

DOI: 10.13745/j.esf.sf.2023.2.25

塔里木盆地台盆区超深层热演化及对储层的影响

李 丹, 常 健*, 邱楠生*, 熊昱杰

1. 中国石油大学(北京) 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249

2. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249

LI Dan, CHANG Jian*, QIU Nansheng*, XIONG Yujie

1. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China

LI Dan, CHANG Jian, QIU Nansheng, et al. Thermal analysis of ultra-deep layers and its influence on reservoir utilization in platform area, Tarim Basin. *Earth Science Frontiers*, 2023, 30(6): 135-149

Abstract: The temperature field is one of the key factors restricting the development of effective reservoirs, however, few studies have focused on the thermal evolution of ultra-deep reservoirs and its influence on reservoir performance in the Tarim Basin. In this paper, the paleothermal history of the Tarim Basin platform area since the Phanerozoic are investigated by vitrinite reflectance modeling using well logs from new wells. The heat flow in the basin platform area has decreased gradually since the Early Paleozoic, from 45–65 to 32–45 mW/m², and peaked briefly to ~46–62 mW/m² during the Early Permian in some areas. Combined with the burial history, the thermal history of ultra-deep carbonate reservoirs and the distribution characteristics of key tectonic events are revealed, and the differential evolution of temperature field in different tectonic units and the main controlling factors are analyzed. The Ordovician reservoirs experienced slow heating then rapid heating processes. The reservoir cooling characteristics, i. e., planar cooling from the central area to the north and south sides during the key tectonic episodes, matches the hydrocarbon phase behavior, except for the local high anomaly during the Early Permian. The temperature field conditions for effective reservoir development in the platform area are discussed through building the temperature field and porosity evolution models. The phase behavior of hydrocarbons in ultra-deep carbonate reservoirs is strongly influenced by temperature and pressure, where not only the reservoir temperature can affect pore space for oil/gas charging, but also the long-term low-temperature, high-pressure environment is beneficial to the preservation of liquid hydrocarbons. This study helps to clarify the thermal evolution process of ultra-deep carbonate reservoirs in the platform area of the Tarim Basin, and provides a reference for the next stage of hydrocarbon exploration.

Keywords: ultra-deep carbonate rock; temperature field; Tarim Basin; hydrocarbon accumulation; petroleum geology

摘 要: 温度场是制约有效储层发育的关键因素之一,然而关于塔里木盆地超深层储层热演化及其对储层有效性的影响研究还很少。本文选取塔里木盆地台盆区近几年新钻井作为研究对象,通过实测等效镜质体反射率参数热史模拟揭示了台盆区显生宙时期以来的古热流演化史。台盆区大地热流从早古生代的 45~65 mW/m² 逐渐降至现今的 32~45 mW/m²,仅局部地区在早二叠世受岩浆活动影响出现短暂的热流高峰,

收稿日期:2023-01-12;修回日期:2023-02-15

基金项目:国家自然科学基金项目“海相深层油气富集机理与关键工程技术基础研究(U19B6003)”;国家自然科学基金面上项目“塔里木盆地台盆区深层、古老层系有效古温标探索与热史重建(42272135)”

作者简介:李 丹(1994—),女,博士研究生,地质学专业。E-mail: lidan941009@163.com

* 通信作者简介:常 健(1982—),男,教授,博士生导师,从事沉积盆地温压场和热年代学研究工作。E-mail: changjian@cup.edu.cn
邱楠生(1968—),男,教授,博士生导师,从事盆地构造、热演化和温压演化研究工作。E-mail: qionsh@cup.edu.cn

<https://www.earthsciencefrontiers.net>, cn 地学前缘,2023,30(6)

为 $46\sim 62\text{ mW/m}^2$ 。在此基础上,结合沉积埋藏史明确了超深层碳酸盐岩储层古温度史和关键变革时期古温度平面分布特征,并对比分析了不同构造单元碳酸盐岩储层温度场差异演化特征及主控因素。奥陶系储层受控于大地热流和地层埋深影响,经历了早期缓慢升温 and 晚期快速升温的过程,除局部地区在早二叠世存在高异常外,塔里木盆地奥陶系储层在关键构造时期均表现出由中部向南北两侧降温的平面展布特征,与现今油气相态特征匹配。通过建立温度场与储层孔隙演化模式,深入讨论了台盆区有效储层发育的温度场条件。超深层碳酸盐岩储层的溶蚀-沉淀作用和油气相态与温压密切相关,温度不仅可以通过改善储层物性间接为油气充注提供储集空间,而且长期低温高压背景有利于液态烃的保存。本研究有助于厘清塔里木盆地台盆区超深层碳酸盐岩储层的热演化过程,并通过探讨对储层有效性的影响为下一步油气勘探提供参考。

关键词:超深层碳酸盐岩;温度场;塔里木盆地;油气成藏;石油地质

中图分类号:P618.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2321(2023)06-0135-0015

0 引言

近年来,全球油气勘探逐渐聚焦于超深层($>6\ 000\text{ m}$)和古老海相层系。我国塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地在深层和超深层相继实现了油气勘探突破^[1-2]。其中塔里木盆地台盆区塔北-塔中地区的超深层奥陶系碳酸盐岩储层累计探明石油储量约为 118.54 亿吨,并突破了传统的油藏赋存深度^[3-4]。超深层碳酸盐岩油气藏具有埋深大、易被改造、成藏历史漫长和成藏机理复杂等特点,其成藏过程与中浅层相比存在巨大差异^[3,5]。温度作为油气成藏的关键要素之一,往往通过控制烃类生成、储层物性和原油裂解,而影响油气相态和富集。

塔里木盆地现今是典型的“冷”盆,平均大地热流为 42.5 mW/m^2 ,平均地温梯度为 $20.7\text{ }^{\circ}\text{C/km}$ ^[6-8]。最新研究表明塔里木盆地 10 000 m 埋深处的现今地温为 $120\sim 280\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有“隆起区高,坳陷区低”的横向差异性^[8]。前人利用镜质体反射率^[9-10]、低温热年代学^[11-12]和团簇同位素^[13-14]等多种古温标和盆地演化动力学方法^[15]重建了塔里木盆地热历史,普遍认为盆地自早古生代以来逐渐降温至今,仅盆地中西部由于受大火成岩省影响,在早二叠世存在短暂的高温期($160\sim 190\text{ }^{\circ}\text{C}$)。许多学者曾研究过超深层烃源岩热演化过程,认为台盆区下寒武统玉尔吐斯组烃源岩在奥陶纪末期开始生烃,中生代末期至今演化为高成熟-干气阶段^[10,12,16]。但是,关于塔里木盆地台盆区超深层奥陶系碳酸盐岩储层热演化及其对油气相态和保存影响的相关研究还很少。

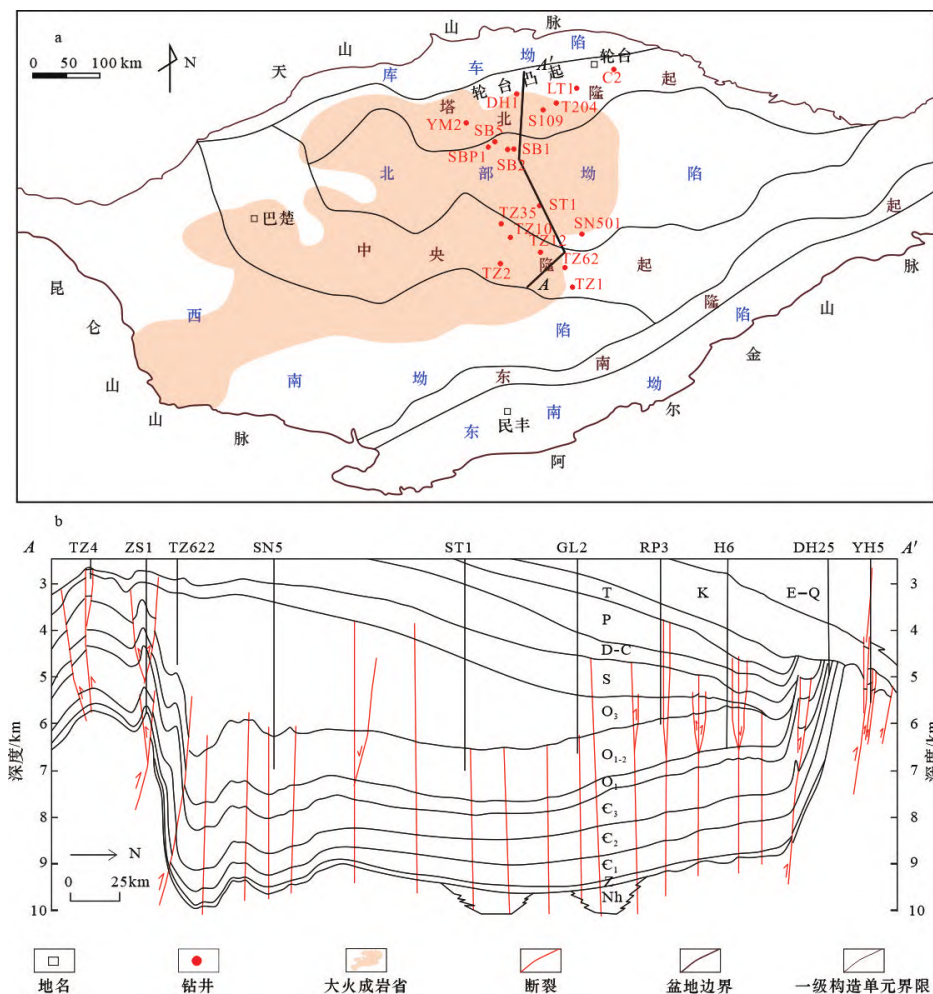
本研究拟以现今实测温度数据为约束条件,利用等效镜质体反射率古温标研究塔里木盆地台盆区典型钻井超深层古老碳酸盐岩层系的古温度史,阐明奥陶系储层关键变革期的古温度平面分布特征,

