

引用本文:丁勇,潘泉涌.地温梯度在塔里木盆地古生界热演化研究中的应用[J].石油实验地质,2024,46(3):451-459. DOI: 10.11781/sysydz202403451.

DING Yong, PAN Quanyong. Application of geothermal gradient in the study of thermal evolution of Paleozoic source rocks, Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2024, 46(3): 451-459. DOI: 10.11781/sysydz202403451.

地温梯度在塔里木盆地 古生界热演化研究中的应用

丁勇,潘泉涌

中国石化 西北油田分公司, 乌鲁木齐 830011

摘要:塔里木盆地古生界烃源岩热史研究,特别是对超深古老烃源岩热演化认识存在较大争议,热演化阶段评价方法一直是困扰烃源岩热史研究的关键问题。调研结果表明,塔里木盆地寒武系古地温梯度变化在 2.95~3.6 °C/hm 之间,按照生烃温度阈值 65 °C 计算,分别需要上覆地层厚度 2 203~1 806 m,相差 397 m,即 2.58 °C,温度差值较小。因此认为,塔里木盆地寒武系古地温梯度变化较小,可以忽略每期地温梯度取值上的差别,厚度可能是决定温度的主要因素;地层沉积与残留厚度可比较准确地获得,误差主要取决于剥蚀厚度的恢复。通过可靠获取的地层厚度、古地温梯度和剥蚀厚度等参数,以及烃源岩生烃图版,对塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组烃源岩热演化阶段进行了评价;界定了关键期环满加尔坳陷的有效烃源岩及其分布,对玉尔吐斯组有效烃源岩及其规模生烃能力进行了预测和划分,并预测和划分了晚期成藏的有利区域。不同阶段有效烃源岩及其规模生烃量是每期成藏富集的关键,利用该方法避免了成熟度判别缺少可靠温标的问题,为塔里木盆地深层—特深层石油勘探和开发以及晚期成藏有利区的选择提供了重要的科学依据。

关键词:地温梯度;成熟度;有利区预测;有效烃源岩;玉尔吐斯组;寒武系;塔里木盆地

中图分类号:TE122.11

文献标识码:A

DOI:10.11781/sysydz202403451

Application of geothermal gradient in the study of thermal evolution of Paleozoic source rocks, Tarim Basin

DING Yong, PAN Quanyong

SINOPEC Northwest Oilfield Company, Urumqi, Xinjiang 830011, China

Abstract: Considerable debate has arisen regarding studies of the thermal history of Paleozoic source rocks in the Tarim Basin, particularly regarding the thermal evolution of ultra-deep, ancient source rocks. The evaluation method for the thermal evolution stages has long been a key issue in the study of source rocks' thermal history. Research findings revealed that the Cambrian paleo-geothermal gradient in the Tarim Basin varies between 2.95 and 3.6 °C/hm. Based on the hydrocarbon generation threshold temperature of 65 °C, the required overlying strata thickness ranges from 2 203 to 1 806 m, with a difference of 397 m, equivalent to 2.58 °C, showing a relatively small temperature difference. Thus, it is considered that the variation in the Cambrian paleo-geothermal gradient in the Tarim Basin is minimal, allowing the differences in geothermal gradient values for each period to be ignored, and that thickness may be the main determinant of temperature. The sedimentation and residual thickness of the strata can be accurately obtained, with the error mainly depending on the restoration of the denudation thickness. The thermal evolution stages of the Cambrian Yurtus Formation source rocks in the Tarim Basin were evaluated using reliably obtained parameters such as strata thickness, paleo-geothermal gradient, denudation thickness, and hydrocarbon generation charts of source rocks. With this assessment, the effective source rocks and their distribution in the key period of the Manjiaer Depression were delineated. Moreover, the effective source rocks of the Yurtus Formation, their large-scale hydrocarbon generation capacity, and the favorable areas for late-stage

收稿日期 (Received): 2023-07-17; 修订日期 (Revised): 2024-04-23; 出版日期 (Published): 2024-05-28.

作者简介: 丁勇 (1968—), 男, 博士, 研究员, 从事烃源岩与油气成藏富集规律勘探综合研究。E-mail: 178932832@qq.com.

基金项目: 中国石化科技部项目“满加尔坳陷及周缘油气成藏主控因素与选区评价”(P23186)资助。

© Editorial Office of Petroleum Geology & Experiment. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

hydrocarbon accumulation were predicted and classified. The effective source rocks at different stages and their large-scale hydrocarbon generation potential are crucial for hydrocarbon accumulation in each period. This method avoids the issue of unreliable temperature scales in maturity identification, providing an important scientific basis for deep and ultra-deep oil exploration and development in the Tarim Basin and for selecting favorable areas for late-stage hydrocarbon accumulation.

Key words: geothermal gradient; maturity; favorable area prediction; effective source rock; Yurtus Formation; Cambrian; Tarim Basin

塔里木盆地台盆区主力烃源岩以寒武系为主, 烃源岩层位老、埋藏深、厚度薄、热演化程度高、钻井揭示少, 并经历了多期构造演化; 制约与困扰台盆区油气勘探的主要问题是古生界有效烃源岩分布与演化及资源规模的认识。目前使用的反映烃源岩成熟度的指标主要有等效镜质体反射率(由固体沥青反射率换算而来^[1])、包裹体测温、U-Th 测年^[2]、同位素测年、色变指数、拉曼光谱、油气地化特征指标等, 但由于缺乏统一的成熟度标尺, 不同学者给出的成熟度数值存在明显差异, 影响了烃源岩生烃潜力与阶段的评价^[3]。

烃源岩热演化史一般是基于均质镜质体反射率来评价的, 但古生界烃源岩没有均质镜质体, 也就是说古生界烃源岩没有可测的均质镜质体, 大多是基于目前使用的等效镜质体反射率^[4]。程顶胜等^[5]研究发现, 沥青反射率作为成熟度标尺存在以下问题: 沥青成因复杂、分类及命名不统一; 沥青可发育成不同光学结构, 影响其反射率, 存在光性完全不同的沥青共生现象; 沥青很难区分出前油沥青和后油沥青, 反射率测值极其分散。

如何评价高过成熟下古生界烃源岩成熟度, 不同学者开展了大量模拟实验等研究, 提出了新的古生界成熟度指标。程顶胜等^[5]提出镜状体反射率, 通过热模拟实验建立镜状体反射率与镜质体反射率之间的关系, 但镜质体反射率如何确定也是不确定因素^[3]。此外, 镜状体反射率作为下古生界烃源岩有机质成熟度指标, 主要适用于镜质体反射率在 1.0%~2.0% 阶段^[3]。激光拉曼光谱参数^[6]虽然可以判断有机质成熟度, 但在拉曼光谱分析中的测点应对准镜质组; 徐秋晨等^[7-8]提出碳酸盐团簇同位素作为一种新兴的古温标, 在碳酸盐岩地层热史研究中展现出了巨大的潜力, 但还存在很多挑战: (1) 不同岩性之间热性质相差较大, 而针对不同岩性的团簇同位素热演化模型还未建立; (2) 如何排除后期成岩作用对团簇同位素的影响等。

