塔里木盆地超深层油气地质认识与有利勘探领域. 中国石油勘探, 26(4): 17-28, doi: 10.3969/j.issn.1672-7703.2021.04.002.
- 张鹏, 侯贵廷, 潘文庆等. 2013. 塔里木盆地震旦寒武系白云岩储层构造裂缝有效性研究. 北京大学学报(自然科学版), 49(6): 993-1001, doi: 10.13209/j.0479-8023.2013.132.
- 赵岩, 李曰俊, 孙龙德等. 2012. 塔里木盆地塔北隆起中—新生界伸展构造及其成因探讨. 岩石学报, 28(8): 2557-2568.
- 钟志洪, 王良书, 李绪宣等. 2004. 琼东南盆地古近纪沉积充填演化及其区域构造意义. 海洋地质与第四纪地质, 24(1): 29-36, doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2004.01.004.
- 朱井泉, 吴仕强, 王国学等. 2008. 塔里木盆地寒武—奥陶系主要白云岩类型及孔隙发育特征. 地学前缘, 15(2): 67-79.
- 祝嵩, 姚永坚, 李学杰. 2021. 南海及邻区岩浆岩时空分布特征及机制. 海洋地质与第四纪地质, 41(4): 87-115, doi: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020052001.
- 左银辉, 邱楠生, 常健等. 2013. 渤海湾盆地中—新生代岩石圈热结构研究. 地质学报, 87(2): 145-153, doi: 10.3969/j.issn.0001-5717.2013.02.001.

(本文编辑 胡素芳)