从而剖析温度对塔里木盆地奥陶系储层的影响。本研究不仅可以丰富塔里木盆地超深层古老碳酸盐岩层系温度演化史的研究,而且还可以为塔里木盆地超深层油气赋存相态提供新证据,进而为油气成藏和勘探提供理论支撑。

1 地质背景

塔里木盆地位于中国西北部,夹持于天山、昆仑山和阿尔金山脉之间,面积约为 $56\times 10^4\text{ km}^2$ 。塔里木盆地是我国最大的含油气盆地,由古生代克拉通盆地和中新生代前陆盆地组成,可由北向南依次划分为库车坳陷、塔北隆起、北部坳陷、中央隆起、西南坳陷、东南隆起和东南坳陷 7 个构造单元^[17-21](图 1a^[21-22])。研究区是由塔北隆起、北部坳陷和中央隆起组成的盆地克拉通区。

塔里木盆地作为大型叠合盆地,受周缘造山带和板块边缘活动控制经历了 7 个构造演化阶段:前震旦纪发育盆地复合型基底;震旦纪-奥陶纪时期,塔里木演化为克拉通边缘拗拉槽,并于奥陶纪末期初步形成塔北和塔中隆起;志留纪-泥盆纪时期,盆地内发育为克拉通内坳陷,古隆起遭受剥蚀作用;石炭纪-二叠纪时期,盆地演化为克拉通内裂谷,其中西部地区于二叠纪($292\sim 259\text{ Ma}$)广泛发育火山活动;三叠纪时期,塔里木进入前陆盆地阶段,晚期强烈的挤压作用导致大范围遭受隆升剥蚀;侏罗纪-古近纪时期,塔里木进入断陷盆地发展阶段,并于盆地结合处形成了库车-满加尔和塔西南沉积区;新近纪以来,受印度板块与欧亚大陆碰撞的影响,盆地进入周缘造山带隆升而盆地下沉的复合前陆盆地阶段^[17,23-24]。塔里木盆地发育海相、海陆交互相和陆相地层,残余厚度可达 $18\ 000\text{ m}$ ^[25](图 1b)。寒武纪-奥陶纪时期,受克拉通内伸展作用的影响,塔里



Nh—南华系;Z—震旦系; ϵ_1 —下寒武统; ϵ_2 —中寒武统; ϵ_3 —上寒武统; O_1 —下奥陶统; O_{1-2} —下-中奥陶统; O_3 —上奥陶统;
S—志留系;D-C—泥盆系-石炭系;P—二叠系;T—三叠系;K—白垩系;E-Q—古近系-第四系。

图1 塔里木盆地构造单元图(a)及SN向结构剖面(b)

(a 据文献[21-22]补充修改;b 引自文献[23])

Fig.1 Structural unit divisions (a) and SN-trending structure profile (b) in the platform of the Tarim Basin.
amodified from the references [21-22]; b adapted from the reference [23].

木盆地接受了巨厚的台地相-斜坡相-盆地相沉积^[26]。下寒武统玉尔吐斯组泥岩是台盆区海相油气藏的主要供烃源岩,其中轮探1井钻遇该层系厚度为81 m,有机质丰度很高,TOC含量达10.48%^[27-28]。下寒武统烃源岩生成的烃类物质经断裂和不整合面以横向或纵向的方式运移至浅部奥陶系碳酸盐岩储层^[29-30]。多期次海平面下降、古隆起和深大断裂的发育导致碳酸盐岩台地遭受暴露溶蚀,形成了一间房组和鹰山组岩溶蚀缝洞型和断溶体型主力产层,并与上覆的上奥陶统巨厚泥岩组成有利的储盖组合^[4,31-32]。优质的石油地质条件为塔里木盆地台盆区古老、超深层系具有丰富的油气资源潜力奠定了基础,油气相态由隆起区重质油藏逐

渐向坳陷区轻质油藏、挥发油藏及天然气藏演变^[3]。

2 方法和原理

古温标法是重建热历史最常用的方法之一,可以通过实测数据来检验模拟结果。其中应用最广泛的是镜质体反射率(R_o),这是由于 R_o 作为表征有机质成熟度最可靠的指标与温度密切相关,可以有效地记录沉积地层经历的最高温度^[33]。下古生界和海相层系由于缺乏镜质体,通常选择沥青反射率(R_b)并依据与镜质体反射率的关系换算成等效镜质体反射率(R_{equ})重建热历史^[34-37]。恢复热史的前提是重建沉积埋藏史,它需要的地质参数包括钻

井残余地层厚度、岩性配比和地质年代等基础地质数据,以及前人利用地层对比法和沉积盆地波动过程分析方法计算的关键构造时期的剥蚀量^[10,13,38-41](表1)。本文利用 BasinMod (version 5.4) 盆地模拟软件的机械压实模型重建沉积埋藏史,以现今稳态测温数据为约束条件,应用 Easy%R。模型模拟层系中的 R_e 值,并与实测 R_{equ} 值对比。通过不断调试假设的温度路径直到模拟值与实测值吻合,则认为是可靠的热史路径并符合盆地的构造-热演化过程。BasinMod 软件是可信度高的盆模软件之一,它集合了埋藏史、热史、生排烃史、油气运聚史和油气资源量估算等多模块,目前被广泛应用于国内外盆地的数值模拟^[42-44]。其中埋藏史模块使用机械压实模型,在考虑孔隙度、深度和压力的函数关系情况下,模拟各地层的古埋深^[45]。热史模块应用 Easy%R。模型将镜质体的成熟反应分为 4 个平衡化学反应,包括脱 H_2O 、 CO_2 、 CH_4 及高碳数烃,可以准确预测中等到高成熟度的 R_e 值^[33]。

本文收集了塔里木盆地台盆区 18 口钻井的等效镜质体反射率数据, R_{equ} 值分布在 0.5%~4.3%,显示出随深度增加而逐渐增大的趋势^[9-11,46-47](图2)。塔北隆起 R_{equ} 值为 0.5%~1.7%,明显低于塔中凸起的 0.6%~2.7%,表明塔北隆起在同等级埋藏深度下经历的温度低于塔中凸起。阿满过渡带 R_{equ} 值为 0.5%~4.3%,并且在 5 000~7 000 m 普遍存在高异常值,可能是二叠纪岩浆活动高温烘烤近地表造成的^[10,22]。但由于热效应影响有限,随着深度增加成熟度又逐渐恢复正常^[48]。

表 1 塔里木盆地台盆区典型钻井不同时期剥蚀量

(据文献^[10,38-41])

Table 1 The erosion thickness of typical wells in the platform of the Tarim Basin during different period
(Compiled from references ^[10, 38-41])

地质时期	剥蚀厚度/m			
	LT1 井	SB1 井	ST1 井	TZ62 井
奥陶纪末期	1 530	130	50	250
志留纪末期		260	200	260
泥盆纪末期		20	20	150
石炭纪末期	450	210	80	380
二叠纪末期	150	40	200	470
三叠纪末期	50	350	100	1 000
侏罗纪末期	450			
白垩纪末期	550	190	170	150
古近纪末期	50	20	20	20

3 台盆区热史结果

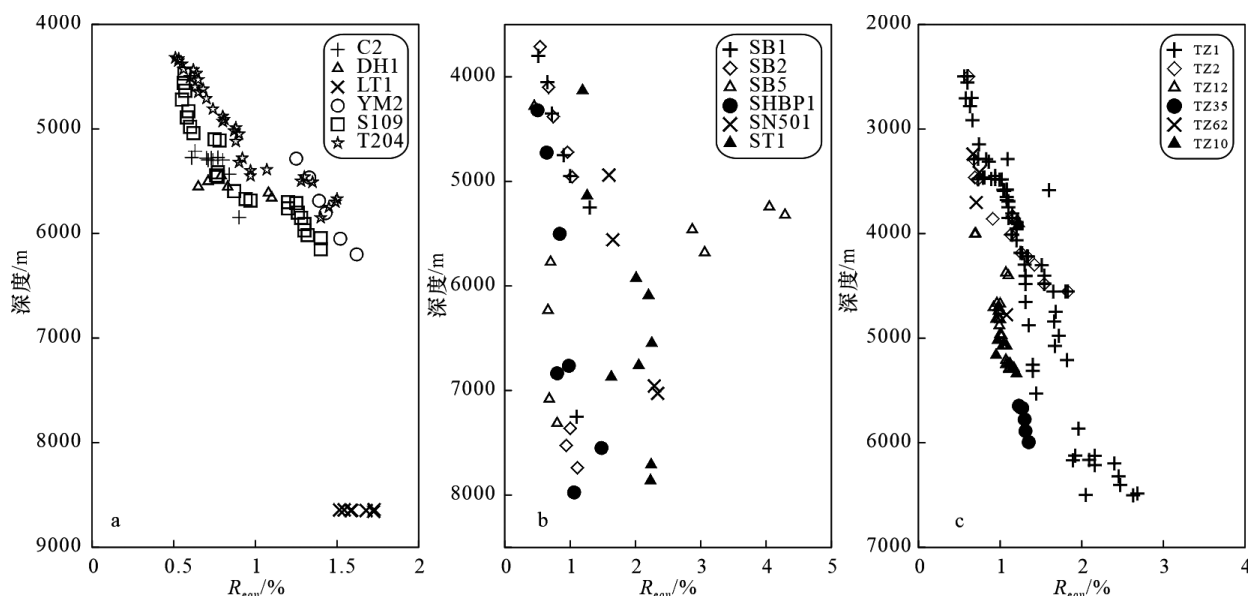
3.1 阿满过渡带热史

SB1 井位于阿满过渡带西北部,钻遇奥陶系轻质-挥发性油藏,完钻深度为 7 128 m(图 1a)。该井区自奥陶纪以来主要经历了奥陶纪末期、志留纪末期、晚石炭世-早二叠世、二叠纪末期、三叠纪末期及白垩纪末期 6 期构造隆升剥蚀事件(表 1)。根据沉积埋藏史,可将其沉积过程划分为 3 个阶段:早古生代快速沉降阶段、石炭纪-新近纪缓慢沉降阶段和新近纪至今快速沉降阶段。本文结合重建的沉积埋藏史和实测 R_{equ} 数据恢复了 SB1 井区自奥陶纪以来的热流演化过程(图 3)。该井区在奥陶纪时期的大地热流为 44 mW/m²,随后热流逐渐冷却至今 32 mW/m²,仅在早二叠世受大火成岩省热效应影响出现短暂的热流高峰,达到 48 mW/m²(图 3)。这与前人利用等效镜质体反射率、碳酸盐岩团簇同位素和锆石(U-Th)/He 等方法恢复的阿满过渡带热历史具有良好的对应关系^[12-13,16](图 3)。

