

塔里木盆地西北缘寒武系肖尔布拉克组烃源岩特征

高永进^{1,2}, 尹成明^{1,2}, 刘丽红^{1,2}, 徐大融³, 杨有星^{1,2}, 张远银⁴, 宋泽章⁵, 甄曼彤⁶

[1. 中国地质调查局 油气资源调查中心 非常规油气重点实验室, 北京 100083; 2. 中国地质调查局 油气资源调查中心 多资源协同陆相页岩油绿色开采全国重点实验室, 北京 100083; 3. 新疆博源石油天然气开发有限公司, 新疆 阿克苏 843600; 4. 北京大学 能源研究院, 北京 100091; 5. 中国石油大学(北京) 地球科学学院, 北京 102249; 6. 中国地质大学(北京) 地球科学与资源学院, 北京 100083]

摘要:近年来,塔里木盆地西北缘地区寒武系油气勘探取得了一系列发现和突破,研究寒武系烃源岩特征对指导下一步油气勘探具有重要意义。前人研究普遍认为,塔里木盆地寒武系海相烃源岩主要集中在下寒武统玉尔吐斯组。为研究塔里木盆地西北缘寒武系肖尔布拉克组新层系烃源岩特征,对4口钻井(BY1井、KTJ1井、KPN1井和XSC1井)和3条野外露头剖面样品进行了岩石学和地球化学分析。研究结果表明:塔里木盆地西北缘寒武系肖尔布拉克组烃源岩主要为泥质灰岩和泥岩,测试结果显示寒武系肖尔布拉克组下段总有机碳含量(TOC)平均值分别为1.55%, 2.39%, 0.45%, 0.89%(钻井样品)和1.10%(露头样品),表明该组为好-较好烃源岩,有机质母质类型为腐泥型,沥青镜质体反射率(R_o)分布在2.23%~2.57%,有机质已经处于过成熟热演化阶段,为一套天然气气源岩。肖尔布拉克组烃源岩厚度约20~90 m,中-下段烃源岩优于上段。根据钻井及地震剖面发育特征,肖尔布拉克组烃源岩主要分布在以BY1井和KTJ1井为中心的台内洼地,该区为烃源岩最有利发育区。

关键词:地球化学分析; 生烃潜力; 烃源岩; 肖尔布拉克组; 柯坪断隆; 塔里木盆地

中图分类号: TE122.1

文献标识码: A

Characteristics of source rocks in the Cambrian Xiaerbulake Formation in the northwestern Tarim Basin

GAO Yongjin^{1,2}, YIN Chengming^{1,2}, LIU Lihong^{1,2}, XU Darong³, YANG Youxing^{1,2}, ZHANG Yuanyin⁴,
SONG Zezhang⁵, ZHEN Mantong⁶

[1. Key Laboratory of Unconventional Oil and Gas Resources, Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 2. National Key Laboratory for Multi-resource Collaborated Green Development of Continental Shale Oil, Oil and Gas Resources Survey, China Geological Survey, Beijing 100083, China; 3. Xinjiang Boyuan Petroleum and Natural Gas Development Co., Ltd., Xinjiang Akesu 843600, China; 4. Institute of Energy, Peking University, Beijing 100091, China; 5. College of Geosciences, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China; 6. School of Earth Sciences and Resources, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China]

Abstract: In recent years, a series of discoveries and breakthroughs in hydrocarbon exploration have been achieved in the Cambrian strata in the northwestern Tarim Basin (hereafter referred to as the study area). Therefore, investigating the characteristics of the Cambrian source rocks holds great significance for guiding subsequent hydrocarbon exploration efforts. Previous studies have generally suggested that the Cambrian marine source rocks in the Tarim Basin primarily occur in the Lower Cambrian Yuertusi Formation. To investigate the characteristics of source rocks in a new sequence in the Cambrian Xiaerbulake Formation, we conduct petrologic and geochemical analyses of samples collected from four wells (i. e., wells BY1, KTJ1, KPN1, and XSC1) and three outcrops. The analytical results indicate that the source rocks in the formation in the study area consist predominantly of argillaceous limestones and mudstones. The test results of samples show that the lower member of the Cambrian Xiaerbulake Formation exhibits average total organic carbon

收稿日期: 2024-01-05; 修回日期: 2024-07-22。

第一作者简介: 高永进(1968—), 男, 教授级高级工程师, 区带评价与油气成藏。E-mail: gaoyongjin@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 刘丽红(1982—), 女, 博士、高级工程师, 沉积学与石油地质学。E-mail: liulihong713@163.com。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41802173); 中国地质调查局地质调查项目(DD20240044, DD20242209, DD20230042, DD20230311); 中国地质调查局油气资源调查中心科技创新基金项目(油科创[2023]-YC02)。

(TOC) contents of 1.55 %, 2.39 %, 0.45 %, 0.89 % (for the four wells), and 1.10 % (for the three outcrops), respectively, suggesting fair-to-good source rocks. The formation's source rocks contain sapropelic parent materials, with bitumen reflectance values ranging between 2.23 % and 2.57 %, suggesting overmature organic matter and natural gas-prone source rocks. These source rocks vary in thickness from approximately 20 to 90 m, exhibiting higher quality in the middle to lower members than in the upper member. Drilling results and seismic profiles reveal that these source rocks principally occur in the intra-platform depression centered on wells BY1 and KTJ1, establishing this depression as the most favorable area for the occurrence of source rocks.

Key words: geochemical analysis, hydrocarbon-generating potential, source rock, Xiaerbulake Formation, Keping fault uplift, Tarim Basin

引用格式:高永进,尹成明,刘丽红,等. 塔里木盆地西北缘寒武系肖尔布拉克组烃源岩特征[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1064–1078. DOI: 10.11743/ogg20240412.

GAO Yongjin, YIN Chengming, LIU Lihong, et al. Characteristics of source rocks in the Cambrian Xiaerbulake Formation in the northwestern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1064–1078. DOI: 10.11743/ogg20240412.

塔里木盆地油气资源丰富,截至2022年底,累计探明石油地质储量 32.63×10^8 t,天然气地质储量 2.48×10^{12} m³。近年来,塔里木盆地西北缘(塔西北)地区新一批钻井相继在寒武系获得油气突破。2019年,KTJ1井在塔西北柯坪断隆寒武系吾松格尔组获日产 104.00×10^4 m³高产工业气流。2020年,LT1井在塔北隆起轮南低凸起寒武系吾松格尔组获高产油流(日产油133.46 m³,日产气 4.87×10^4 m³)^[1]。2022年,BY1井在柯坪断隆东段寒武系肖尔布拉克组和吾松格尔组也获得了高产油气流。此外,KPN1井在寒武系肖尔布拉克组发现了25个层组的油气异常,吾松格尔组测试获低产气流。前人研究认为除库车坳陷外,台盆区寒武系玉尔吐斯组为主力烃源岩^[2-4],然而,KTJ1井、KPN1井、BY1井和XSC1井钻遇的玉尔吐斯组烃源岩厚度仅有4~5 m,柯坪露头区地层厚度仅有10~15 m。与此同时,钻井资料却显示寒武系肖尔布拉克组有良好的生烃潜力,其厚度近200 m,主要由黑色泥质灰岩和泥质白云岩组成,代表了一种深水低能的沉积环境,这些黑色岩系是否具有生烃潜力成为一个值得深入研究的问题。

塔西北柯坪地区发育下寒武统玉尔吐斯组海相优质烃源岩、肖尔布拉克组微生物白云岩优质储层和中寒武统膏盐岩盖层,具备优越的生-储-盖组合配置条件^[5]。长期以来,玉尔吐斯组都被视为寒武系盐下地层的主力烃源岩^[2-4]。野外露头揭示,玉尔吐斯组主要由硅质页岩和泥微晶白云岩组成,总有机碳含量(TOC)主要分布在2.00%~16.00%^[6],有机质类型以腐泥型和腐殖型为主,等效镜质体反射率高达2.63%~2.85%,处于过成熟演化阶段^[7],有机质的富集受上升洋流和缺氧的沉积环境控制^[8]。

塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组通常被作为储层进行研究^[9-13],而将其作为烃源岩的研究相对较少。然而,少数学者对其作为烃源岩的潜力进行了探讨。李峰等人^[14]通过油-源对比认为台盆区原油可能来源于寒武系和奥陶系。易士威等^[15]则指出,南华纪古裂谷对寒武系沉积具有显著的控制作用,这种沉积环境有利于肖尔布拉克组烃源岩的形成。陈强路等^[16]基于寒武系沉积格局、烃源岩的沉积构造、岩性组合、矿物成分以及成烃生物特征,认为肖尔布拉克组下部可能发育一套有效的烃源岩。此外,白忠凯等^[17-18]、汪宗欣等^[19]从古氧量和古生产力的角度出发,认为肖尔布拉克下段为缺氧环境,古生产力较高,这为烃源岩发育提供了条件。尽管前人对寒武系肖尔布拉克组作为潜在烃源岩的可能性有所提及,但由于缺乏实际钻井数据,对寒武系肖尔布拉克组是否发育有效烃源岩这一问题缺少地化指标的直接证据,同时,关于肖尔布拉克组烃源岩的展布规律也尚不清晰,有待进一步研究。

本文利用塔西北地区最新钻井资料,并结合野外露头数据,对寒武系肖尔布拉克组的岩石学特征、TOC、沥青镜质体反射率(R_b)和生烃潜量(S_1+S_2)进行系统分析,通过这些数据全面评估肖尔布拉克组的生烃潜力,并深入研究烃源岩的展布规律,为塔里木盆地的油气勘探部署提供有力的科学依据和决策支持。

1 区域地质背景

根据最新的地震-地质大剖面联合解释结果,塔里木盆地被划分为10个一级构造单元,形成“五隆五坳”构造格局^[20],即柯坪断隆、塔北隆起、巴楚隆起、塔

中隆起、塔东隆起、库车坳陷、北部坳陷、塘古坳陷、西南坳陷和东南坳陷。本次研究工区主要位于塔西北地区的柯坪断隆,面积约为 $2.53 \times 10^4 \text{ km}^2$ (图1)^[21]。

柯坪断隆的雏形在海西早期开始形成,其主体构造带于中-新生代形成。加里东期,中昆仑板块与塔里木板块碰撞造山,在海西期和印支早期-燕山期,区域构造相对稳定,主要表现为剥蚀作用。直至喜马拉雅运动中-晚期,冲断体系的形成最终确定了柯坪断隆现今的主体构造格局^[22-23]。中新世晚期,由于印度板块与欧亚板块碰撞,柯坪断隆不断向北推挤,断裂活动强烈,形成了北西向的大型基底卷入型冲断带。推覆体从南天山向塔里木盆地逆冲,逆冲岩席在地表呈单面山,总体具有背驮式向南逆冲推覆发展的特征^[20];在构造变形样式上,该区域主要表现为以寒武系膏盐岩层为滑脱拆离面的薄皮构造,同时也有卷入前寒武系结晶基底的逆冲推覆构造。

塔西北地区寒武系发育完整,自下而上依次为玉

尔吐斯组、肖尔布拉克组、吾松格尔组、沙依里克组、阿瓦塔格组和下丘里塔格组(图1)。其中,玉尔吐斯组主要由硅质页岩和泥晶白云岩组成,是本区优质的烃源岩层系。肖尔布拉克组则富含泥晶白云岩、颗粒白云岩和微生物白云岩,具有良好的储层物性,长期以来一直被视为盐下白云岩的主要储集层发育段^[24-26],上覆的沙依里克组和阿瓦塔格组发育有巨厚的膏盐岩,这为油气的保存提供了理想的封盖条件。因此,塔西北地区寒武系具备了优越的生-储-盖组合配置,展现出了巨大的油气勘探潜力。

2 样品实验分析

本文深入研究了塔西北的典型钻井,包括BY1井、KTJ1井、KPN1井和XSC1井等,并对野外露头外露的肖尔布拉克剖面、阿克苏东沟剖面和西沟剖面进行了样品采集与烃源岩测试,钻井及剖面位置见图1。

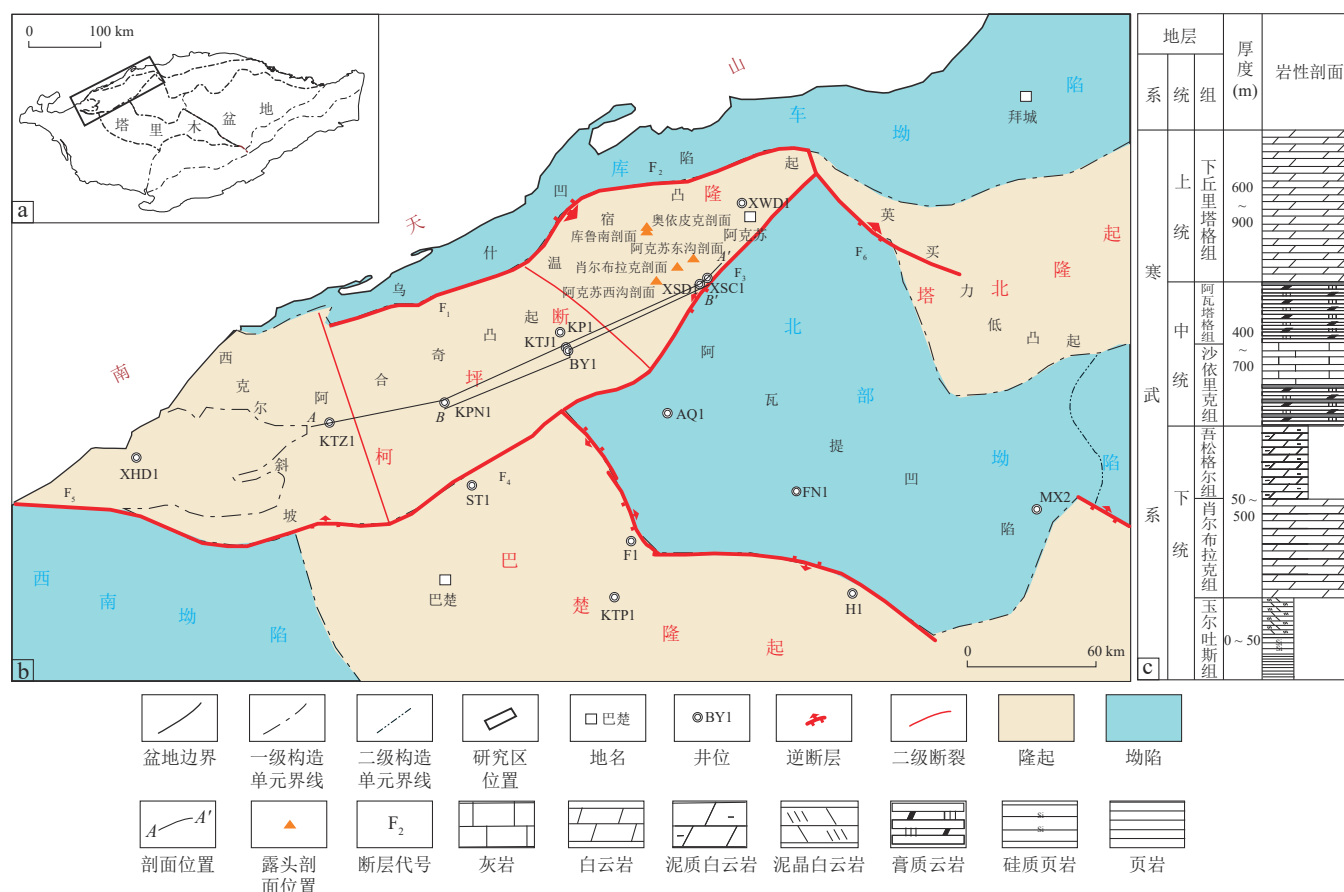


图1 塔里木盆地西北缘柯坪断隆构造单元划分及地层综合柱状图^[16]

Fig. 1 Map showing the structural unit division and composite stratigraphic column of the Keping fault uplift in the northwestern Tarim Basin^[16]

a. 塔里木盆地概要图及研究区位置; b. 柯坪断隆构造单元划分; c. 塔西北寒武系地层综合柱状图

F₁. 阿合奇-乌恰断裂; F₂. 古木别孜断裂; F₃. 沙井子断裂; F₄. 柯坪塔格断裂; F₅. 盖孜-八盘断裂; F₆. 喀拉玉尔滚断裂

对肖尔布拉克组下段(肖下段)进行了全面而深入的评价与分析。为进行更精准的对比研究,还对玉尔吐斯组的烃源岩特征进行了分析。

本次研究所用样品均来源于岩心或露头块样,经过严格的挑选和清洗处理,分别开展有机地球化学和岩石地球化学分析,所有分析测试均在西南石油大学实验室完成。*TOC*的测定采用了美国力克公司先进的CS844碳硫测定仪,并严格按照《沉积岩中总有机碳测定》(GB/T 19145—2022)标准进行操作,以确保测试结果的准确性和可靠性。热解参数测量采用在氦流中逐步加热的Rock-Eval6仪器进行。最高热解峰温($T_{\max}$)作为烃源岩成熟度指标用于提供烃源岩热演化程度的参照信息。*TOC*的测试方式是先将样品粉碎后经70目的筛子进行筛选,筛选后的样品加入体积比为1:7(HCl:H₂O)的盐酸溶液,搅拌摇匀后浸泡2 h以上,以消除其中的碳酸盐组分。处理后的样品放入恒温干燥箱(70~80℃)烘干,烘干后将所得样品用CS844碳硫测定仪测试,得到准确的*TOC*数据。