古生界烃源岩热演化评价主要问题可以归结到缺乏可靠的热演化评价方法, 存在很大不确定性和多解性^[9-10]。烃源岩热演化是一项重要评价依

据, 但古生界烃源岩缺少可靠的温标^[11], 前期方法存在大量样品取得难、分析周期长、实验费用高、对烃源岩热演化认识存在不确定性和较大争议等问题, 因此有必要为古生界烃源岩热演化评价提供一种可信度较高、快捷的新方法和依据。本文提供了一种利用可靠获取地层厚度和相对可靠的剥蚀厚度、古地温梯度及其变化来约束与评价烃源岩热演化阶段的方法。宏观约束下, 在一定程度上解决了古生界烃源岩成熟度判识缺少可靠温标的问题。在原始地层厚度恢复准确前提下, 利用不同构造期地温梯度来评价估算烃源岩演化阶段(达到的温度)相对可信度较高。

1 原理与基础

烃源岩演化史、生烃阶段与古地温有密切关系, 烃源岩演化是地温梯度与埋藏史(沉积厚度)共同决定的。前人利用地温梯度^[12-13]及地温场^[14-19]、盆地热史^[20]、烃源岩热演化史及生烃阶段^[21-23]、有机质热演化特征^[10, 24-27]开展了大量研究与应用, 主要目的是对盆地热史、岩石热导率^[28]、烃源岩热演化史与成藏期的研究, 并取得了很好的应用。塔里木盆地古地温场及其分布特征的认识基本明确。前人^[28]研究表明, 塔里木盆地岩石热导率有随地层变老而增大的趋势, 寒武系地层的热导率最高为 3.8 W/(m·K); 就不同岩性而言, 白云岩和灰岩热导率略高, 砂、泥岩次之。塔里木盆地是一个“冷幔冷壳”的冷盆, 热流的平均数值为 (42.5 ± 7.6) mW/m², 盆地现今热状态最关键的 控制因素是深部结构和基底的起伏形态; 隆起区温度高, 坳陷区温度相对低。地温场分布规律为地温梯度取值提供了参考依据。

对塔里木盆地古地温梯度取值及其变化大体已形成共识, 即“早热晚冷”^[29], 总体上, 关键阶段的古地温梯度取值变化不大, 取值差异对成熟演化影响小。以寒武系地温梯度为例, 塔里木盆地寒武系古地温梯度变化在 2.95~3.6 °C/hm 之间, 按照生烃温度门槛值 65 °C 计算, 分别需要上覆地层厚度 2 203~1 806 m, 相差 397 m, 即 2.58 °C 温度差值,

因此认为古地温梯度取值上对温度差值影响较小。正因为地温梯度在每期的取值差异造成的温度差别较小,因此可以忽略古地温梯度取值上的差别,这为利用古地温梯度评价烃源岩演化阶段奠定了基础。

阶段沉积厚度可能是决定温度的主要因素,阶段沉积厚度对温度增加,包括“幕式”^[30-32]生烃增温起到了决定性作用。以满加尔生烃坳陷为例,仅上奥陶统与志留系厚度达4 000 m的快速沉积,以地温梯度3 °C/hm来估算,这两地层增温为120 °C,已达到烃源岩生烃高峰温度。因此沉积厚度对增温,特别是“幕式”增温影响较大,地层沉积与残留厚度在每期的演化分析中影响较大。利用主要古地温梯度来分析古生界热演化的基础是各演化期的原始地层沉积及其厚度,而地层沉积残留厚度和剥蚀厚度可以准确计算出,误差主要取决于剥蚀厚度的恢复,因此可以忽略每期(构造演化期)的地

温梯度取值上的差别。

基于上述分析,可以依次利用主要构造期地层沉积厚度乘以该期的地温梯度获得该期增加的温度,再累计前一期基准温度,就可以用烃源岩生烃图版来评价烃源岩演化阶段及其有效烃源岩的分布。以往很少把地温梯度作为烃源岩演化阶段的温标及评价不同演化阶段“有效”烃源岩的依据,本方法利用可靠的地层厚度和相对可靠的剥蚀厚度、古地温梯度及其变化,来约束与评价烃源岩热演化阶段,宏观约束避免了成熟度判识缺少可靠温标的问题,分析出的成熟度及阶段相对可信度较高。

2 方法与步骤

2.1 明确主要构造期地温梯度取值范围

首先确定研究区主要构造期地温梯度及其分布。通过调研,确定研究区不同学者用的地温梯度(表1)^[20,33-34],为每期选取地温梯度计算古地温提

表1 塔里木盆地古地温梯度研究成果概览
Table 1 Summary of paleo-geothermal gradient research results of Tarim Basin