ST1 井位于阿满过渡带东南部,完钻深度为 7 659 m(图 1a)。该井区类似于 SB1 井,经历了 6 期构造隆升剥蚀事件,但剥蚀程度存在差异(表 1)。ST1 井 R_{equ} 值高于 SB1 井,并表现出相似的垂向分布特征,表明 ST1 井经历了更高温的热历史(图 4a)。热模拟结果显示,ST1 井区奥陶纪大地热流值为 50 mW/m²,随后缓慢冷却至现今的 38 mW/m²,仅在早二叠世经历了短暂热流峰值,达到 54 mW/m²(图 5)。此外,我们根据 R_{equ} 数据重建了阿满过渡带 SB2、SB5、SBP1 和 SN501 井自奥陶纪以来的热历史,综合这些钻井的热流模拟结果,得到了阿满过渡带的平均热流演化史(图 1a 和图 5)。该地区自奥陶纪以来处于降温状态,热流由早奥陶世的约 48 mW/m² 降至现今的约 36 mW/m²,中北部地区受二叠纪岩浆活动影响存在短暂的热流峰值约 49 mW/m²,南部地区新近纪热流受热液活动影响短暂回升,整体上热流由北向南增加^[49](图 5)。

3.2 塔北隆起热史

LT1 井位于塔北隆起轮南低凸起的寒武系盐下台缘丘滩体高部位,钻探发现了寒武系-奥陶系复式油气田^[21,38](图 1a)。该井钻遇了第四系至震旦系,完井深度为 8 882 m。震旦纪-奥陶纪,该井



a—塔北隆起;b—阿满过渡带;c—塔中凸起。

图2 塔里木盆地台盆区不同构造单元等效镜质体反射率与深度关系

(据文献[9-11,38,46-47]修改)

Fig.2 Requ-depth profiles of different tectonic units in the platform, Tarim Basin (Complied from references [9-11, 38, 46-47])

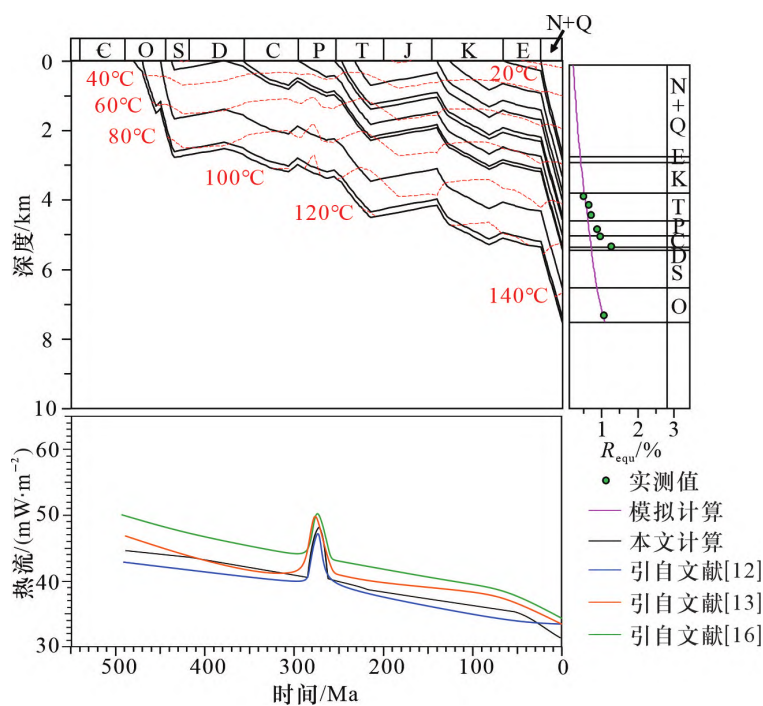
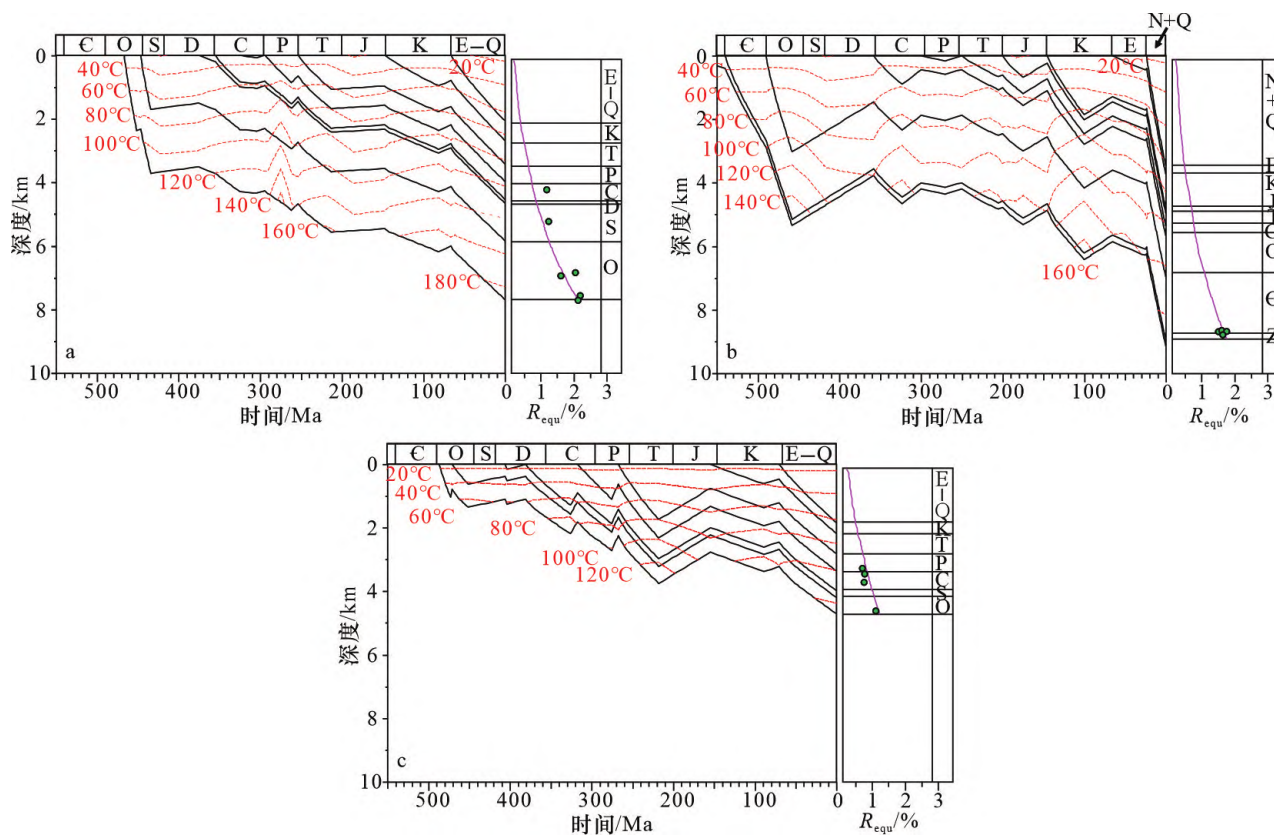


图3 SB1井埋藏史-热史及热流史图

Fig.3 Burial, thermal, and heat flow histories of Well SB1

区沉积了巨厚的碳酸盐岩,大气淋滤背景下发生的溶蚀作用有利于形成优质的储集空间。志留纪-泥盆纪,该井区发生了构造抬升并导致奥陶系中上统、志留系、泥盆系缺失,剥蚀量高达1500 m。该阶段塔北隆起普遍接受了巨大的抬升剥蚀,演化成前石

炭纪古隆起^[50]。石炭纪-古近纪,构造演化相对平缓,仅在二叠纪、三叠纪和白垩纪有较小的构造抬升,剥蚀量不超过500 m。新近纪以来,地层快速沉降造成现今埋深达到最大,沉积厚度达3500 m以上^[38](表1和图4b)。依据恢复的沉积埋藏过程,结



a—ST1 井; b—LT1 井; c—TZ62 井。

图4 塔里木盆地台盆区典型钻井热史模拟结果

Fig. 4 Burial and thermal histories of typical wells in the platform of the Tarim Basin

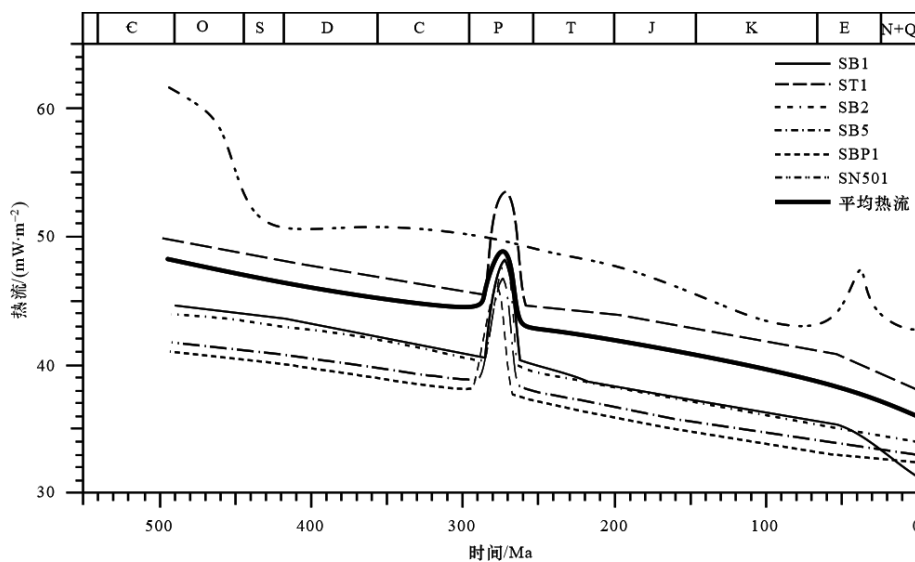


图5 阿满过渡带典型钻井古热流恢复结果

Fig. 5 Heat flow history of typical wells in the Aman transitional zone

合收集到的 7 个 LT1 井寒武系 R_{equ} 数据和塔北隆起其他钻井 R_{equ} 数据的纵向分布规律,模拟了该井区自寒武纪以来的热流演化过程。热模拟结果显示,该井区在早寒武世大地热流最高达 $51 \sim 54 \text{ mW}/\text{m}^2$, 随后大地热流缓慢降低至今约 $33 \text{ mW}/\text{m}^2$ (图 6)。