同时对采集的样品分别进行了铸体薄片鉴定和X射线衍射分析等相关测试。铸体薄片鉴定工作严格遵循《岩石薄片鉴定标准》(SY/T 5368—2016),利用Zeiss偏光显微镜进行精细观察和分析。X射线衍射分析依据《沉积岩中黏土矿物总量和常见非黏土矿物X射线衍射定量分析方法》(SY/T 5163—2018),使用型号为Smart Lab SE的多晶X射线衍射仪在稳定的检测环境(温度20℃,湿度45%)中完成。微量元素的分析采用了先进的电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES,美国PE 5300V),严格依据《石灰石和白云石化学分析方法》[DZ/T 0279.2—2016, GB/T 3286(1-9)—2014],确保数据的准确性和可靠性。

3 烃源岩地球化学特征

3.1 岩石学特征

塔西北BY1井寒武系肖尔布拉克组样品主要由灰岩组成,其方解石含量最高,平均为56.30%,其次是石英和黏土矿物(表1),说明岩石样品主要由硅质页岩和泥质灰岩组成;从黏土矿物分析结果看(表2),黏土矿物主要由伊利石组成,伊利石含量占黏土矿物总量的64.00%~100.00%,平均含量高达92.14%,同时含有少量的高岭石。

镜下薄片观察显示,BY1井肖尔布拉克组主要由泥质灰岩、灰质泥岩、生屑泥晶灰岩和富有机质泥岩等

多种岩石类型组成(图2a—f),自上而下,泥质含量逐渐增多,同时发育微裂缝,部分被方解石充填(图2a)。含灰泥岩中,黏土矿物含量高达80.00%,颜色呈黑色,富含有机质,重结晶作用弱,方解石以粉晶和泥晶的形式存在,呈分散状分布(图2b)。泥质灰岩中,方解石以粉晶为主,灰泥次之,粉晶方解石多呈它形,分散状分布(图2c,d),同时可见溶蚀孔及溶洞,被方解石或残余沥青充填(图2d)。随着地层深度的增加,生物碎屑含量增多,包括钙质海绵骨针、介屑和藻屑等(图2e),含量为10.00%~26.00%。玉尔吐斯组岩石则主要以富有机质泥岩为主,岩心颜色呈灰黑色,富含有机质,整体质地较纯。在薄片观察中,泥质组分含量为60.00%~70.00%,基本不透明,富含有机质,基本无重结晶作用,粉砂以石英为主,具有一定的定向性。此外,还可见到分散分布的粉晶白云石(图2f)。

3.2 有机地球化学特征

3.2.1 有机质丰度

根据BY1井、KTJ1井、KPN1井和XSC1井烃源岩有机质丰度统计数据(表3),好-极好烃源岩主要位于玉尔吐斯组和肖下段,尽管玉尔吐斯组厚度较薄,但其有机质丰度较高,*TOC*最高可达28.20%,这充分表明了其烃源岩潜力,与之前的认识相吻合。

有机地化分析数据(表3)和烃源岩有机质丰度判别标准(表4)表明,BY1井肖下段*TOC*为0.10%~4.01%,平均值为1.55%(样品个数 $n=28$),为极好的烃源岩;KTJ1井肖下段*TOC*为0.60%~5.00%,平均值为2.39%($n=16$),属于极好烃源岩;而KPN1井肖下段*TOC*为0.17%~1.14%,平均值为0.45%($n=15$),显示出较好的烃源岩特性;XSC1井肖下段*TOC*为0.64%~1.18%,平均值为0.89%($n=24$),代表着好的烃源岩。综上所述,肖下段在多口钻井中都展现出了良好的烃源岩特性。

同时对野外露头剖面进行了取样测试,结果显示,肖尔布拉克剖面肖下段*TOC*为0.06%~3.63%,平均值为0.49%($n=23$)。阿克苏东沟剖面*TOC*分布在0.20%~7.56%,平均值为2.00%($n=13$),西沟剖面*TOC*分布在0.19%~3.69%,平均值为1.47%($n=6$),尽管这些野外露头剖面可能经历了风化作用的影响,但测试结果表明,肖下段的有机质丰度仍然代表着好-较好的烃源岩,也证实了肖尔布拉克组作为有效烃源岩的潜力。

表1 塔里木盆地西北缘BY1井岩心样品全岩矿物X射线衍射分析结果

Table 1 Whole-rock X-ray diffraction (XRD) mineralogy of core samples from well BY1 in the northwestern Tarim Basin

样品编号	深度/m	矿物组分含量/%										
		石英	钾长石	斜长石	方解石	白云石	黄铁矿	铁白云石	黏土	菱铁矿	重晶石	氟磷灰石
C ₁ x-1	3 879.1	22.9	6.9	0	0	0	5.5	50.3	14.3	0	0	0
C ₁ x-2	3 879.5	13.5	4.6	0	0	0	3.5	68.6	9.8	0	0	0
C ₁ x-4	3 880.0	4.8	1.2	0	85.0	0	1.5	4.0	3.5	0	0	0
C ₁ x-6	3 881.3	8.3	2.0	0	66.4	0	1.7	17.5	4.1	0	0	0
C ₁ x-7	3 881.8	2.6	0	0	94.6	0	0.9	1.3	0.6	0	0	0
C ₁ x-10	3 884.7	33.2	8.5	0	17.8	0	7.0	17.1	13.8	2.6	0	0
C ₁ x-12	3 887.0	1.0	0	0	88.3	0	0.0	10.3	0.4	0	0	0
C ₁ x-16	3 890.0	7.8	2.7	0	52.1	0	3.4	27.9	6.1	0	0	0
C ₁ x-18	3 891.5	6.8	1.8	0	18.7	0	2.6	65.0	5.1	0	0	0
C ₁ x-20	3 892.1	10.7	1.4	0	61.8	0	2.5	18.6	5.0	0	0	0
C ₁ x-22	3 893.5	21.7	5.1	0.2	27.7	0	4.9	33.9	6.5	0	0	0
C ₁ x-24	3 894.8	6.8	1.7	0	59.2	0	1.4	30.8	0.1	0	0	0
C ₁ x-25	3 896.6	6.2	1.5	0	18.3	69.1	1.7	0	3.2	0	0	0
C ₁ x-27	3 940.4	1.3	1.3	0	96.0	0	0	0	1.4	0	0	0
C ₁ x-29	3 942.0	0.8	2.5	0	93.6	0	0	2.6	0.5	0	0	0
C ₁ x-30	3 943.0	0.7	1.4	0	96.8	0	0	0.9	0.2	0	0	0
C ₁ x-32	3 945.2	0.8	0.8	0	97.1	0	0	0	1.3	0	0	0
最小值		0.7	0	0	0	0	0	0	1.3	0	0	0
最大值		33.2	8.5	0.2	97.1	69.1	7.0	68.6	14.3	2.6	0	0
平均值		9.7	2.7	0	56.3	7.3	2.3	22.0	4.8	0.3	0	0
C ₁ y-33	3 946.3	0.7	0.9	0	97.5	0	0.8	0	0.1	0	0	0
C ₁ y-35	3 953.5	45.4	8.0	0	0	4.5	11.5	0	25.6	0	5.0	0
C ₁ y-36	3 953.7	45.6	15.0	0	0	0	9.1	7.7	19.7	0	2.9	0
C ₁ y-37	3 954.0	21.5	5.9	0	0	0	0	0	20.2	0	5.9	46.5
C ₁ y-38	3 954.3	6.3	0	0	0	0	0	0	1.3	21.3	6.7	64.4
C ₁ y-39	3 954.8	3.0	0	0	0	75.3	5.4	0	11.6	0	4.7	0
Z ₂ q-1	3 955.8	4.6	0.5	0	0	93.2	0	0	0.9	0	0.8	0
Z ₂ q-2	3 957.3	3.1	1.0	0	0.2	93.3	0.9	0	1.5	0	0	0
Z ₂ q-3	3 958.0	0.1	0	0.9	0	98.5	0	0	0.5	0	0	0
Z ₂ q-4	3 958.3	1.2	0.5	0	0.8	95.0	0	0	2.5	0	0	0
Z ₂ q-6	3 960.5	0	0	0.4	1.0	98.5	0	0	0.1	0	0	0
Z ₂ q-8	3 963.0	1.2	0	0.5	0.4	97.9	0	0	0	0	0	0
Z ₂ q-10	4 004.0	0	0	0	1.4	98.3	0	0	0.3	0	0	0
Z ₂ q-12	4 006.9	0.3	0	0.3	0	99.2	0	0	0.2	0	0	0
Z ₂ q-14	4 009.7	0.7	0	99.2	0	0	0	0.1	0	0	0	0
Z ₂ q-15	4 010.6	3.7	0	0.4	0	95.8	0	0	0.1	0	0	0
最小值		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
最大值		45.6	15.0	99.2	97.5	99.2	11.5	7.7	25.6	21.3	6.7	64.4
平均值		10.2	2.6	11.2	11.0	58.3	2.2	0.9	6.1	2.4	1.8	10.3