构造单元	井号	不同时代的古地温梯度/(°C/hm)											资料来源			
		Q	N	E	K	J	T	P	C	D	S	O ₂₊₃		O ₁	€	
塔北隆起	YM1	1.72	2.72	2.90	2.90	2.90	3.00	3.20	3.20	3.00	3.00	3.50				
	H1	2.00	2.22	2.50	2.60	2.70	2.90									
	LN46	2.00	2.20	2.65	2.70	2.80	3.00	3.20	3.20	3.00	3.00	3.50	3.50			
	LN1	2.00	2.30	2.65	2.70	2.80	3.00	3.30	3.30	3.30	3.30	3.30	3.50			李慧莉等 ^[20]
	LN5	1.82	2.45	2.70	2.80	2.85	3.00	3.20	3.10	3.05	3.05	3.05	3.50			
	YM1	1.70	2.70	2.90	2.90	2.90	3.00	3.20	3.20	3.00	3.00	3.50				
	LN46	2.00	2.20	2.70	2.80	3.00	3.20	3.20	3.00	3.00	3.50	3.50				
	LN5	2.00	2.40	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.00	3.00	3.00	3.10	3.10			潘长春等 ^[33]
满加尔坳陷	MX1	1.70	2.40	2.70	2.80	2.90	3.00	3.20	3.20							
	QK1	2.00	2.20	2.60	2.70	2.80	3.00	3.10	3.00	2.85	2.85	2.85				李慧莉等 ^[20]
	MX1	1.70	2.40	2.70	2.80	2.90	3.00	3.20	3.20							
	QK1	2.00	2.20	2.60	2.70	2.80	3.00	3.10	3.00	2.90	2.90	2.90				
	KQ1									3.20	3.50	3.50				邱楠生等 ^[34]
中央隆起带	H2	2.00	2.20	2.50	2.60	2.60	2.60	2.60	3.00							
	TZ1	2.05	2.60	3.00	3.05	3.05	3.10	3.20	3.20	2.90	2.90	2.90	3.50	3.50		
	TD1	2.25	2.65	3.05	3.10	3.10	3.15	3.20	3.85	3.85	3.85	3.85	3.50	3.60		
	TZ12	2.20	2.50	2.80	3.00	3.00	3.10	3.20	3.20	3.00	3.00	3.35	3.50			
	TAC1	2.20	2.60	2.70	2.80	2.90	3.00	3.15	3.15	3.00	3.00	3.40	3.45	3.45		
	H4	2.00	2.20	2.40	2.60	2.60	2.60	2.90	2.90	2.70	2.70	2.90	2.98	2.95		
	TZ12	2.20	2.50	2.80	3.00	3.00	3.10	3.50	3.20	3.00	3.00	3.40	3.40			
	TAC1	2.20	2.60	2.70	2.80	2.90	3.10	3.50	3.20	3.00	3.00	3.00	3.10	3.30		李慧莉等 ^[20]
	H4	1.90	2.10	2.40	2.60	2.60	2.60	3.50	2.90	2.70	2.70	3.20	3.00	3.00		
	TD1	2.30	2.70	3.00	3.10	3.10	3.20	3.20	3.80	3.80	4.00	4.00	3.50	3.60		
	TZ1	2.00	2.50	2.60	2.70	2.80	2.90	3.10	3.00	3.00	3.00	3.10	3.10	3.20		
	TD1	2.30	2.50	2.60	2.70	2.90	3.30	3.60	3.60	3.60	3.60	3.70	3.70	3.80		
	TC1、TZ12、TZ45	2.20	2.50	2.50	2.60	2.80	2.90	3.00					3.20	3.30	3.50	
TZ10		2.50	2.60	3.00	3.10	3.10	3.06	3.06	2.90	2.90	3.54					
TI									3.10	3.40	3.00	3.30	3.00			
西南坳陷	Q3	2.10	2.50	2.85	2.85	2.85	2.85	2.85	3.20							李慧莉等 ^[20]
	Q3	2.10	2.50	2.80	2.80	2.80	2.80	2.80	3.20							

供依据。

从表 1 可以看出,不同地区、不同层位古地温梯度存在一定的差异,但“早热晚冷”、隆起区温度高、坳陷区温度相对低的趋势明显。就下古生界烃源岩演化而言,关注的主要是满加尔坳陷区及塔北隆起区等下古生界烃源岩发育与分布区的古地温梯度及其取值。

加里东晚期,塔北隆起区地温梯度取值为 3.0~3.5 °C/hm,而满加尔坳陷区地温梯度取值为 2.85~2.9 °C/hm。制约塔里木盆地古生界烃源岩评价最主要的问题是古生界烃源岩在加里东期成熟度是否较高到过成熟,而塔里木盆地具有加里东期是热盆而晚期逐步向冷盆演变的趋势^[35-36],基于隆起区地温梯度相对较高但埋藏浅(上覆地层厚度小)、坳陷区烃源岩的地温梯度相对低但埋藏深(上覆地层厚度大)的综合考虑,隆起区地温梯度统一取低值,取值为 3.0 °C/hm。

海西晚期,塔北隆起区地温梯度取值为 3.0~3.3 °C/hm,而满加尔坳陷区地温梯度取值为 3.1~3.2 °C/hm。同上,综合考虑取隆起区地温梯度低值,为 3.0 °C/hm。

燕山晚期,塔北隆起区地温梯度取值为 2.7~2.9 °C/hm,而满加尔坳陷区地温梯度取值为 2.7~2.8 °C/hm。同上,综合考虑取隆起区地温梯度低

值,为 2.7 °C/hm。

喜马拉雅期,塔北隆起区地温梯度取值为 1.7~2.0 °C/hm,满加尔坳陷区地温梯度取值也为 1.7~2.0 °C/hm。同上,综合考虑取隆起区地温梯度低值,为 1.7 °C/hm。

关键期烃源区古地温梯度取值确定后,玉尔吐斯组烃源岩在每期的演化主要取决于每期上覆地层的累积厚度。

2.2 地层残余厚度与沉积厚度恢复

本次利用单井、连井残余地层、地层对比与沉积演化特征,开展了地层残余厚度解释与地层每期剥蚀量的计算。

塔里木盆地是一个典型的叠合盆地,主要经历了加里东期、海西期、印支期、燕山期、喜马拉雅期等多期构造运动^[37]。其中,对台盆区烃源岩热演化影响较大的是加里东期、海西期构造运动,造成部分地区不整合面的叠置,对不同构造期剥蚀厚度的恢复造成挑战,特别是在塔北地区,部分井石炭系直接覆盖在奥陶系鹰山组之上,多个剥蚀界面叠置(图 1)。针对盆地性质、资料情况以及前人早期研究经验,对剥蚀方法进行了筛选,最终确定了层序总剥蚀量恢复方法,即以未剥蚀区原始地层变化趋势为依据,结合盆地边界类型认识,利用原始沉积厚度恢复模式,恢复塔里木盆地各关键界面剥蚀