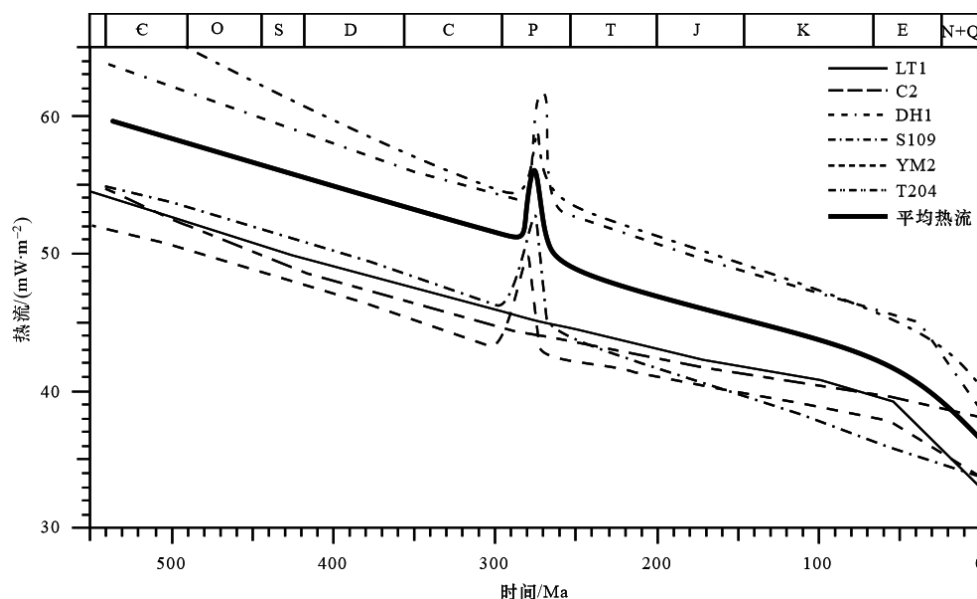


图6 塔北隆起典型钻井古热流恢复结果

Fig. 6 Heat flow history of typical wells in the Tabei Uplift

此外,本文在收集的 R_{equ} 数据基础上,结合构造演化特征,重建了塔北隆起 C2、DH1、S109、S47 和 T204 井的热历史,并得到了塔北隆起的平均热流演化史(图 1a 和图 6)。塔北隆起古热流在早寒武世高达约 60 mW/m^2 ,随后热流逐渐降低至今约 36 mW/m^2 。考虑到大火成岩省的分布范围,除隆起东部 LT1 井外,中西部钻井普遍受岩浆活动影响在二叠纪存在一个短暂的热流峰值,高达约 56 mW/m^2 ^[51](图 6)。受区域构造演化背景和基底埋深影响,塔北隆起古热流具有北高南低的特征。

3.3 塔中凸起热史

TZ62 井位于塔中凸起的塔中 I 号断裂构造带东部,完钻深度为 4 758 m,地层发育较完整,层系间多呈不整合接触。受加里东晚期和印支期构造运动的影响,该井区缺失泥盆系和侏罗系(表 1 和图 4c)。热模拟结果表明,TZ62 井区奥陶纪时期大地热流为 58 mW/m^2 ,随后大地热流持续下降至今为 38 mW/m^2 (图 7)。此外,塔中凸起其余 5 口钻井的热流表现出类似的演化趋势,平均热流在早寒武世为约 51 mW/m^2 ,现今降为约 38 mW/m^2 (图 1a 和图 7)。其中北部斜坡断裂带受大火成岩省热效应影响显著,早二叠世热流峰值达约 49 mW/m^2 ,而南部断裂带及潜山地带所受影响较小(图 7)。受差异性隆升与沉降作用和构造活

动强度影响,塔中隆起古热流具有南高北低的特征。

4 台盆区奥陶系储层温度场演化

奥陶系储层是塔里木盆地台盆区海相油气藏的主力产层,明确其温度演化过程有利于分析超深层油气成藏过程。本文首先恢复台盆区 28 口具有等效镜质体反射率数据约束的实测井热历史;其次,对于缺少古温标约束的地区,依据实测井的热流演化过程和构造演化规律,恢复了 24 口预测井的热历史;最后,在最新的一维热史基础上,利用插值法明确了中奥陶统一间房组储层在志留纪末期、二叠纪末期、三叠纪末期和现今温度平面的分布特征。

4.1 台盆区奥陶系储层单井温度演化特征

台盆区 LT1、SB1、ST1 和 TZ62 井奥陶系储层具有相似的温度演化趋势(图 8)。奥陶纪—石炭纪,奥陶系储层温度由地表温度持续增温至 $80 \sim 130^\circ\text{C}$,该阶段大地热流较稳定,地层温度受控于沉积埋藏作用。志留纪—泥盆纪,塔里木盆地台盆区受加里东晚期影响,经历了不同程度的剥蚀冷却,其中 LT 井区构造作用最为剧烈,地温由 110°C 冷却至 60°C 。晚石炭世—早二叠世,SB1 和 ST1 井区奥陶系储层在 280 Ma 左右经历了短暂的高温($110 \sim 165^\circ\text{C}$),可能与二叠纪大火成岩省有关。晚二叠

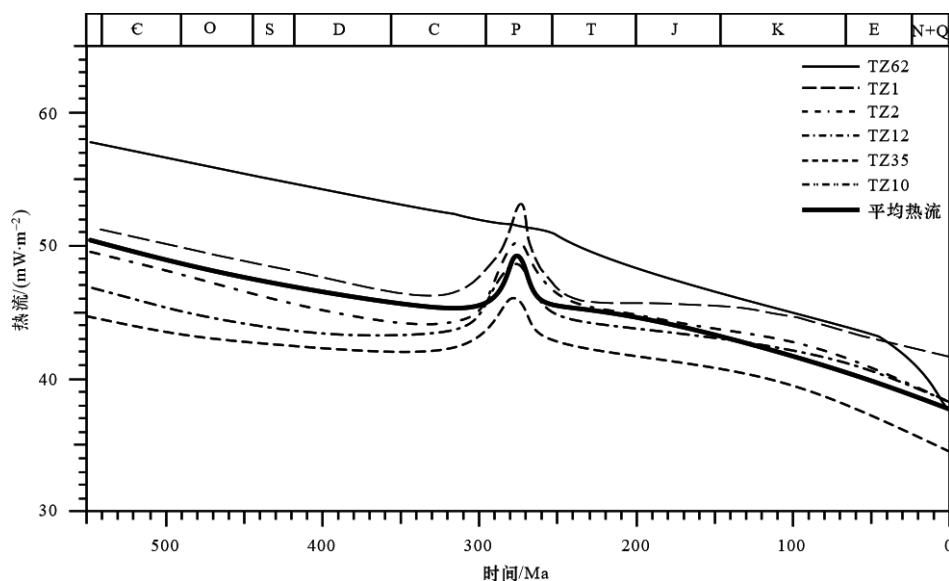


图7 塔中凸起典型钻井古热流恢复结果
Fig. 7 Heat flow history of typical wells in the Tazhong Bulge

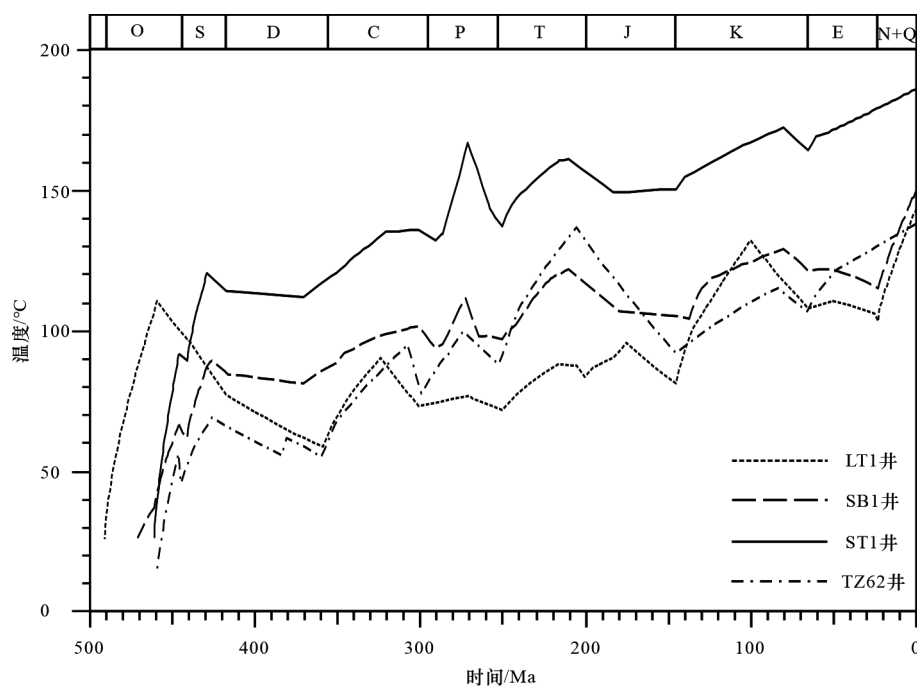


图8 塔里木盆地台盆区典型钻井奥陶系储层温度演化
Fig. 8 Temperature evolution of Ordovician reservoirs of typical wells in the platform of the Tarim Basin