3.2.2 有机质热演化特征

鉴于下古生界烃源岩中镜质体的缺失,本次研究特别针对肖尔布拉克组的35块样品进行了沥青镜质体反射率测试。沥青作为高成熟海相源岩中有机质的主要形态,其反射率成为衡量海相烃源岩成熟度的重要指标^[27]。目前,诸多学者根据不同地区、不同类型

样品建立了固体沥青镜质体反射率(BR_b)与等效镜质体反射率($EqVR_b$)之间的关系(表5)。根据丰国秀等人^[28]的方法计算出BY1井肖尔布拉克组的等效镜质体反射率数值最低,主要集中在2.23%~2.57%,平均值为2.34%(表6)。根据Bertrand等^[29]公式计算出的等效镜质体反射率最高,主要分布在3.17%~3.76%,平均值为3.36%(表6),其他方法得出的等效

表2 塔里木盆地西北缘BY1井黏土矿物X射线衍射分析结果

Table 2 XRD analysis of clay mineral of core samples from well BY1 in the northwestern Tarim Basin

样品编号	深度/m	黏土矿物组分相对含量/%				
		蒙皂石(S)	伊利石(I)	高岭石(K)	绿泥石(C)	
E ₁ x-1	3 879. 1	0	94	1	5	
E ₁ x-2	3 879. 5	0	94	2	4	
E ₁ x-4	3 880. 0	0	92	1	7	
E ₁ x-6	3 881. 3	0	95	1	4	
E ₁ x-10	3 884. 7	0	97	1	2	
E ₁ x-16	3 890. 0	0	99	0	1	
E ₁ x-18	3 891. 5	0	100	0	0	
E ₁ x-20	3 892. 1	0	97	1	2	
E ₁ x-22	3 893. 5	0	99	0	1	
E ₁ x-24	3 894. 8	0	96	1	3	
E ₁ x-25	3 896. 6	0	98	1	1	
E ₁ x-27	3 940. 4	0	97	1	2	
E ₁ x-29	3 942. 0	0	83	9	8	
E ₁ x-30	3 943. 0	0	74	21	5	
E ₁ x-32	3 945. 2	0	100	0	0	
E ₁ y-33	3 946. 3	0	75	18	7	
E ₁ y-35	3 953. 5	0	99	1	0	
E ₁ y-36	3 953. 7	0	99	0	1	
E ₁ y-37	3 954. 0	0	94	5	1	
E ₁ y-38	3 954. 3	0	98	2	0	
E ₁ y-39	3 954. 8	0	64	32	4	
Z ₂ q-1	3 955. 8	0	97	1	2	
Z ₂ q-2	3 957. 3	0	90	2	8	
Z ₂ q-3	3 958. 0	0	97	1	2	
Z ₂ q-4	3 958. 3	0	96	1	3	
最小值		0	64	0	0	0
最大值		0	100	32	8	0
平均值		0	92. 15	5	3	0

镜质体反射率则介于这两种方法之间^[30-32]。可见,即使是计算出的最低的等效镜质体反射率也达到了2.00%以上,表明有机质已处于过成熟生气阶段。

KTJ1井等效镜质体反射率介于1.98%~2.50%,平均值为2.23%($n=28$),有机质母质为腐泥型,处于高热演化生气阶段。XSC1井 $T_{\max}$ 最大值是498.3℃,最小值是465.0℃,平均值为480.0℃,也代表成熟的演化阶段。

3.2.3 生烃潜量

热解分析结果显示,BY1井玉尔吐斯组和肖尔布

拉克组样品生烃潜量介于0.10~7.39 mg/g,平均值为2.85 mg/g(表7)。值得注意的是,在分析的28个样品中,有12个样品的热解游离烃量(S_1)值大于热解裂解烃量(S_2),占比约43%,可能受到运移烃的影响。烃类通常通过断层和裂缝等通道运移,其原因是这些通道与烃源岩的连通性好,但观察BY1井肖下段岩心,未见裂缝发育,且孔隙度和渗透率均较低,分别为0.10%~2.50%和 $(0.01\sim0.22)\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ (图3),这种灰岩的致密性显著抑制了烃类的垂向运移。因此,在如此致密的灰岩中,烃类从玉尔吐斯组中运移过来的可能性相对较小。