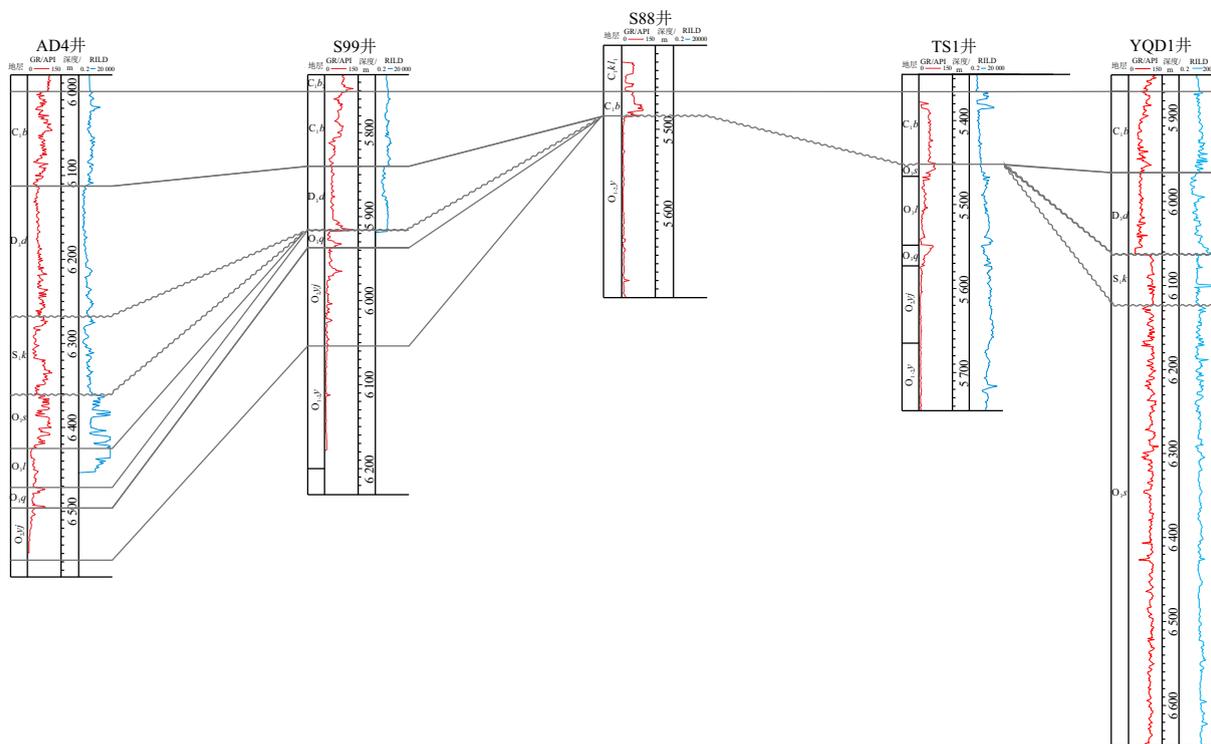


图 1 塔里木盆地塔北地区 AD4-S99-S88-TS1-YQD1 连井对比
连井位置见图 2。

Fig.1 Stratigraphic comparison of wells AD4, S99, S88, TS1 and YQD1 in Tabei area, Tarim Basin

厚度^[38]。主要恢复了 T_7^0 、 T_6^0 、 T_5^0 、 T_4^0 、 T_3^0 等几个关键界面的剥蚀厚度。

奥陶纪末期塔里木盆地构造变形,盆地遭到强烈挤压和隆升,形成了奥陶纪末期广泛分布的角度到微角度不整合面—— T_7^0 界面,界面下伏地层遭到了强烈的挤压变形,代表盆地演化上的一次重要的变革。区域挤压作用使盆地的东南缘和巴楚隆起一带大规模隆起,其次是塔北西北缘;塔东南、巴楚地区剥蚀量为 500~1 000 m,塔北西北缘为 300~500 m,这与盆地整体的南北挤压构造背景有关。

二叠纪末期的海西晚期构造运动(相当于 T_5^0 界面形成时期)是一次重要的构造变革时期,其上、下构造特征和沉积特征发生巨大的变化,石炭纪—二叠纪构成了一个从克拉通边缘坳陷到弧后前陆盆地的完整的开合旋回。 T_5^0 关键变革期对下伏构造层的剥蚀主要分布在塔北地区和库车地区,剥蚀量为 600~1 000 m,这与塔里木板块与天山板块持续的碰撞活动有关。

印支期—燕山期构造运动剥蚀量较小,台盆区普遍剥蚀 100~300 m,对寒武系烃源岩热演化影响较小。

本文关注的主要是加里东晚期主力最低演化烃源层黑土凹组($O_{1-2}h$)的热演化程度。根据地层残余厚度与沉积厚度,恢复了塔里木盆地上奥陶统一志留系地层累积厚度(图 2),为判识演化程度(地温)提供了依据。

通过对塔里木盆地地质历史时期地表温度演化与大地热流值的研究,选取低值地温梯度($3\text{ }^\circ\text{C/hm}$),

参照塔里木盆地上奥陶统一志留系地层厚度图,对满加尔坳陷寒武系—中下奥陶统烃源岩演化进行了预测。参考张水昌的研究成果^[39](图 3),得出加里东晚期主力最低演化烃源层($O_{1-2}h$)对应的 R_o 值(等效镜质体反射率)都在生油高峰期,接近生油结束界限的 1.3%。按照加里东期地温梯度($3\text{ }^\circ\text{C/hm}$)可以估算出上覆累积厚度达 4 000 m 的满加尔坳陷主体区,在志留系沉积之后热演化温度已达 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的生烃高峰期;根据烃源岩主生烃

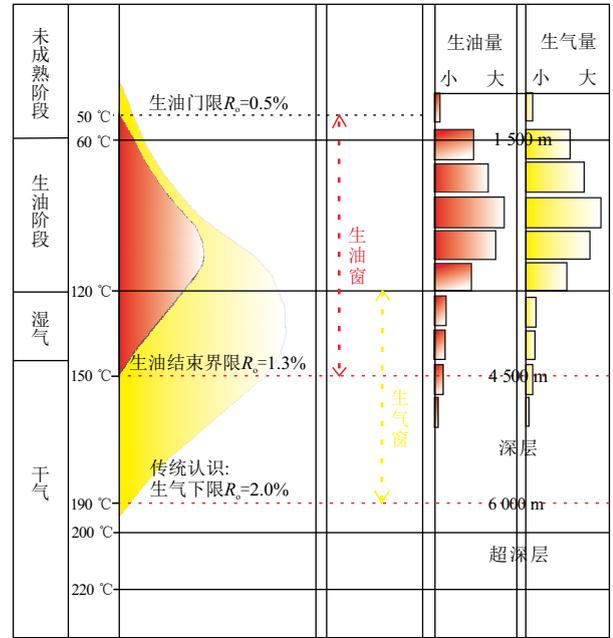


图 3 传统油气生成演化模式和勘探黄金带^[39]
Fig.3 Traditional hydrocarbon generation and evolution model and prime exploration area