世—古近纪,台盆区经历了多次幅度不大的构造调整,大地热流值比较稳定,地层温度缓慢增加,仅TZ62井区于三叠纪—侏罗纪经历了比较强烈的剥蚀冷却事件。新生代以来台盆区接受了巨厚的沉积,然而不同构造单元的埋藏时间存在差异。其中SB1和ST1井区在新近纪开始快速沉降并迅速增温,而LT1井区和TZ62井区在古近纪就开始增温。4口典型钻

井的奥陶系储层的温度均在现今达到最大(135~185℃),其中塔中凸起温度最高,塔北隆起和阿满过渡带东南部次之,阿满过渡带北部最低(图8)。

4.2 台盆区奥陶系储层平面温度演化特征

中奥陶统一间房组储层主要分布在北部坳陷、中央隆起东北部和塔北隆起南坡。结合前人利用流体包裹体^[52-53]、地球化学方法^[54-55]、油气水界面追

溯法^[56]和自生伊利石 K-Ar 同位素定年法^[56-57]确定的台盆区成藏期,本文分析了一间房组储层在志留纪末期、二叠纪末期、三叠纪末期和现今共 4 个关键构造期的温度平面分布特征。志留纪末期,一间房组地层温度为 30~320 °C,受埋深影响,北部坳陷的满加尔凹陷属高温区,地层温度达到 120~320 °C,而塔北-塔中地区温度偏低,为 30~90 °C,平面温差较大(图 9)。二叠纪末期,全盆温度有所升高,一

间房组地层温度为 30~280 °C,其中塔北-塔中地区温度为 40~110 °C,明显低于阿满过渡带(图 10)。三叠纪末期,盆地整体增温不明显,台盆区一间房组地层温度为 40~130 °C,分布特征与二叠纪末期类似(图 11)。一间房组现今地层温度为 80~240 °C,其中满加尔凹陷受热流下降的影响而降温,而塔北-塔中地区因快速沉降而升温,地层温度为 100~160 °C(图 12)。

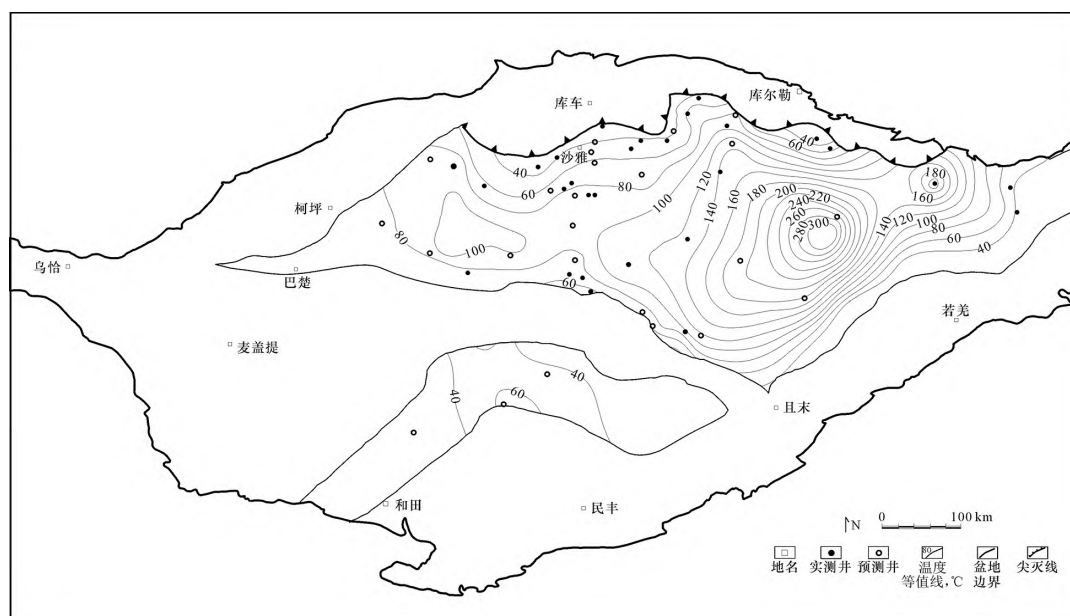


图 9 塔里木盆地台盆区一间房组储层志留纪末期温度平面分布特征
Fig. 9 Temperature plane distribution characteristics of Yijianfang Formation reservoirs at the end of the Silurian in the platform of the Tarim Basin

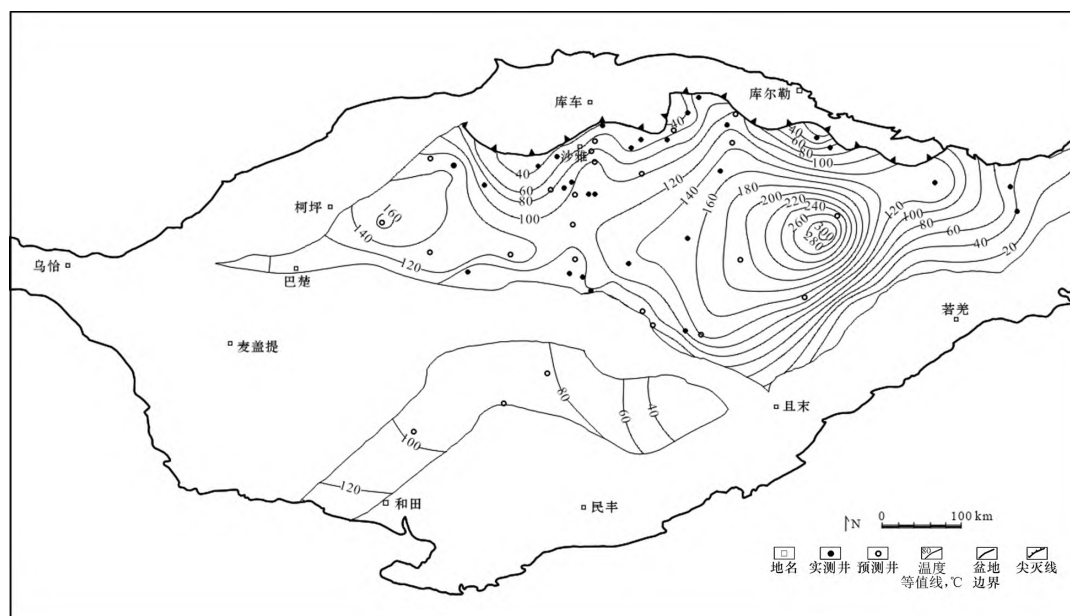


图 10 塔里木盆地台盆区一间房组储层二叠纪末期温度平面分布特征
Fig. 10 Temperature plane distribution characteristics of Yijianfang Formation reservoirs at the end of the Permian in the platform of the Tarim Basin

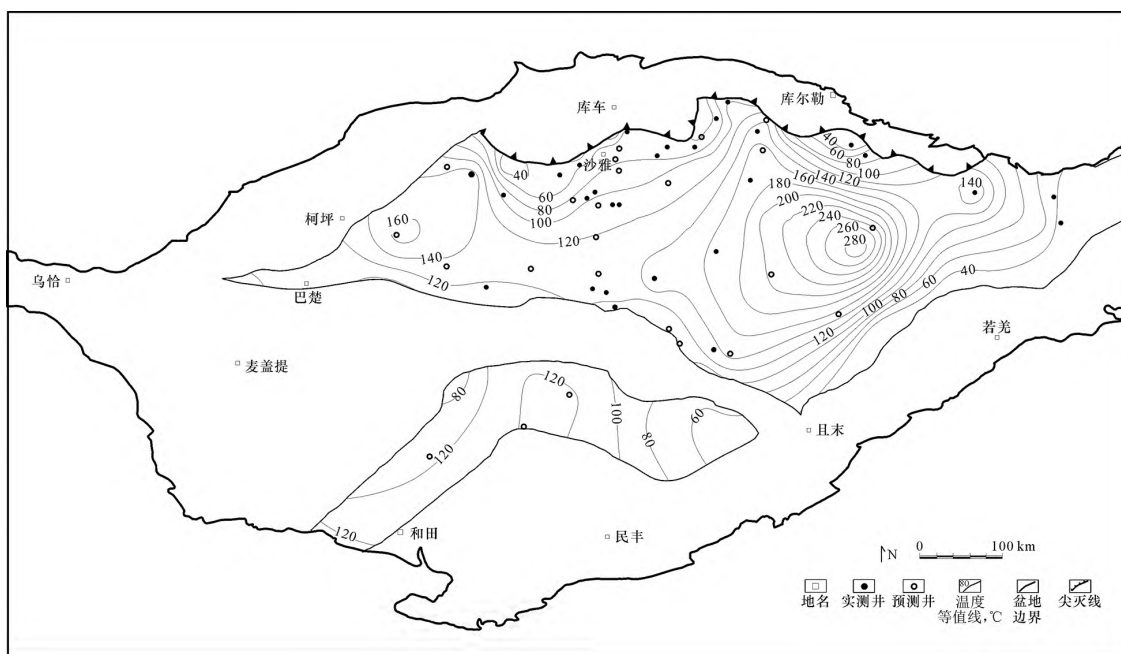


图 11 塔里木盆地台盆区一间房组储层三叠纪末期温度平面分布特征

Fig. 11 Temperature plane distribution characteristics of Yijianfang Formation reservoirs at the end of the Triassic in the platform of the Tarim Basin