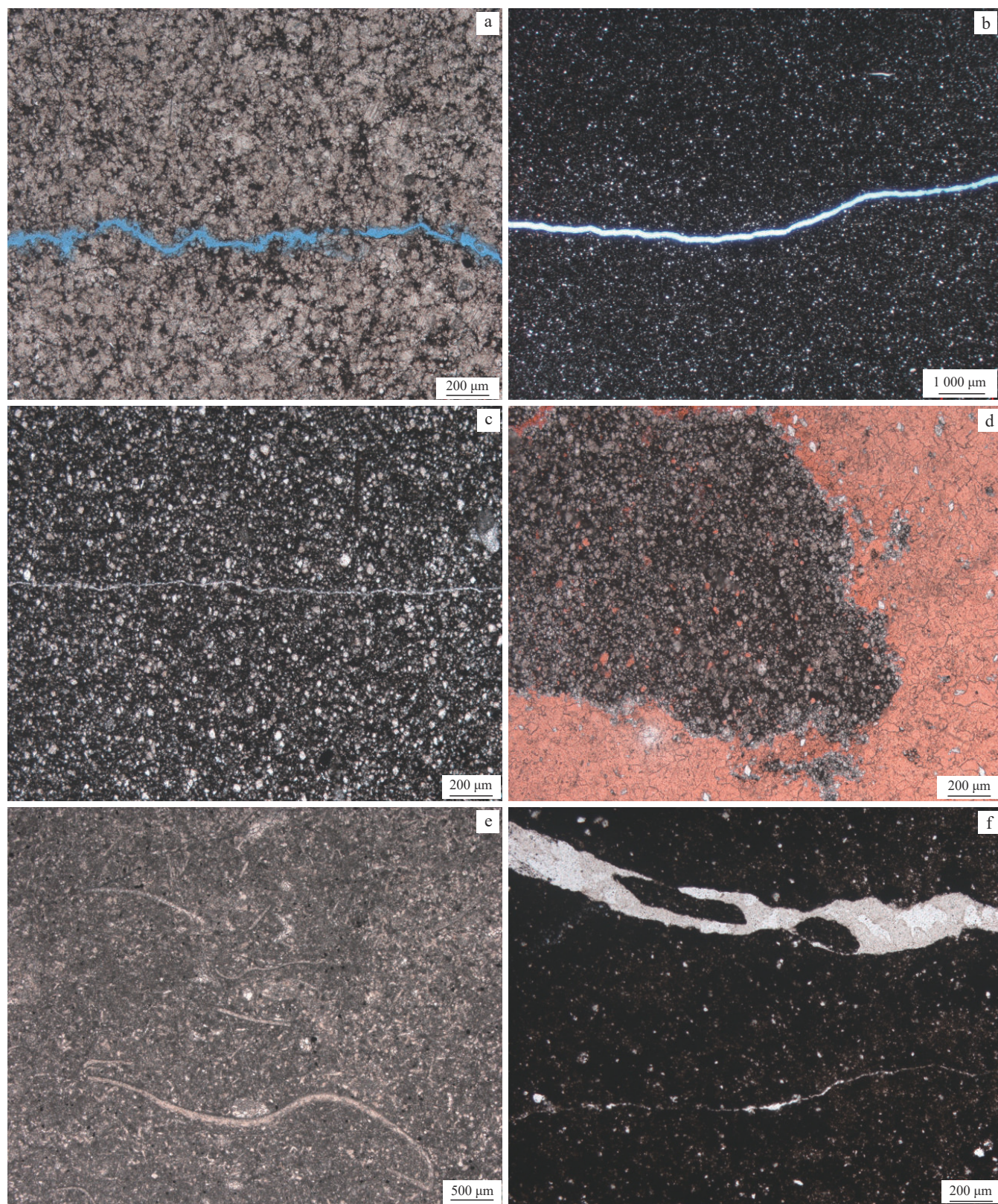


图2 塔里木盆地西北缘BY1井寒武系肖尔布拉克组岩石显微特征照片

Fig. 2 Microscopic characteristics of rock samples from the Cambrian Xiaerbulake Formation in well BY1 in the northwestern Tarim Basin
a. 含泥粉晶灰岩,它形方解石、边界呈港湾状,见构造溶蚀缝,宽0.02~0.16 mm,未充填,样品C_{1x}-6,埋深3 881.3 m,单偏光;b. 含灰泥岩,灰质以粉晶组构为主,呈分散状分布,见构造缝,宽0.10~0.15 mm,未充填,样品C_{1x}-10,埋深3 884.7 m,单偏光;c. 泥质泥粉晶灰岩,见构造微缝,方解石全充填,样品C_{1x}-18,埋深3 891.5 m,单偏光;d. 含泥粉晶灰岩,溶洞,粒状方解石全充填,样品C_{1x}-25,埋深3 896.6 m,单偏光;e. 含泥生屑泥晶灰岩,生屑包括骨针、介屑等,整体致密,未见有效储集空间,样品C_{1x}-28,埋深3 941.0 m,单偏光;f. 含粉砂富有机质泥岩,样品C_{1y}-37,埋深3 953.9 m,单偏光

表 3 塔里木盆地西北缘典型钻井和露头烃源岩厚度及有机质丰度

Table 3 Thicknesses and organic matter abundance of source rocks in typical wells and on outcrops within the northwestern Tarim Basin

钻井/剖面	层位	顶深/m	底深/m	厚度/m	岩性	TOC/%	生油岩分级
BY1 井	肖上段	3 776. 00	3 869. 00	93. 00	黄灰色白云岩	—	—
	肖下段	3 869. 00	3 952. 00	83. 00	灰色泥质灰岩	(0. 10 ~ 4. 01)/1. 55(28)	好烃源岩
	玉尔吐斯组	3 952. 00	3 956. 00	4. 00	灰黑色泥岩	(0. 13 ~ 28. 20)/11. 12(7)	极好烃源岩
KTJ1 井	肖上段	3 748. 00	3 843. 00	95. 00	灰色灰质泥岩	(0. 20 ~ 0. 90)/0. 45(21)	较好烃源岩
	肖下段	3 843. 00	3 925. 00	82. 00	灰黑色泥晶灰岩	(0. 60 ~ 5. 00)/2. 39(16)	好烃源岩
	玉尔吐斯组	3 925. 00	3 929. 00	4. 00	灰黑色泥岩	(0. 60 ~ 5. 00)/4. 30(16)	极好烃源岩
KPN1 井	肖上段	5 144. 00	5 245. 00	101. 00	灰色颗粒白云岩	(0. 11 ~ 0. 54)/0. 33(2)	差烃源岩
	肖下段	5 245. 00	5 269. 00	24. 00	灰色泥质粉晶白云岩	(0. 17 ~ 1. 14)/0. 45(15)	较好烃源岩
	玉尔吐斯组	5 269. 00	5 274. 00	5. 00	褐色白云质泥岩	(0. 26 ~ 2. 02)/0. 85(3)	较好烃源岩
XSC1 井	肖上段	4 752. 00	5 013. 00	261. 00	浅灰色云质灰岩	—	—
	肖下段	5 013. 00	5 074. 00	61. 00	灰色云质灰岩	(0. 64 ~ 1. 18)/0. 89(24)	极好烃源岩
	玉尔吐斯组	5 074. 00	5 110. 00	36. 00	深灰色泥质灰岩	(2. 10 ~ 2. 40)/2. 20(3)	极好烃源岩
肖尔布拉克剖面	肖下段	—	—	—	灰色粉晶白云岩	(0. 06 ~ 3. 63)/0. 49(23)	较好烃源岩
阿克苏东沟剖面	肖下段	—	—	—	灰色粉晶白云岩	(0. 20 ~ 7. 56)/2. 00(13)	好烃源岩
西沟剖面	—	—	—	—	灰色粉晶白云岩	(0. 19 ~ 3. 69)/1. 47(6)	好烃源岩

注:肖上段为肖尔布拉克组上段。表中 TOC 数值为(最小值~最大值)/平均值(样品个数)。“—”代表无数据。

表 4 烃源岩有机质丰度判别标准

Table 4 Criteria for discriminating the abundance of organic matter in source rocks

生油岩分级	地化热解分析 TOC/%	
	暗色泥(页)岩	碳酸盐岩
极好烃源岩	>2. 0	>0. 85
好烃源岩	1. 5 ~ 2. 0	0. 65 ~ 0. 85
较好烃源岩	1. 0 ~ 1. 5	0. 45 ~ 0. 65
差烃源岩	0. 5 ~ 1. 0	0. 25 ~ 0. 45
非烃源岩	<0. 5	<0. 25

表 5 固体沥青镜质体反射率与等效镜质体反射率的换算关系

Table 5 The equation between vitrinite reflectance of solid bitumen and vitrinite equivalent reflectance

换算公式	文献来源
$EqVR_o=0.6569BR_b+0.3364$	丰国秀等 ^[28]
$EqVR_o=0.668BR_b+0.346$ (碳酸盐岩)	刘德汉 ^[30]
$EqVR_o=(BR_b-0.13)/0.87$ (灰岩)	Bertrand ^[29]
$EqVR_o=0.938BR_b+0.3145$	Schmidt ^[31]
$EqVR_o=1.125BR_b-0.2062$	王晔 ^[32]

注: R_b 为沥青镜质体反射率; BR_b 为固体沥青镜质体反射率; $EqVR_o$ 为等效镜质体反射率。

表 6 塔里木盆地西北缘 BY1 井固体沥青镜质体反射率及其换算等效镜质体反射率

Table 6 Statistics of vitrinite reflectance of bitumen from well BY1 in the northwestern Tarim Basin and its vitrinite equivalent reflectance

样品编号	深度/m	岩性	平均 BR_b / BR_b /%	$BR_{b,min}$ / %	$BR_{b,max}$ / %	测定 点数	标准 偏差	$EqVR_o$ / % ^[28]	$EqVR_o$ / % ^[29]	$EqVR_o$ / % ^[30]	$EqVR_o$ / % ^[31]	$EqVR_o$ / % ^[32]	备注
C ₁ x-1	3 879. 1	灰黑色泥质灰岩	2. 94	2. 76	3. 12	20	0. 10	2. 27	3. 23	2. 31	3. 07	3. 10	测点为固体沥青
C ₁ x-2	3 879. 5	灰黑色泥质灰岩	2. 89	2. 70	3. 08	22	0. 10	2. 23	3. 17	2. 28	3. 03	3. 05	测点为固体沥青
C ₁ x-4	3 880. 0	灰黑色泥质灰岩	2. 90	2. 81	3. 00	8	0. 05	2. 24	3. 18	2. 28	3. 03	3. 06	测点为固体沥青
C ₁ x-7	3 881. 8	灰黑色泥质灰岩	2. 94	2. 80	3. 08	12	0. 07	2. 27	3. 23	2. 31	3. 07	3. 10	测点为固体沥青
C ₁ x-8	3 882. 0	灰黑色泥质灰岩	2. 92	2. 70	3. 14	14	0. 11	2. 25	3. 21	2. 30	3. 05	3. 08	测点为固体沥青
C ₁ x-9	3 882. 5	灰黑色泥质灰岩	2. 95	2. 80	3. 10	28	0. 08	2. 27	3. 24	2. 32	3. 08	3. 11	测点为固体沥青
C ₁ x-10	3 884. 7	灰黑色泥质灰岩	2. 90	2. 71	3. 10	20	0. 10	2. 24	3. 18	2. 28	3. 03	3. 06	测点为固体沥青
C ₁ x-11	3 885. 8	灰黑色泥质灰岩	2. 92	2. 76	3. 08	11	0. 09	2. 25	3. 21	2. 30	3. 05	3. 08	测点为固体沥青
C ₁ x-13	3 887. 0	灰黑色泥质灰岩	2. 96	2. 76	3. 15	8	0. 10	2. 28	3. 25	2. 32	3. 09	3. 12	测点为固体沥青
C ₁ x-14	3 888. 0	灰黑色泥质灰岩	2. 90	2. 72	3. 08	6	0. 09	2. 24	3. 18	2. 28	3. 03	3. 06	测点为固体沥青
C ₁ x-15	3 889. 0	灰黑色泥质灰岩	2. 92	2. 71	3. 10	30	0. 10	2. 25	3. 21	2. 30	3. 05	3. 08	测点为固体沥青
C ₁ x-16	3 890. 0	灰黑色泥质灰岩	2. 99	2. 81	3. 19	26	0. 10	2. 30	3. 29	2. 34	3. 12	3. 16	测点为固体沥青
C ₁ x-17	3 891. 0	灰黑色泥质灰岩	3. 02	2. 86	3. 18	4	0. 09	2. 32	3. 32	2. 36	3. 15	3. 19	测点为固体沥青