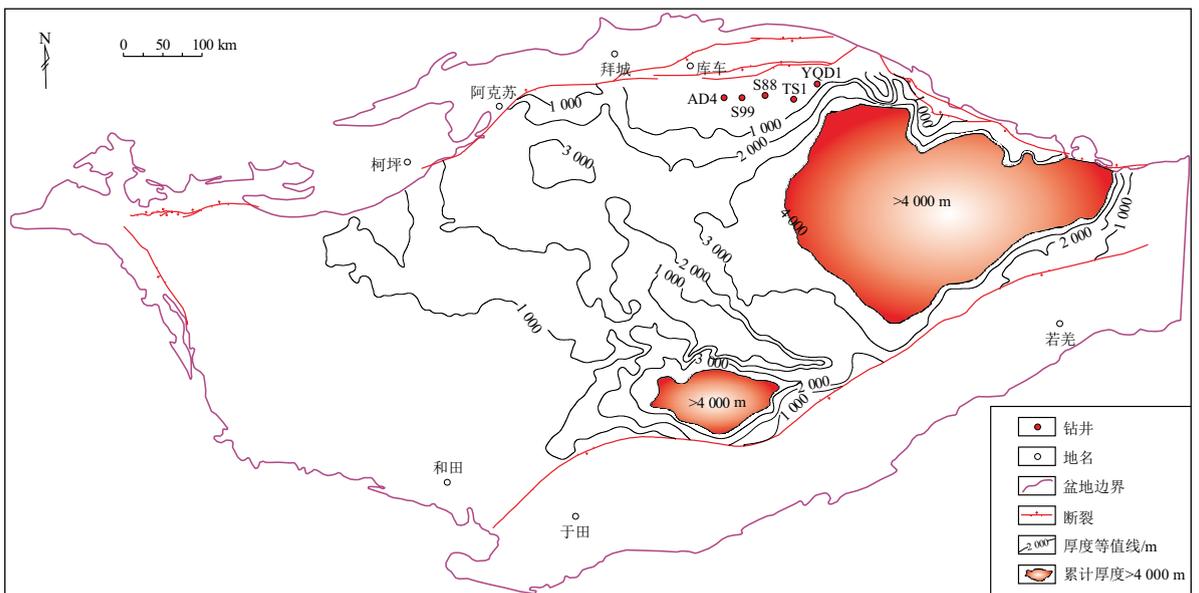


图 2 塔里木盆地上奥陶统一志留系地层厚度分布

Fig.2 Thickness distribution of Upper Ordovician and Silurian strata in Tarim Basin

阶段对应的烃源岩演化 R_o 在 1.3% 左右^[39], 对于玉尔吐斯组烃源岩, 考虑到处于下奥陶统和中上寒武统、上奥陶统一志留系累积厚度 4 000 m 以上的地区, R_o 值已基本超生油结束界限 (1.3%)。

2.3 钻井热演化史研究

利用单井沉积厚度恢复与古地温梯度获取了不同构造期单井的热演化温度。参考张水昌的文献^[39]中温度与 R_o 的对应关系 (图 3), 得出对应的 R_o 值, 再利用连井获取不同方向、不同层位热演化温度换算出 R_o 值及其分布, 在此基础上对顺北地区北西向剖面进行了地层热史的恢复 (图 4)。剖面由东向西过 St1 井、Sb41 井、2 号和 5 号断裂带, 加里东晚期玉尔吐斯组烃源岩由东南向北西逐渐成熟。东南以 St1 井为例, 在加里东晚期玉尔吐斯组烃源岩已达到成熟晚期 (R_o 达到 1.1%), 北西方向的 Sb5 井才刚进入成熟早期 ($R_o = 0.7%$); 海西晚期, 东南部已达到高成熟 ($R_o = 1.6%$), 北西方向才达到成熟晚期 (R_o 达到 1.2%); 燕山晚期, 演化程度持续升高, 东南局部已达到过成熟 (R_o 在 2.0% 以上), 北西边缘逐步进入高成熟阶段 (R_o 在 1.3% ~ 2.0%); 现今, 玉尔吐斯组烃源岩大部分都处于过成熟, 局部地区处于高成熟阶段 (图 4)。

3 效果与意义

对于 I—II 型烃源岩来说, R_o 在 1.3% 左右基本达到最大生烃高峰, 后期主要是干酪根和原油裂

解生气过程, 总生烃量增加幅度相对有限并大幅降低。从生排烃规模与生烃类型来看, 我们更关注 R_o 在 1.3% 左右、1.3% ~ 1.5% 以及大于 2.0% 几个关键烃源岩演化期。用此方法约束, 分析了烃源岩热演化阶段与有效烃源岩分布, 提出环满加尔坳陷油气成藏富集取决于关键烃源岩演化期有效烃源岩及其规模生烃量。

上奥陶统一志留系地层累积厚度 (图 2) 乘以 3.0 °C/hm 地温梯度分布表明, 加里东期之后明显“缩水” (晚期有效生烃区在不断减小+最大生烃高峰之后快速递减) 后的寒武系烃源岩晚期供烃能力明显下降; 晚期生烃有效烃源岩分布随着热演化的增高而大幅减小, 晚期有利生烃区局限在北塔里木西北部和南塔里木中西部。

为了更好地反映不同期烃源岩生烃潜力, 在有效烃源岩分布和不同地区热演化史分析基础上, 编制了塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组燕山晚期至喜马拉雅晚期 ΔR_o 变化分布图, 首次预测和划分了晚期成藏有利区域 (图 5)。其中, 燕山晚期至喜马拉雅晚期 ΔR_o 在 0.2% 以上的区域表明晚期烃源岩热演化明显增高, 符合“幕式”^[40-42] 生烃要求, 生烃潜力较大; 燕山晚期至喜马拉雅晚期 ΔR_o 在 0.2% 以下的区域表明晚期基本没有快速生烃潜力。因此认为, 晚期规模生烃量是晚期油气成藏富集的关键, 环满加尔坳陷西北缘、阿瓦提坳陷东北缘、塔西南的西南晚期成藏潜力较大, 可为深层—超深层勘