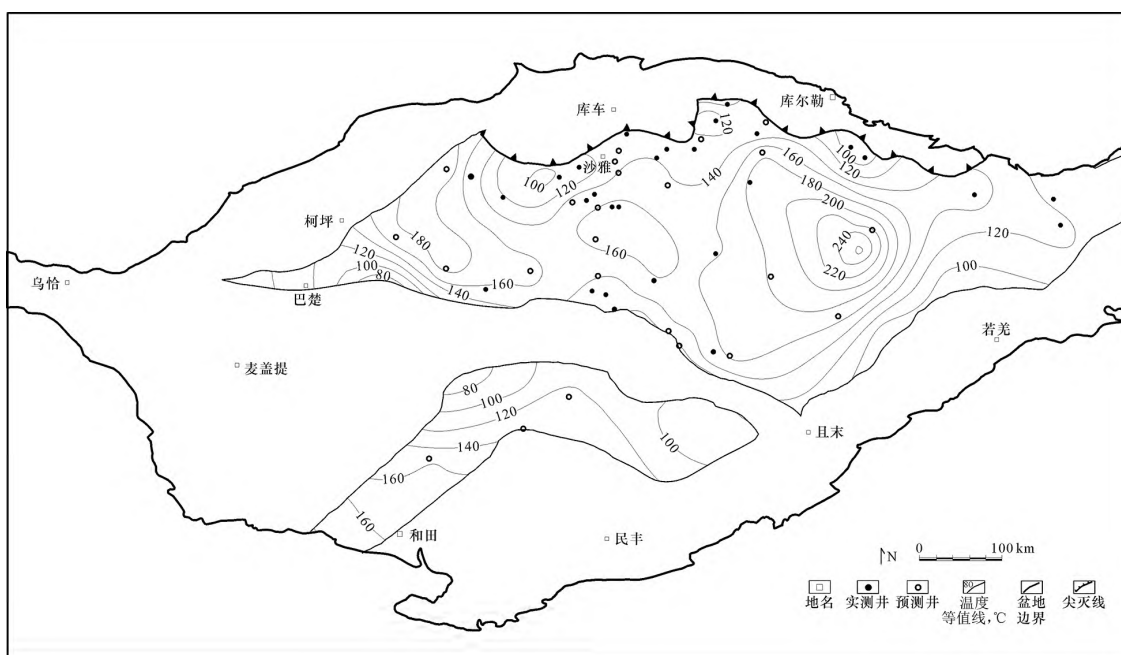


图 12 塔里木盆地台盆区一间房组储层现今温度平面分布特征

Fig. 12 Temperature plane distribution characteristics of Yijianfang Formation reservoirs at the present-day in the platform of the Tarim Basin

5 讨论

5.1 塔里木盆地构造-热演化

根据等效镜质体反射率^[9-10]、锆石 (U-Th)/

He^[11,47]和碳酸盐岩团簇同位素等古温标恢复的热历史^[13-14],塔里木盆地台盆区的大地热流演化可以划分成3个阶段:寒武纪—石炭纪逐渐冷却阶段、早二叠世区域性高异常阶段和中二叠世至今衰退阶段(图13)。大地热流受控于构造演化背景。寒武纪—

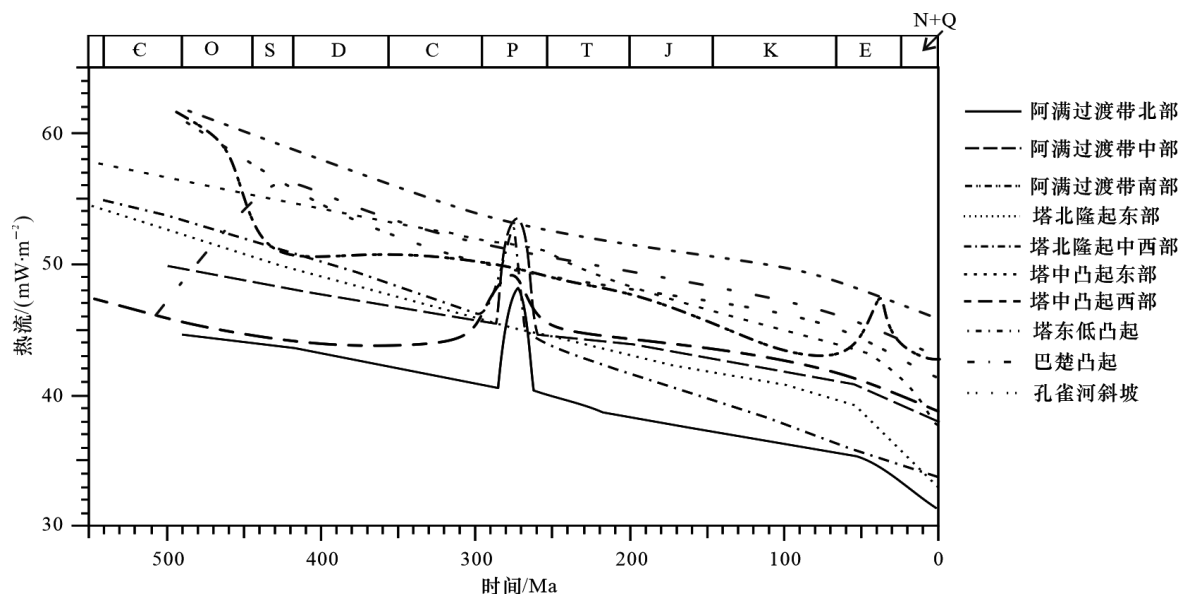


图 13 塔里木盆地早古生代以来的热流演化(引用自文献[9,11-16])

Fig. 13 Evolution of heat flow since the Early Paleozoic in the Tarim Basin (Complied from reference [9, 11-16])

早奥陶世,塔里木盆地为克拉通边缘拗拉槽,地壳的拉伸和变薄造成较高的大地热流。随后塔里木盆地发展为前陆盆地,大地热流逐渐降低。二叠纪时期,塔北隆起中西部、塔中隆起西部和阿满过渡带西北部受岩浆活动热效应的影响,在二叠纪存在短暂的热流峰值。随着岩浆活动的结束,热流值恢复正常。新生代时期,稳定的地壳叠加了盆地边缘强烈的挠曲,塔里木盆地热岩石圈厚度自始新世迅速增厚,大地热流明显下降。然而,巴楚凸起的热流演化趋势与盆地逐渐变冷明显不同,巴楚凸起热流自早古生代缓慢升高并在志留纪达到最大约 56 mW/m²,随后降低至今约 43 mW/m²,这可能与该地区在寒武纪时期沉积了巨厚(800~1 000 m)且热导率较高(约 4.75 W/(m·K))的膏盐岩有关^[11]。此外,塔东低凸起热流值最高,孔雀河斜坡和塔中凸起次之,塔北隆起和阿满过渡带相对较低,阿满过渡带和塔中凸起内表现出由西北向东南方向逐渐升高的趋势(图 13)。

5.2 温度场对储层物性的影响

传统观点认为深层-超深层碳酸盐岩储层受压实和胶结作用的影响,6 000 m 以下不可能存在有效储层,这与近年来塔里木盆地超深层勘探认识不同^[58-59]。在温度和压力的影响下,溶蚀作用可以增加碳酸盐岩储层的储集空间,叠加晚期深埋的构造-流体环境,塔里木盆地超深层碳酸盐岩发育为优质

储层^[60-63]。在沉积埋藏过程中,有机质会随着地层温度的升高先后形成有机酸和 CO₂,从而使地层流体溶蚀碳酸盐岩并形成储集空间^[64]。溶蚀作用会随着温度的升高先增强后减弱,最佳溶蚀温度范围受酸性流体类型影响存在 70~100^[65]、60~150^[66]和 70~175^[67]的争议。此外,超压可以通过降低压实强度而影响溶蚀作用,从而促进碳酸盐岩储层空间的有效保存^[68-69]。

塔里木盆地台盆区典型钻井的奥陶系储层自早古生代以来经历了早期持续缓慢升温 and 晚期快速升温过程(表 2)。早奥陶世,下寒武统玉尔吐斯组烃源岩开始脱羧;晚奥陶世-志留纪,奥陶系储层为弱超压环境,此时地层流体溶解了有机酸导致奥陶系储层发生第一次溶蚀作用^[70](图 14)。志留纪-泥盆纪,剧烈的构造运动使台盆区的奥陶系抬升至近地表并经历了大气淋滤的改造作用,从而导致碳酸盐岩储层的溶蚀作用加剧,进一步增加了奥陶系储层的储集空间(图 14)。二叠纪-三叠纪,由于沉积埋藏作用促使有机质快速生烃演化,地层流体溶解了大量的有机酸,油气携带有机酸运移至奥陶系储层,形成了第二次溶蚀作用。此时台盆区奥陶系埋深和地温分别为 2~4 km 和 80~120^{°C},促使溶蚀作用强度增加^[71]。二叠纪大火成岩省导致大规模热液沿断裂溶蚀局部地层,改造了碳酸盐岩的储集物性。随着岩浆活动的结束,地层温度恢复并在埋藏作用

表 2 塔里木盆地台盆区深层碳酸盐岩油气藏温压场特征对比

Table 2 Comparison of temperature and pressure in typical deep carbonate oil and gas reservoirs

温度场特征	塔北隆起	阿满过渡带北部	阿满过渡带中部	塔中凸起
油气相态	轻质油	挥发油	凝析气	挥发油
油/气藏温度/℃	162	140	187	126
温度演化	缓慢升温—快速升温	缓慢升温—异常高温— 缓慢升温—快速升温	缓慢升温—异常高温— 缓慢升温—快速升温	缓慢升温—快速升温
现今压力/MPa	53.5	65	138~172	55
现今压力系数	0.9	1.0	1.8~2.2	1.2
压力演化	常压	常压—弱超压—常压— 弱超压—常压	常压—强超压	常压—弱超压—常压
代表井	LT1	SB1	ST1	TZ62