续表6 塔里木盆地西北缘BY1井固体沥青镜质体反射率及其换算等效镜质体反射率

Table 6 (Continued) Statistics of vitrinite reflectance of bitumen from well BY1 in the northwestern Tarim Basin and its vitrinite equivalent reflectance

样品编号	深度/m	岩性	平均 $BR_b/\%$	$BR_{b,min}/\%$	$BR_{b,max}/\%$	测定 点数	标准 偏差	$EqVR_o/\%$ ^[28]	$EqVR_o/\%$ ^[29]	$EqVR_o/\%$ ^[30]	$EqVR_o/\%$ ^[31]	$EqVR_o/\%$ ^[32]	备注
C _{1x} -18	3 891.5	灰黑色泥质灰岩	2.95	2.72	3.18	14	0.12	2.27	3.24	2.32	3.08	3.11	测点为固体沥青
C _{1x} -19	3 891.8	灰黑色泥质灰岩	3.03	2.8	3.26	11	0.12	2.33	3.33	2.37	3.16	3.20	测点为固体沥青
C _{1x} -20	3 892.1	灰黑色泥质灰岩	3.05	2.82	3.28	30	0.12	2.34	3.36	2.38	3.18	3.23	测点为固体沥青
C _{1x} -21	3 892.8	灰黑色泥质灰岩	3.06	2.85	3.25	30	0.10	2.35	3.37	2.39	3.18	3.24	测点为固体沥青
C _{1x} -22	3 893.5	灰黑色泥质灰岩	2.95	2.70	3.24	30	0.15	2.27	3.24	2.32	3.08	3.11	测点为固体沥青
C _{1x} -23	3 894.0	灰黑色泥质灰岩	3.05	2.85	3.25	23	0.12	2.34	3.36	2.38	3.18	3.23	测点为固体沥青
C _{1x} -24	3 894.8	灰黑色泥质灰岩	2.91	2.62	3.20	30	0.16	2.25	3.20	2.29	3.04	3.07	测点为固体沥青
C _{1x} -25	3 896.6	灰黑色泥质灰岩	2.95	2.75	3.15	7	0.11	2.27	3.24	2.32	3.08	3.11	测点为固体沥青
C _{1x} -26	3 896.8	灰黑色泥质灰岩	3.04	2.85	3.25	15	0.11	2.33	3.34	2.38	3.17	3.21	测点为固体沥青
C _{1x} -31	3 944.4	灰色泥晶灰岩	3.40	3.22	3.58	4	0.15	2.57	3.76	2.62	3.50	3.62	测点为固体沥青
C _{1x} -32	3 945.2	灰色泥晶灰岩	3.32	3.01	3.64	22	0.15	2.52	3.67	2.56	3.43	3.53	测点为固体沥青
C _{1y} -34	3 953.4	灰黑色泥岩	3.34	3.24	3.44	30	0.06	2.53	3.69	2.58	3.45	3.55	测点为镜状体
C _{1y} -35	3 953.5	灰黑色泥岩	3.32	3.20	3.44	30	0.07	2.52	3.67	2.56	3.43	3.53	测点为镜状体
C _{1y} -36	3 953.7	灰黑色泥岩	3.40	3.21	3.60	30	0.10	2.57	3.76	2.62	3.50	3.62	测点为固体沥青
C _{1y} -37	3 954.0	灰黑色泥岩	3.30	3.14	3.46	30	0.09	2.50	3.64	2.55	3.41	3.51	测点为镜状体
最小值			2.89	2.62	3.00	4	0.05	2.23	3.17	2.28	3.03	3.05	
最大值			3.40	3.24	3.64	30	0.16	2.57	3.76	2.62	3.50	3.62	
平均值			3.05	2.86	3.24	19	0.10	2.34	3.36	2.38	3.18	3.23	

注: BR_b 为沥青镜质体反射率; $BR_{b,min}$ 为最小沥青镜质体反射率; $BR_{b,max}$ 为最大沥青镜质体反射率; $EqVR_o$ 为等效镜质体反射率。

表7 塔里木盆地西北缘BY1井岩石热解分析结果

Table 7 Analytical results of pyrolysis of rock samples from well BY1 in the northwestern Tarim Basin

样品编号	深度/m	岩性	$S_o/(mg/g)$	$S_1/(mg/g)$	$S_2/(mg/g)$	$T_{max}/^{\circ}C$	$Pg/(mg/g)$	PI	$PC/\%$	$TOC/\%$
C _{1x} -1	3 879.1	灰黑色泥质灰岩	0.022 7	3.912 6	1.540 5	413	0.18	0.41	0.01	1.93
C _{1x} -2	3 879.5	灰黑色泥质灰岩	0.023 5	3.156 7	1.435 8	548	0.13	0.37	0.01	1.46
C _{1x} -4	3 880.0	灰黑色泥质灰岩	0.018 6	5.913 4	1.474 2	418	0.21	0.47	0.02	1.01
C _{1x} -5	3 880.8	灰黑色泥质灰岩	0.016 5	4.943 2	1.476 5	438	0.13	0.44	0.01	0.72
C _{1x} -6	3 881.3	灰黑色泥质灰岩	0.023 3	0.716 8	0.986 0	429	0.15	0.49	0.01	0.62
C _{1x} -7	3 881.8	灰黑色泥质灰岩	0.025 8	0.698 4	0.953 0	419	0.22	0.45	0.02	1.11
C _{1x} -8	3 882.0	灰黑泥质含生屑灰岩	0.025 3	3.887 9	3.240 4	426	0.11	0.36	0.01	0.75
C _{1x} -9	3 882.5	灰黑色泥质灰岩	0.021 1	3.156 4	2.876 4	418	0.11	0.31	0.01	1.44
C _{1x} -10	3 884.7	灰黑色泥质灰岩	0.017 2	0.030 0	0.067 7	410	0.19	0.25	0.02	2.91
C _{1x} -11	3 885.8	灰黑色泥质灰岩	0.023 9	0.700 9	0.717 1	418	0.18	0.46	0.01	1.33
C _{1x} -12	3 886.0	灰黑色泥质灰岩	0.025 2	0.776 1	0.921 7	430	0.15	0.42	0.01	0.73
C _{1x} -13	3 887.0	灰黑色泥质灰岩	0.017 4	0.808 3	0.789 3	417	0.17	0.38	0.01	1.52
C _{1x} -14	3 888.0	灰黑色泥质灰岩	0.789 3	0.789 3	0.833 4	421	0.16	0.43	0.01	1.03
C _{1x} -15	3 889.0	灰黑色泥质灰岩	0.017 1	0.758 2	0.825 9	417	0.32	0.38	0.03	2.53
C _{1x} -16	3 890.0	灰黑色泥质灰岩	0.019 3	0.970 8	1.032 1	425	0.19	0.45	0.02	0.96
C _{1x} -17	3 891.0	灰黑色泥质灰岩	0.024 9	1.597 7	1.504 6	428	0.22	0.20	0.02	1.89
C _{1x} -18	3 891.5	灰黑色泥质灰岩	0.034 6	1.352 6	1.124 6	419	0.16	0.32	0.01	1.58
C _{1x} -19	3 891.8	灰黑色泥质灰岩	0.037 5	1.421 3	1.421 3	419	0.12	0.35	0.01	1.51
C _{1x} -20	3 892.1	灰黑色泥质灰岩	0.025 6	0.657 2	1.155 4	420	0.24	0.28	0.02	2.36
C _{1x} -21	3 892.8	灰黑色泥质灰岩	0.024 5	0.732 1	1.263 4	548	0.22	0.23	0.02	3.17
C _{1x} -22	3 893.5	灰黑色泥质灰岩	0.019 7	0.797 5	1.494 7	413	0.29	0.20	0.02	4.01
C _{1x} -23	3 894.0	灰黑色泥质灰岩	0.023 5	0.972 6	1.699 6	549	0.16	0.28	0.01	2.22
C _{1x} -24	3 894.8	灰黑色泥质灰岩	0.025 3	0.973 5	1.543 5	417	0.22	0.33	0.02	2.24
C _{1x} -25	3 896.6	灰黑色泥质灰岩	0.023 2	1.193 4	1.461 6	415	0.22	0.28	0.02	2.2