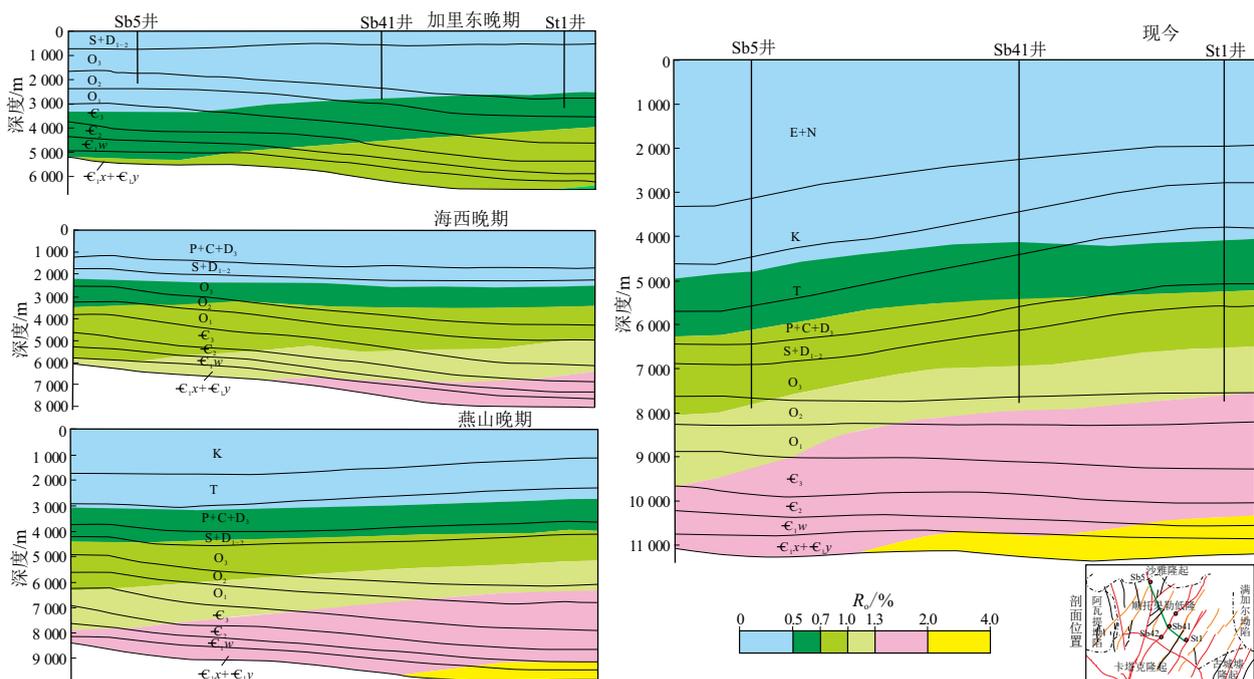


图 4 塔里木盆地顺北地区不同时期烃源岩热演化及其分布

Fig.4 Thermal evolution and distribution of source rocks in different periods in Shunbei area, Tarim Basin

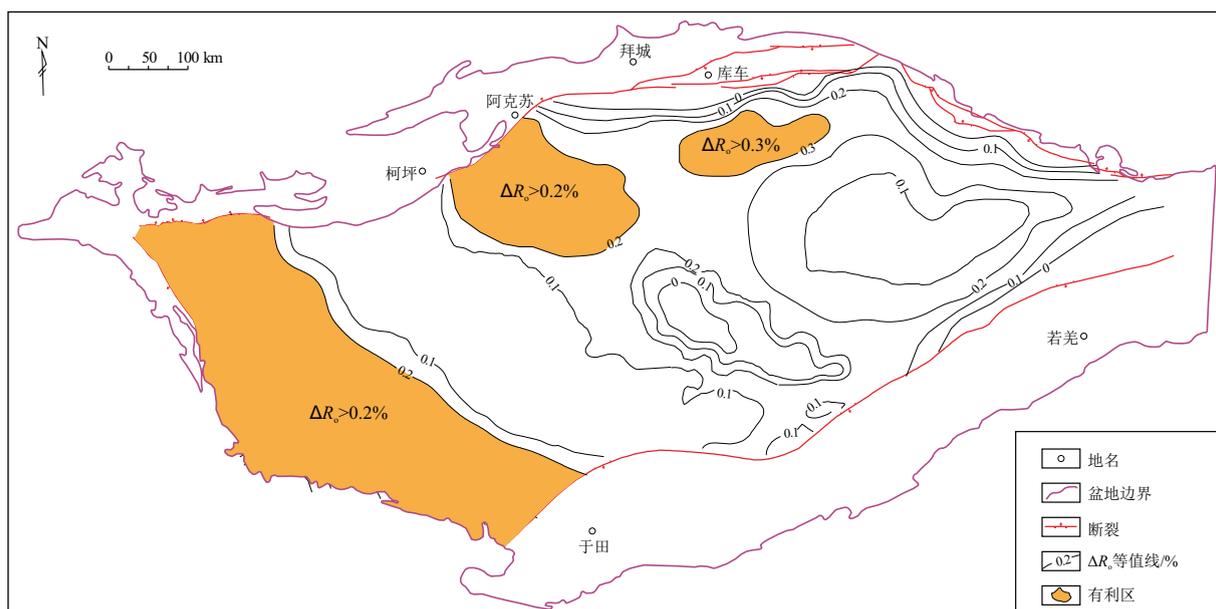


图5 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组燕山晚期至喜马拉雅期 ΔR_0 变化分布区

Fig.5 Distribution of ΔR_0 of Cambrian Yurtus Formation in Tarim Basin from late Yanshanian to Himalayan period

探和晚期成藏富集方向提供参考。

4 结论

基于地层残余厚度、剥蚀量恢复、古地温梯度等可以快速评价烃源岩热演化阶段,在一定程度上解决了古生界烃源岩成熟度判识缺少可靠温标的问题,用此方法分析出的成熟度及演化阶段的可信度相对高于传统的方法。此方法可以广泛应用于缺乏有效温标(如古生界)的地区,快速实现古生界烃源岩成熟度判识和评价有效烃源岩在不同构造期的分布,对中生界有可靠温标(R_0)层系的热演化也可实现快速估算和评价。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

丁勇参与实施方案设计;潘泉涌完成操作实施;丁勇、潘泉涌参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

The study was designed by DING Yong, and carried out by PAN Quanyong. The manuscript was drafted and revised by DING Yong and PAN Quanyong. All authors have read the last version of the paper and consented to its submission.

参考文献:

- [1] SUGGATE R P.埋藏深度、镜质体反射率和地温梯度的关系[J].王岚,译.海洋石油,1998(4):44-58.
SUGGATE R P.The relationship between burial depth, vitrinite reflectance, and geothermal gradient [J]. WANG Lan, trans. Offshore Oil, 1998(4):44-58.

- [2] 邱楠生,梅庆华,姜光,等.塔里木盆地巴楚隆起热历史:来自 He 年龄和 R_0 的约束[C]//中国地球物理学会第二十五届年会.合肥:中国科学技术大学出版社,2009.

QIU Nansheng, MEI Qinghua, JIANG Guang, et al. Thermal history of Bachu Uplift in Tarim Basin: constraints from He age and R_0 [C]//The 25th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Hefei: The University of Science and Technology of China Press, 2009.

- [3] 王飞宇,何萍,程顶胜,等.镜状体反射率可作为下古生界高过成熟烃源岩成熟度标尺[J].天然气工业,1996,16(4):14-18.
WANG Feiyu, HE Ping, CHENG Dingsheng, et al. The reflectance of mirror like bodies can serve as a maturity scale for high and over mature source rocks in the Lower Paleozoic era [J]. Natural Gas Industry, 1996, 16(4): 14-18.

- [4] 崔可.沥青成因类型影响 $R_{0B}-R_0$ 关系[J].海相油气地质, 1999, 4(3): 36-37.

CUI Ke. The type of asphalt formation affects the $R_{0B}-R_0$ relationship [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 1999, 4(3): 36-37.

- [5] 程顶胜,郝石生,王飞宇.高过成熟烃源岩成熟度指标:镜状体反射率[J].石油勘探与开发,1995,22(1):25-28.