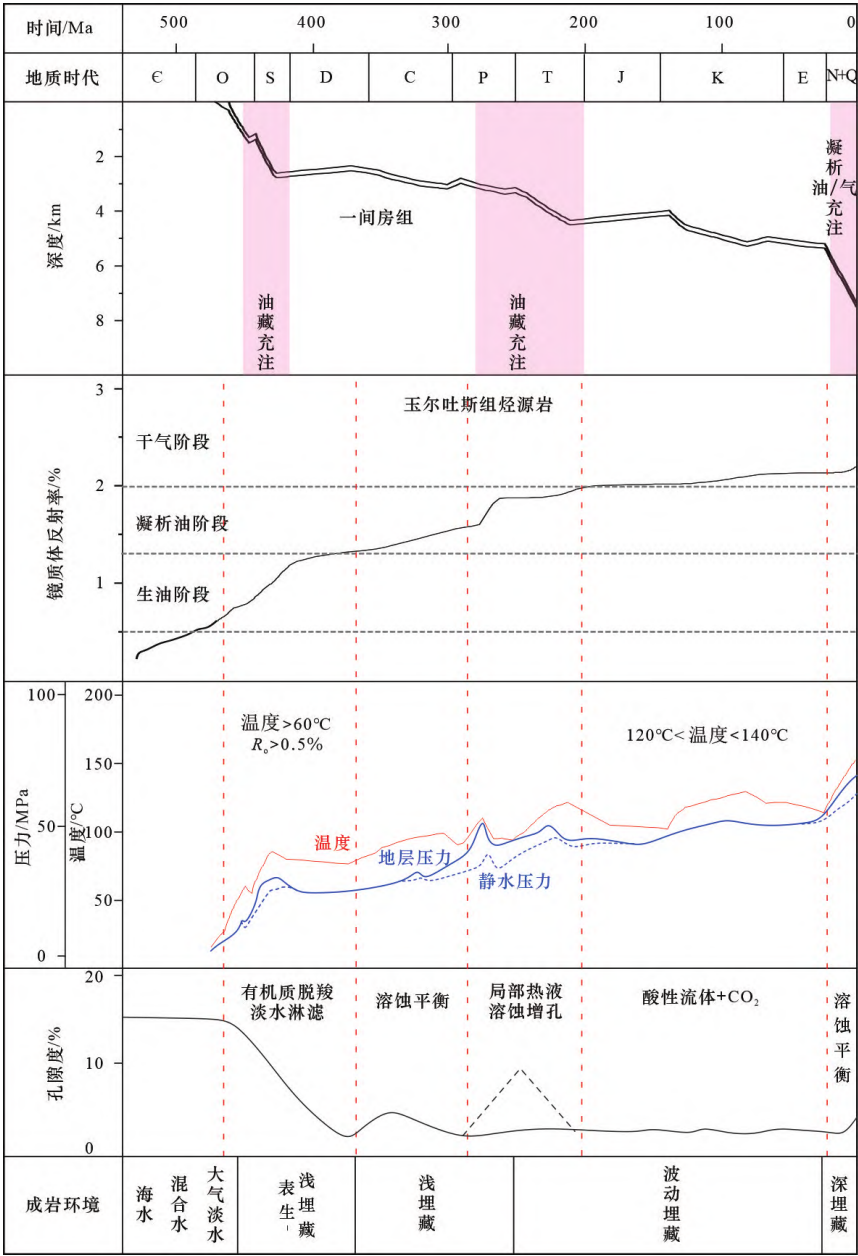


图 14 塔里木盆地台盆区奥陶系油气成藏特征与温度演化

Fig. 14 Temperature evolution characteristics of hydrocarbon accumulation in the Ordovician in the platform of the Tarim Basin

的影响下缓慢升温,溶蚀作用减弱(图 14)。三叠纪—古近纪,地层温度在波动埋藏的影响下缓慢升温,当地层温度超过 120 °C 时,烃类物质因热降解而产生 CO₂,叠加酸性流体的相互影响从而发生溶蚀作用,但强度相比早期较弱,对孔隙度的影响不大。晚期快速的深埋过程使储层遭受的深层成岩改造程度降低,早期形成的孔、洞和缝被保留至今,形成了现今丰富的储集空间^[72](图 14)。

5.3 温度场对原油裂解的影响

温度决定了原油是否裂解并影响油气的相态,传统意义上当温度超过 150 °C 时原油开始裂解生气^[73]。但随着深层—超深层油气勘探的发展,前人利用原油动力学参数计算得到了更高的生油窗温度,目前关于生油窗的温度范围还存在争议^[74-76]。塔里木盆地台盆区奥陶系储层现今为最大埋藏温度,且未达到原油大量裂解的温度,现今油气藏相态以轻质油—挥发油为主(图 8)。台盆区奥陶系为常压,仅在加里东中晚期、海西晚期和喜山期为常压—弱超压,而阿满过渡带中南部受构造挤压和流体充注影响在海西晚期和喜山期为超压状态^[70,77-79](表 2)。低温高压的背景下台盆区中部玉尔吐斯组烃源岩热演化程度受到抑制, R_o 降低约 0.5%, 现今仍有提供液态烃的可能性^[80-81](图 14)。ST1 井区在早二叠世已达到原油裂解温度,且温度超过 150 °C 的时间持续较长。前人研究表明 ST1 井区原油裂解程度较高,气油比高达 10 000 m³/m³,也证实了这一点^[82]。尽管 TZ62 井区奥陶系储层未达到原油裂解温度门限,但由于复杂的构造和成藏特征,塔中凸起的油气藏类型丰富,如塔中 1 号断裂带附近原油裂解程度较高并形成了工业性气藏^[83]。由此可见,原油是否裂解不完全依赖于地层温度,可能与形成的地质条件联系紧密,有待进一步研究。

6 结论

(1)塔里木盆地台盆区的大地热流从早古生代的 45~65 mW/m² 逐渐降至现今的 32~45 mW/m², 仅局部地区在早二叠世受岩浆活动影响出现短暂的热流高峰,为 46~62 mW/m²。另外,塔中凸起大地热流最高,塔北隆起和阿满过渡带东南部次之,阿满过渡带西北部最低。

(2)塔里木盆地台盆区奥陶系储层经历了早期缓慢升温 and 晚期快速升温的过程,局部地区在早二

叠世存在高异常。受控于大地热流背景和地层埋深影响,奥陶系一间房组储层在关键构造时期均表现出由中部向南北两侧降低的温度平面展布特征,与现今油气相态特征匹配。

(3)塔里木盆地台盆区奥陶系储层的溶蚀—沉淀作用和油气相态与温压密切相关。第一期溶蚀作用发生在晚奥陶世—志留纪,受控于有机质脱羧和大气淋滤等作用;第二期发生于二叠纪—古近纪,受控于酸性流体和岩浆活动。储层物性的改善为油气充注提供了充足的储集空间,长期低温高压背景有利于液态烃的保存。

参考文献

- [1] 何登发, 马永生, 刘波, 等. 中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 1-12.
- [2] 李建忠, 陶小晚, 白斌, 等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 52-67.
- [3] 顾忆, 黄继文, 贾存善, 等. 塔里木盆地海相油气成藏研究进展[J]. 石油实验地质, 2020, 42(1): 1-12.
- [4] 高利君, 李宗杰, 李海英, 等. 塔里木盆地超深层碳酸盐岩规模储层分类对比及特征分析[J]. 地质论评, 2020, 66(增刊 1): 54-56.
- [5] ZHU G Y, MILKOV A V, CHEN F R, et al. Non-cracked oil in ultra-deep high-temperature reservoirs in the Tarim Basin, China[J]. Marine and Petroleum Geology, 2018, 89: 252-262.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] QIU N S, CHANG J, ZHU C Q, et al. Thermal regime of sedimentary basins in the Tarim, Upper Yangtze and North China Cratons, China[J]. Earth-Science Reviews, 2022, 224: 103884.
- [9] LI M J, WANG T G, CHEN J F, et al. Paleo-heat flow evolution of the Tabei Uplift in Tarim Basin, Northwest China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2010, 37(1): 52-66.
- [10] LI D, CHANG J, QIU N S, et al. The thermal history in sedimentary basins: a case study of the central Tarim Basin, western China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2022, 229: 105149.
- [11] QIU N S, CHANG J, ZUO Y H, et al. Thermal evolution and maturation of Lower Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, Northwest China[J]. AAPG Bulletin, 2012, 96(5): 789-821.
- [12] CHANG J, YANG X, QIU N S, et al. Zircon (U-Th)/He