续表 7 塔里木盆地西北缘BY1井岩石热解分析结果

Table 7 (continued) Analytical results of pyrolysis of rock samples from well BY1 in the northwestern Tarim Basin

样品编号	深度/m	岩性	$S_o/(mg/g)$	$S_1/(mg/g)$	$S_2/(mg/g)$	$T_{max}/^{\circ}C$	$P_g/(mg/g)$	PI	$PC/\%$	$TOC/\%$
C_{1x-26}	3 896. 8	灰黑色泥质灰岩	0. 032 4	1. 674 9	1. 217 6	427	0. 20	0. 38	0. 02	0. 84
C_{1x-27}	3 940. 4	灰色泥晶灰岩	0. 023 2	0. 624 3	0. 686 6	486	0. 07	0. 35	0. 01	0. 10
C_{1x-31}	3 944. 4	灰色泥晶灰岩	0. 022 5	0. 730 2	0. 649 4	451	0. 08	0. 49	0. 01	0. 17
C_{1x-32}	3 945. 2	灰色泥晶灰岩	0. 024 2	0. 643 7	0. 743 4	448	0. 16	0. 19	0. 01	0. 13
C_{1y-34}	3 953. 4	灰黑色泥岩	0. 019 6	0. 275 4	2. 164 3	548	0. 93	0. 10	0. 08	28. 20
C_{1y-35}	3 953. 5	灰黑色泥岩	0. 018 6	0. 254 3	2. 521 4	549	0. 68	0. 08	0. 06	23. 20
C_{1y-36}	3 953. 7	灰黑色泥岩	0. 028 5	0. 296 5	2. 643 6	548	0. 29	0. 21	0. 02	7. 47
C_{1y-37}	3 954. 0	灰黑色泥岩	0. 027 5	0. 285 3	2. 428 6	436	0. 93	0. 21	0. 08	11. 20
C_{1y-38}	3 954. 3	灰黑色硅质泥岩	0. 018 0	0. 247 4	2. 137 5	425	0. 13	0. 31	0. 01	1. 17
C_{1y-39}	3 954. 8	灰色粉晶白云岩	0. 014 0	0. 296 5	2. 274 2	428	0. 16	0. 43	0. 01	0. 46
C_{1y-40}	3 955. 3	灰色粉晶白云岩	0. 020 0	0. 481 1	1. 770 0	423	0. 14	0. 26	0. 01	0. 13
最小值			0. 014 0	0. 030 0	0. 067 7	410	0. 07	0. 08	0. 01	0. 10
最大值			0. 789 3	5. 913 4	3. 240 4	549	0. 93	0. 49	0. 08	28. 20
平均值			0. 064 2	1. 423 5	1. 469 8	449	0. 25	0. 33	0. 02	3. 85

注: S_o 为气态烃含量; S_1 为游离烃含量; S_2 为热解烃含量; T_{max} 为最高热解温度; P_g 为产油潜量; PI 为产率指数; PC 为有效碳; TOC 为总有机碳含量。

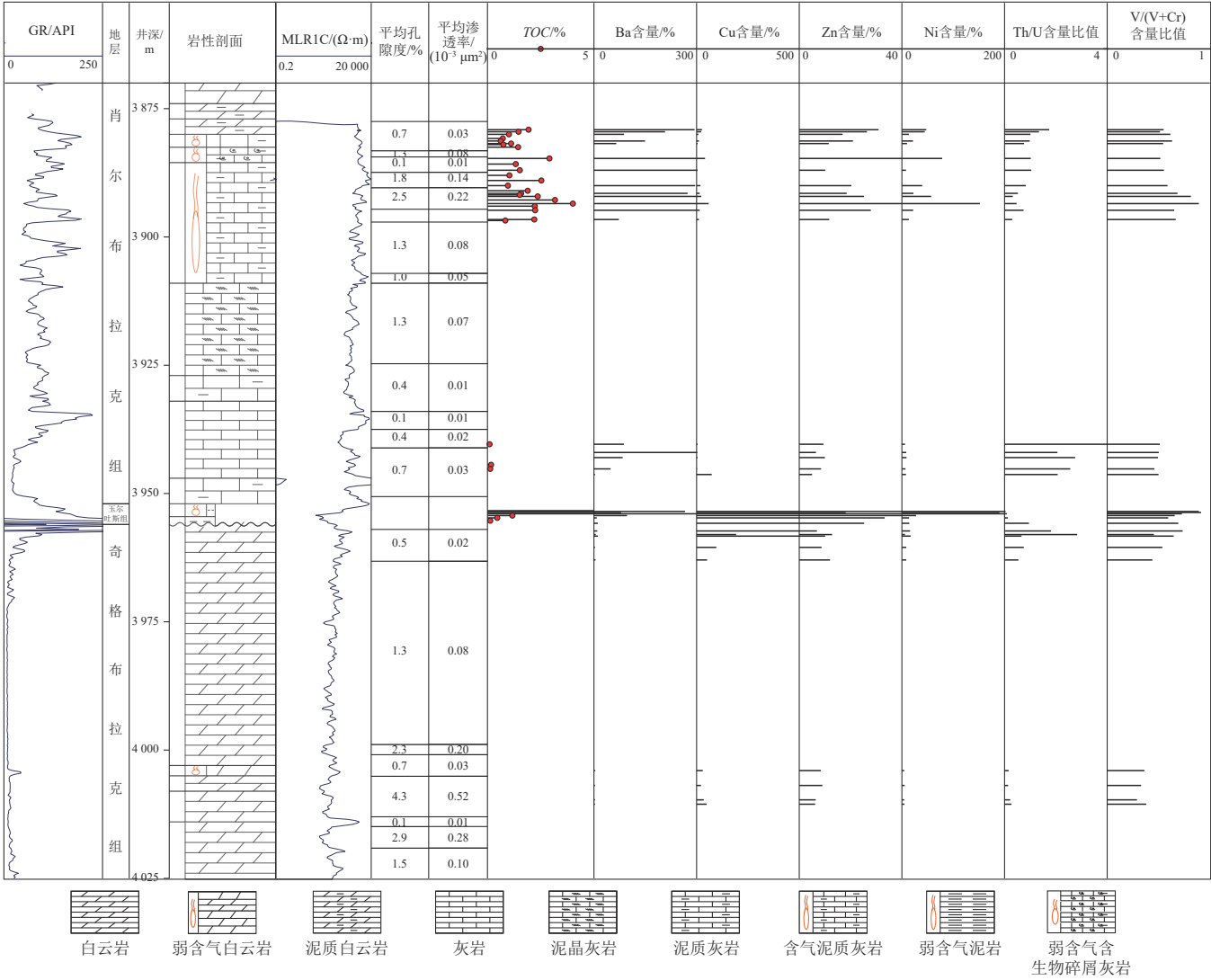


图 3 塔里木盆地西北缘BY1井地化剖面综合柱状图

Fig. 3 Composite column of the geochemical profile revealed by well BY1 in the northwestern Tarim Basin

TOC 与 (S_1+S_2) 交会图版(图4)显示,玉尔吐斯组和肖尔布拉克组的样品均达到了中等-好的烃源岩标准。KPN1井的生烃潜量范围在0.04~0.70 mg/g,平均值为0.26 mg/g。而XSC1井的生烃潜量则介于0.69~1.25 mg/g,平均值为0.96 mg/g。整体而言,塔西北柯坪地区的样品生烃潜量普遍不高,这一现象很可能与该地区烃源岩处于高-过成熟的热演化阶段有关,其中大量可溶烃类已经逸散。

3.3 微量元素地球化学特征

古生产力水平和氧化还原条件是决定海相沉积环境中有机质生成与保存的关键因素,古生产力水平为有机质的生成提供了必要的物质基础,而氧化还原条件则对有机质的保存起着至关重要的作用^[33]。据研究,Ba、Cu、Zn和Ni等元素含量可以作为反映古生产力水平的指标,而Th/U和V/(V+Cr)元素含量比值则能够揭示沉积环境的氧化还原状态^[34]。与有机质含量较低的震旦系奇格布拉克组相比,玉尔吐斯组和肖下段的Ba、Cu、Zn和Ni元素含量显著增加(图3)。这表明,在该地质历史时期,较高含量的有机质被带入了沉积物中,并在适