CHENG Dingsheng, HAO Shisheng, WANG Feiyu. Reflectance of vitrinite-like macerals, a possible thermal maturity index for highly/over-matured source rocks of the Lower Paleozoic [J]. Petroleum Exploration and Development, 1995, 22(1): 25-28.

- [6] 程世伟.激光拉曼光谱分析在高一过成熟烃源岩成熟度评价中的应用[J].内江科技,2015,36(2):136.

CHENG Shiwei. Application of laser Raman spectroscopy analysis in maturity evaluation of high overmature source rocks [J]. Neijiang Technology, 2015, 36(2): 136.

- [7] 徐秋晨,邱楠生,刘雯,等.利用团簇同位素恢复沉积盆地热历史的探索[J].科学通报,2019,64(5):566-578.

XU Qiuchen, QIU Nansheng, LIU Wen, et al. Reconstructing the

- basin thermal history with clumped isotope[J]. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(5): 566-578.
- [8] 邱楠生, 刘鑫, 熊昱杰, 等. 碳酸盐团簇同位素在海相盆地热史研究中的进展[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 891-903. QIU Nansheng, LIU Xin, XIONG Yujie, et al. Progress in the study of carbonate clumped isotope in the thermal history of marine basins[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 891-903.
- [9] 陈刚, 赵重远, 李丕龙, 等. R_0 反演的盆地热史恢复方法与相关问题[J]. 石油与天然气地质, 2002, 23(4): 343-347. CHEN Gang, ZHAO Zhongyuan, LI Pilong, et al. R_0 inversion of thermal history reconstruction in sedimentary basin and its related problems[J]. Oil & Gas Geology, 2002, 23(4): 343-347.
- [10] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 叠合盆地深层、超深层热演化史恢复理论及方法研究新进展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(6): 910-929. REN Zhanli, CUI Junping, QI Kai, et al. New progress in research on theories and methods for reconstruction of deep and ultra-deep thermal evolution history in superimposed basins[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(6): 910-929.
- [11] 高志农. 碳酸盐烃源岩演化程度评价的几个问题[J]. 河南石油, 1999, 13(4): 1-4. GAO Zhinong. Several issues on evaluating the evolution degree of carbonate source rocks[J]. Petroleum Geology and Engineering, 1999, 13(4): 1-4.
- [12] 周中毅, 盛国英. 塔里木盆地古地温与深部找油(气)前景[J]. 地球化学, 1985(3): 236-241. ZHOU Zhongyi, SHENG Guoying. Paleogeothermal gradient in the Tarim Basin and oil(gas) prospects at great depths[J]. Geochimica, 1985(3): 236-241.
- [13] 周中毅. 塔里木盆地的地温梯度偏低深部有较大油气前景[J]. 石油与天然气地质, 1985, 6(S1): 24-25. ZHOU Zhongyi. The geothermal gradient in the Tarim Basin is low, and there is a great oil and gas prospect in the deep[J]. Oil & Gas Geology, 1985, 6(S1): 24-25.
- [14] 吴鲜, 李丹, 朱秀香, 等. 塔里木盆地顺北油气田地温场对奥陶系超深层油气的影响: 以顺北 5 号走滑断裂带为例[J]. 石油实验地质, 2022, 44(3): 402-412. WU Xian, LI Dan, ZHU Xiuxiang, et al. Influence of geothermal field on ultra-deep Ordovician oil and gas in Shunbei field, Tarim Basin: a case study of Shunbei no.5 strike-slip fault[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2022, 44(3): 402-412.
- [15] 邓林, 王英民. 盆地古地温场演化动态数值模拟方法及其应用[J]. 成都理工学院学报, 1998, 25(S1): 43-52. DENG Lin, WANG Yingmin. A dynamic simulation approach to the evolution history of the palaeogeotemperature field of a basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology, 1998, 25(S1): 43-52.
- [16] 黄少英, 胡方杰, 张科, 等. 塔里木盆地中央隆起超深层现今地温场特征[J]. 地质学报, 2022, 96(11): 3955-3966. HUANG Shaoying, HU Fangjie, ZHANG Ke, et al. Present-day geotemperature field of superdeep layers in the Central Uplift, Tarim Basin[J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(11): 3955-3966.
- [17] 汪在君, 齐玉林, 马金龙. 塔里木盆地大庆区块壳内地温场计算及应用分析[J]. 大庆石油地质与开发, 2000, 19(1): 14-16. WANG Zaijun, QI Yulin, MA Jinlong. Calculation and application of geothermal field within the crust of Daqing block in Tarim Basin[J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2000, 19(1): 14-16.
- [18] 胡晨晖. 湘西南 A 洼现今地温场恢复及有利勘探方向[J]. 复杂油气藏, 2023, 16(2): 154-160. HU Chenhui. Current geothermal field restoration and favorable exploration direction in the A Sag of the Weixinan Depression[J]. Complex Hydrocarbon Reservoirs, 2023, 16(2): 154-160.
- [19] 涂诗棋, 左银辉, 周勇水, 等. 东濮凹陷现今地温场及地热资源潜力[J]. 断块油气田, 2023, 30(1): 100-106. TU Shiqi, ZUO Yinhui, ZHOU Yongshui, et al. Present geothermal field and geothermal resource potential of the Dongpu Sag[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2023, 30(1): 100-106.
- [20] 李慧莉, 邱楠生, 金之钧, 等. 塔里木盆地的热史[J]. 石油与天然气地质, 2005, 26(5): 613-617. LI Huili, QIU Nansheng, JIN Zhijun, et al. Geothermal history of Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2005, 26(5): 613-617.
- [21] 李荣西, 廖永胜, 周义. 济阳坳陷石一二叠系热演化与生烃阶段[J]. 地球学报, 2001, 22(1): 85-90. LI Rongxi, LIAO Yongsheng, ZHOU Yi. Thermal history of the permo-carboniferous coal source rocks in Jiyang Depression, Shengli Oilfield[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(1): 85-90.
- [22] 张惠蓉, 刘国璧. 塔里木盆地地热场特征与油气[J]. 新疆石油地质, 1992, 13(4): 294-304. ZHANG Huirong, LIU Guobi. The hydrocarbon occurrence and characteristics of ceothermal field in Tarim Basin[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 1992, 13(4): 294-304.
- [23] 韩杨, 蒋文龙, 杨海波, 等. 准噶尔盆地南缘中段侏罗系烃源岩热演化史及其对天然气成藏的影响[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(5): 49-57. HAN Yang, JIANG Wenlong, YANG Haibo, et al. Thermal evolution and natural gas accumulation of Jurassic source rocks in middle of southern margin of Junggar Basin[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2022, 29(5): 49-57.
- [24] 蒋有录, 熊继辉. 临清拗陷东部地温及有机质热演化特征[J]. 石油大学学报(自然科学版), 1997, 21(1): 6-10. JIANG Youlu, XIONG Jihui. Characteristics of geotemperature and maturity of organic matter in the east part of Linqing Depression[J]. Journal of the University of Petroleum, China (Edition of Natural Science), 1997, 21(1): 6-10.
- [25] 刘丽. 东濮凹陷及邻区凹陷上中生界热演化史与二次生烃史研究[D]. 西安: 西北大学, 2007. LIU Li. Research on the thermal evolution history and secondary hydrocarbon generation history of the Upper Paleozoic in the Dongpu Depression and its adjacent depressions[D]. Xi'an: Northwestern University, 2007.
- [26] 蒋文龙, 阿布力米提·依明, 卞保力, 等. 准噶尔盆地西北缘风城组烃源岩热演化生物标志化合物变化及意义[J]. 新疆石油地质, 2022, 43(6): 684-692.