- thermochronology and thermal evolution of the Tarim Basin, western China [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 230: 105210.
- [13] 刘雨晨, 邱楠生, 常健, 等. 碳酸盐团簇同位素在沉积盆地热演化中的应用: 以塔里木盆地顺托果勒地区为例[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(2): 597-611.
- [14] CONG F Y, TIAN J Q, HAO F, et al. A thermal pulse induced by a Permian mantle plume in the Tarim Basin, Northwest China: constraints from clumped isotope thermometry and *in situ* calcite U-Pb dating[J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 2021, 126(4): e2020JB020636.
- [15] 李成, 王良书, 郭随平, 等. 塔里木盆地热演化[J]. *石油学报*, 2000, 21(3): 13-17, 107.
- [16] LIU Y C, DONG S Y, ZHAO C H. Thermal evolution and the maturation of the deeply buried Lower Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, Northwest China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(13): 1-19.
- [17] 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): 1-8.
- [18] 王步清, 黄智斌, 马培领, 等. 塔里木盆地构造单元划分标准、依据和原则的建立[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 86-93.
- [19] 安海亭, 李海银, 王建忠, 等. 塔北地区构造和演化特征及其对油气成藏的控制[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 142-147.
- [20] 李曰俊, 杨海军, 张光亚, 等. 重新划分塔里木盆地塔北隆起的次级构造单元[J]. *岩石学报*, 2012, 28(8): 2466-2478.
- [21] 杨海军, 陈永权, 田军, 等. 塔里木盆地轮探1井超深层油气勘探重大发现与意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(2): 62-72.
- [22] 李佳蔚, 李忠, 邱楠生, 等. 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[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(9): 3318-3329.
- [23] 何登发, 贾承造, 李德生, 等. 塔里木多旋回叠合盆地的形成与演化[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(1): 64-77.
- [24] 张光亚, 赵文智, 王红军, 等. 塔里木盆地多旋回构造演化与复合含油气系统[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(5): 653-663.
- [25] 田军, 王清华, 杨海军, 等. 塔里木盆地油气勘探历程与启示[J]. *新疆石油地质*, 2021, 42(3): 272-282.
- [26] 胡九珍, 冉启贵, 刘树根, 等. 塔里木盆地东部地区寒武系-奥陶系沉积相分析[J]. *岩性油气藏*, 2009, 21(2): 70-75.
- [27] ZHOU C X, YU S, HUANG W Y, et al. 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[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2021, 126: 104903.
- [28] 朱光有, 胡剑风, 陈永权, 等. 塔里木盆地轮探1井下寒武统玉尔吐斯组烃源岩地球化学特征与形成环境[J]. *地质学报*, 2022, 96(6): 2116-2130.
- [29] 漆立新. 塔里木盆地顺托果勒隆起奥陶系碳酸盐岩超深层油气突破及其意义[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(3): 38-51.
- [30] 焦方正. 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[J]. *石油与天然气地质*, 2018, 39(2): 207-216.
- [31] 吕修祥, 周新源, 李建交, 等. 塔里木盆地塔北隆起碳酸盐岩油气成藏特点[J]. *地质学报*, 2007, 81(8): 1057-1064.
- [32] 李映涛, 漆立新, 张哨楠, 等. 塔里木盆地顺北地区中-下奥陶统断溶体储层特征及发育模式[J]. *石油学报*, 2019, 40(12): 1470-1484.
- [33] SWEENEY J J, BURNHAM A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics [J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559-1570.
- [34] JACOB H. Classification, structure, genesis and practical importance of natural solid oil bitumen ("migrabitumen") [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1989, 11(1): 65-79.
- [35] 丰国秀, 陈盛吉. 岩石中沥青反射率与镜质体反射率之间的关系[J]. *天然气工业*, 1988, 8(3): 20-25.
- [36] 刘德汉, 史继扬. 高演化碳酸盐烃源岩非常规评价方法探讨[J]. *石油勘探与开发*, 1994(3): 113-115.
- [37] BERTRAND R, MALO M. Dispersed organic matter reflectance and thermal maturation in four hydrocarbon exploration wells in the Hudson Bay Basin: regional implications [J]. *Geological Survey of Canada*, 2012, 7066: 1-52.
- [38] 杨海军, 于双, 张海祖, 等. 塔里木盆地轮探1井下寒武统烃源岩地球化学特征及深层油气勘探意义[J]. *地球化学*, 2020, 49(6): 666-682.
- [39] 熊昱杰. 利用碳酸盐团簇同位素恢复海相沉积盆地热历史: 以塔中地区奥陶系为例奥陶系为例[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2022.
- [40] 齐永安, 刘国强. 沉积盆地波动分析与不整合剥蚀量研究: 以新疆塔里木盆地为例[J]. *焦作工学院学报*, 1999, 18(3): 161-165.
- [41] 张一伟, 金之钧, 刘国臣, 等. 塔里木盆地环满加尔地区主要不整合形成过程及剥蚀量研究[J]. *地学前缘*, 2000, 7(4): 449-457.
- [42] 张庆春, 石广仁, 田在艺. 盆地模拟技术的发展现状与未来展望[J]. *石油实验地质*, 2001, 23(3): 312-317.
- [43] 石广仁. 盆地模拟技术30年回顾与展望[J]. *石油工业计算机应用*, 2009(1): 3-6, 71.
- [44] 苑坤, 陈彬滔, 于兴河, 等. 盆地模拟技术与 BasinMod 软件应用[J]. *沉积与特提斯地质*, 2010, 30(2): 55-60.
- [45] SCLATER J G, CHRISTIE P A F. Continental stretching: an explanation of the Post-Mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea Basin [J]. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 1980, 85(B7): 3711-3739.
- [46] 王铁冠, 戴世峰, 李美俊, 等. 塔里木盆地台盆区地层有机质热史及其对区域地质演化研究的启迪[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(10): 1331-1341.
- [47] 刘雨晨. 塔里木盆地顺托果勒低隆起及周缘热演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [48] FJELDSKAAR W, HELSET H M, JOHANSEN H, et al. Thermal modelling of magmatic intrusions in the Gjallar

- Ridge, Norwegian Sea: implications for vitrinite reflectance and hydrocarbon maturation[J]. *Basin Research*, 2008, 20(1): 143-159.
- [49] LU Z Y, CHEN H H, QING H R, 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.
- [50] 陈横俊, 何登发, 孙方源, 等. 塔北隆起晚奥陶世一中泥盆世古隆起格局演变[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(2): 285-298.
- [51] 杨树锋, 陈汉林, 厉子龙, 等. 塔里木早二叠世大火成岩省[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(2): 187-199.
- [51] 余星, 杨树锋, 陈汉林, 等. 塔里木早二叠世大火成岩省的成因模式[J]. *中国科学: 地球科学*, 2017, 47(10): 1179-1190.
- [52] 陈红汉, 吴悠, 丰勇, 等. 塔河油田奥陶系油气成藏期次及年代学[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(6): 806-819.
- [53] YE N, ZHANG S N, LU C J, et al. Fluid inclusions record hydrocarbon charge history in the Shunbei area, Tarim Basin, NW China[J]. *Geofluids*, 2020, 2020: 8847247.
- [54] 高波, 刘文汇, 范明, 等. 塔河油田成藏期次的地球化学示踪研究[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(3): 276-280.
- [55] LI M J, WANG T G, LILLIS P G, et al. The significance of 24-norcholestanes, triaromatic steroids and dinosteroids in oils and Cambrian-Ordovician source rocks from the cratonic region of the Tarim Basin, NW China[J]. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(8): 1643-1654.
- [56] 赵靖舟, 李启明. 塔里木盆地克拉通区海相油气成藏期与成藏史[J]. *科学通报*, 2002, 47(增刊1): 116-121.
- [57] 张育民. 塔里木盆地卡塔克隆起斜坡区油气成藏期次研究[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(6): 1015-1023.
- [58] SCHMOKER J W, HALLY R B. Carbonate porosity versus depth: a predictable relation for South Florida[J]. *AAPG Bulletin*, 1982, 66: 2561-2570.
- [59] EHRENBURG S N, NADEAU P H, STEEN. Petroleum reservoir porosity versus depth: influence of geological age[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(10): 1281-1296.
- [60] SALLER A H. Facies control on dolomitization and porosity in the Devonian Swan Hills Formation in the Rosevear area, West-central Alberta[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 2001, 49(4): 458-471.
- [61] VANDEGINSTE V, SWENNEN R, REED M H, et al. Host rock dolomitization and secondary porosity development in the Upper Devonian Cairn Formation of the Fairholme carbonate complex (South-west Alberta, Canadian Rockies): diagenesis and geochemical modelling[J]. *Sedimentology*, 2009, 56(7): 2044-2060.
- [62] 何治亮, 马永生, 朱东亚, 等. 深层-超深层碳酸盐岩储层理论技术进展与攻关方向[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 533-546.
- [63] 邱楠生, 刘雯, 徐秋晨, 等. 深层-古老海相层系温压场与油气成藏[J]. *地球科学*, 2018, 43(10): 3511-3525.
- [64] 解习农, 成建梅, 孟元林. 沉积盆地流体活动及其成岩响应[J]. *沉积学报*, 2009, 27(5): 863-871.
- [65] 彭军, 王雪龙, 韩浩东, 等. 塔里木盆地寒武系碳酸盐岩溶蚀作用机理模拟实验[J]. *石油勘探与开发*, 2018, 45(3): 415-425.
- [66] 蒋小琼, 王恕一, 范明, 等. 埋藏成岩环境碳酸盐岩溶蚀作用模拟实验研究[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(6): 643-646.
- [67] 丁茜, 何治亮, 沃玉进, 等. 高温高压条件下碳酸盐岩溶蚀过程控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 784-791.
- [68] 赵靖舟, 李军, 徐泽阳. 沉积盆地超压成因研究进展[J]. *石油学报*, 2017, 38(9): 973-998.
- [69] 陈建平, 王绪龙, 倪云燕, 等. 准噶尔盆地南缘天然气成藏及勘探方向[J]. *地质学报*, 2019, 93(5): 1002-1019.
- [70] 贾京坤. 塔里木盆地顺托果勒低隆起奥陶系地层压力演化研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2019.
- [71] 郑和荣, 刘春燕, 吴茂炳, 等. 塔里木盆地奥陶系颗粒石灰岩埋藏溶蚀作用[J]. *石油学报*, 2009, 30(1): 9-15.
- [72] 倪新锋, 张丽娟, 沈安江, 等. 塔里木盆地英买力-哈拉哈塘地区奥陶系岩溶储集层成岩作用及孔隙演化[J]. *古地理学报*, 2010, 12(4): 467-479.
- [73] QUIGLEY T M, MACKENZIE A S. The temperatures of oil and gas formation in the sub-surface[J]. *Nature*, 1988, 333(6173): 549-552.
- [74] 马安来. 塔河油田不同类型海相原油裂解动力学分析[J]. *天然气地球科学*, 2015, 26(6): 1120-1128.
- [75] 刘岩, 杨池银, 肖敦清, 等. 裂陷湖盆深层烃类赋存相态极限的动力学过程分析: 以渤海湾盆地歧口凹陷为例[J]. *天然气地球科学*, 2017, 28(5): 703-712.
- [76] 李慧莉, 马安来, 蔡勋育, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系超深层原油裂解动力学及地质意义[J]. *石油实验地质*, 2021, 43(5): 818-825.
- [77] 王梅玲, 叶德胜. 塔里木盆地北部地层压力分布特征与油气关系[J]. *新疆石油地质*, 1998, 19(2): 121-125.
- [78] 刘可禹, JULIEN B, 张宝收, 等. 应用流体包裹体研究油气成藏: 以塔中奥陶系储集层为例[J]. *石油勘探与开发*, 2013, 40(2): 171-180.
- [79] 张翀, 田隆, 邢永亮, 等. 塔中地区奥陶系储层烃包裹体特征及成藏分析[J]. *岩石学报*, 2011, 27(5): 1548-1556.
- [80] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 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[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 22-30.
- [81] 顾忆, 万旻璐, 黄继文, 等. “大埋深、高压”条件下塔里木盆地超深层油气勘探前景[J]. *石油实验地质*, 2019, 41(2): 157-164.
- [82] 马安来, 何治亮, 云露, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系超深层天然气地球化学特征及成因[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(7): 1047-1060.
- [83] 张敏, 黄光辉, 王祥, 等. 原油裂解气的地球化学特征、形成条件与资源评价: 以塔里木盆地台盆区为例[J]. *石油天然气学报*, 2009, 31(6): 38-43, 181.