- JIANG Wenlong, Ablimit · YIMING, BIAN Baoli, et al. Changes and significance of biomarkers in thermal evolution of Fengcheng Formation source rocks in northwestern margin of Junggar Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2022, 43(6): 684-692.
- [27] 任战利, 祁凯, 杨桂林, 等. 沉积盆地深层热演化历史与油气关系研究现状及存在问题[J]. *非常规油气*, 2020, 7(3): 1-7.
REN Zhanli, QI Kai, YANG Guilin, et al. Research status and existing problems of relationship between deep thermal evolution history and oil and gas in sedimentary basins [J]. *Unconventional Oil & Gas*, 2020, 7(3): 1-7.
- [28] 罗昕. 塔里木盆地岩石热物性预测和现今地温场研究 [D]. 北京: 中国石油大学, 2021.
LUO Xin. Prediction of rock thermophysical properties and current geothermal field research in Tarim Basin [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2021.
- [29] 潘泉涌. 塔里木盆地台盆区地温梯度分布特征 [J]. *内蒙古石油化工*, 2018, 44(10): 52-55.
PAN Quanyong. Geotemperature gradient distribution of Tarim Basin, Northwest, China [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2018, 44(10): 52-55.
- [30] 郝芳, 邹华耀, 方勇, 等. 断—压双控流体流动与油气幕式快速成藏 [J]. *石油学报*, 2004, 25(6): 38-43.
HAO Fang, ZOU Huayao, FANG Yong, et al. Overpressure-fault controlled fluid flow and episodic hydrocarbon accumulation [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(6): 38-43.
- [31] 赵靖舟. 幕式成藏理论的提出及其勘探意义 [J]. *石油实验地质*, 2005, 27(4): 315-320.
ZHAO Jingzhou. Theory of episodic migration and accumulation: evidence and exploration significance [J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2005, 27(4): 315-320.
- [32] 郝芳, 邹华耀, 杨旭升, 等. 油气幕式成藏及其驱动机制和识别标志 [J]. *地质科学*, 2003, 38(3): 403-412.
HAO Fang, ZOU Huayao, YANG Xusheng, et al. Episodic petroleum accumulation, its driving mechanisms and distinguishing markers [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2003, 38(3): 403-412.
- [33] 潘长春, 周中毅, 范善发, 等. 塔里木盆地热历史 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1996, 15(3): 150-152.
PAN Changchun, ZHOU Zhongyi, FAN Shanfa, et al. Thermal history of Tarim Basin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1996, 15(3): 150-152.
- [34] 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.
QIU Nansheng, LIU Wen, XU Qiuchen, et al. Temperature-pressure field and hydrocarbon accumulation in deep-ancient marine strata [J]. *Earth Science*, 2018, 43(10): 3511-3525.
- [35] 刘宝静, 张健. 塔里木盆地地温演化及生油窗的影响因素分析 [C]//中国地球物理学会第二十六届年会、中国地震学会第十三次学术大会. 宁波: 中国地球物理学会, 2010.
LIU Baojing, ZHANG Jian. Analysis of factors affecting the geothermal evolution and oil generation window in the Tarim Basin [C]//The 26th Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society, the 13th Academic Conference of the Chinese Seismological Society. Ningbo: Chinese Geophysical Society, 2010.
- [36] 庄新兵, 顾忆, 邵志兵, 等. 塔里木盆地地温场对油气成藏过程的控制作用: 以古城墟隆起为例 [J]. *石油学报*, 2017, 38(5): 502-511.
ZHUANG Xinbing, GU Yi, SHAO Zhibing, et al. Control effect of geothermal field on hydrocarbon accumulation process in Tarim Basin: a case study of Guchengxu Uplift [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2017, 38(5): 502-511.
- [37] 吴高奎, 张忠民, 林杨松, 等. 塔里木盆地塔北隆起区中生界沉积演化特征 [J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(4): 845-858.
WU Gaokui, ZHANG Zhongmin, LIN Changsong, et al. Evolution of Mesozoic sedimentary fill in the Tabei Uplift region, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(4): 845-858.
- [38] 孙龙. 塔北地区多个不整合面重叠区关键构造期剥蚀量恢复和古构造演化研究 [D]. 西安: 西北大学, 2020.
SUN Long. Study on the restoration of erosion thickness and palaeostructural evolution in the key tectonic period of multiple unconformity plane overlapping areas in the Tabei area [D]. Xi'an: Northwest University, 2020.
- [39] 张水昌, 何坤, 王晓梅, 等. 深层多途径复合生气模式及潜在成藏贡献 [J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(10): 1421-1435.
ZHANG Shuichang, HE Kun, WANG Xiaomei, et al. The multi-path gas generation model and its potential contribution to petroleum accumulation in deep formations [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(10): 1421-1435.
- [40] 赵靖舟. 幕式成藏的机理和规律探讨 [J]. *天然气工业*, 2006, 26(3): 9-11.
ZHAO Jingzhou. Mechanism and regularity of episodic reservoiring [J]. *Natural Gas Industry*, 2006, 26(3): 9-11.
- [41] 赵阳, 徐小龙, 阙仕煜, 等. I型有机质生油增压数学模型建立与应用 [J]. *油气地质与采收率*, 2023, 30(5): 57-62.
ZHAO Yang, XU Xiaolong, QUE Shiyu, et al. Establishment and application of mathematical model of oil generated overpressure by type I organic matter [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2023, 30(5): 57-62.
- [42] 张焕旭, 陈世加, 张亚, 等. 烃源岩生烃增压研究进展 [J]. *地质科技情报*, 2018, 37(2): 199-207.
ZHANG Huanxu, CHEN Shijia, ZHANG Ya, et al. Research progress of the overpressure caused by hydrocarbon generation [J]. *Geological Science and Technology Information*, 2018, 37(2): 199-207.