宜的温度、光照和水深条件下生成了大量的有机质。通常,Th/U含量比值小于2.00被视为缺氧环境的标志^[35]。在柯坪地区的BY1井肖下段,Th/U含量比值主要分布在0.30~2.75,平均值为1.24,这一数值明显低于2.00,指示了一个强还原环境的存在。同时,较高的V/(V+Cr)含量比值也进一步支持了这一强还原环境的判断,这种强还原环境对于有机质的保存极为有利。

4 塔西北地区寒武系肖尔布拉克组烃源岩分布

塔西北地区肖尔布拉克组烃源岩主要由泥质灰岩和泥岩构成,尽管关于碳酸盐岩作为烃源岩的 TOC 下限存在不同观点,但多数学者认同0.50%为有效烃源岩的 TOC 下限,而在高-过成熟区,这一标准可放宽至0.40%^[36-37]。本次研究中钻井和露头资料揭示,BY1井、KTJ1井、KPN1井和XSC1井钻遇的肖尔布拉克组 TOC 平均值均超过0.40%,可视为有效烃源岩。通过对比4口井的地化剖面发现(图5),肖尔布拉克组中-下段烃源岩条件优于上段。

根据塔西北柯坪断隆地震剖面(图6)及肖下段烃源岩厚度数据绘制了塔西北肖下段烃源岩分布图(图7)。图中可见BY1井和KTJ1井肖下段烃源岩厚度最大,分别达到了83 m和82 m,以2口井为中心,向外扩展,烃源岩的厚度逐渐减薄,例如,XSC1井肖下段烃源岩厚约61 m,KPN1井肖下段烃源岩厚约24 m。推测,塔西北地区可能存在一个以BY1井和KTJ1井为沉积中心的台内洼地,该洼地在玉尔吐斯组和肖尔布拉克组沉积时期处于缺氧环境,沉积厚层的泥质灰岩和泥岩,还原环境有利于有机质的保存,形成优质烃源岩。肖下段烃源岩丰度和厚度数据表明,塔西北地区寒武系肖下段发育一套有效烃源岩,该套烃源岩 TOC 高(0.10%~7.56%)、厚度大(20~90 m)、分布面积广($2\times 10^4\sim 3\times 10^4\text{ km}^2$)。这一发现颠覆了以往塔西北地区寒武系仅发育玉尔吐斯组烃源岩的传统观点^[38-39],极大地提升了该地区深层油气的勘探价值。这一新认识为深层油气资源评价和勘探部署提供了重要依据,有望推动塔西北地区油气勘探的进一步发展。

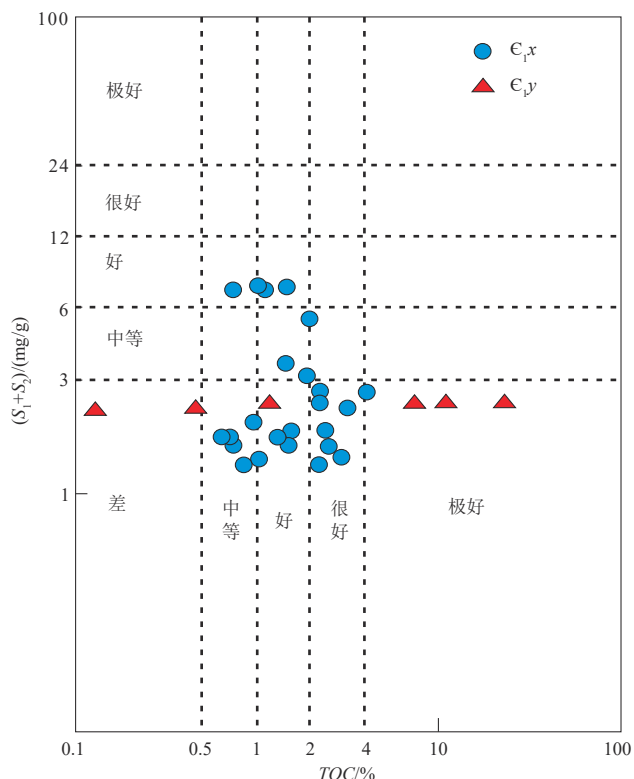


图4 塔里木盆地西北缘BY1井寒武系玉尔吐斯组和肖尔布拉克组样品 TOC 与 S_1+S_2 交会图

Fig. 4 TOC content vs. $S_1 + S_2$ cross plot of samples from the Cambrian Yuertusi and Xiaerbulake formations in well BY1 in the northwestern Tarim Basin

5 结论

1) 塔里木盆地西北缘寒武系肖下段主要以灰色泥质灰岩、泥质粉晶白云岩和云质灰岩为主,烃源岩厚

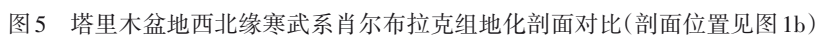


Fig. 6 Seismic section of the Keping fault uplift in the northwestern Tarim Basin (see Fig. 1b for the section location)

C_1 , 下寒武统; C_2 , 中寒武统; C_3 , 上寒武统; O_4 , 上奥陶统 萨尔干组; S, 志留系; D, 泥盆系; C, 石炭系; P, 二叠系; N, 古近系

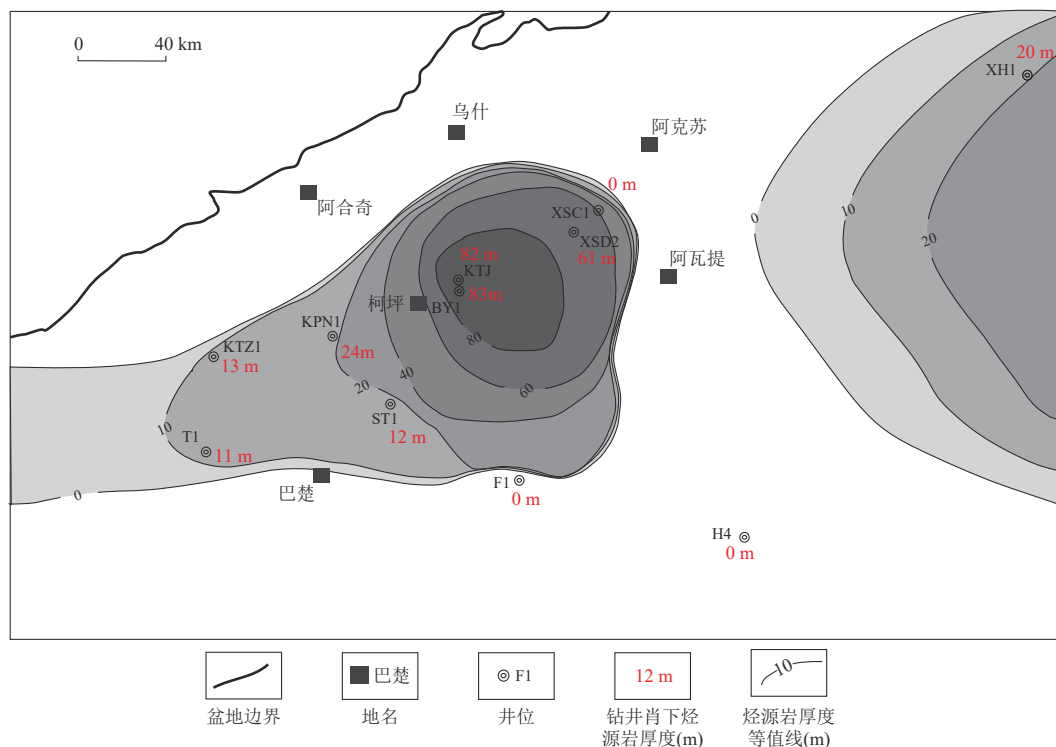


图7 塔里木盆地西北缘钻井寒武系肖尔布拉克组烃源岩平面展布

Fig. 7 Planar distribution of source rocks in the Cambrian Xiaoerbulake Formation in the northwestern Tarim Basin

度约20~90 m。BY1井、KTJ1井、KPN1井、XSC1井和3个野外露头样品测试结果显示其 TOC 平均值介于0.45%~2.39%,显示出良好的烃源岩特性。

2) 塔西北肖尔布拉克组等效镜质体反射率普遍超过2.00%,表明该区肖尔布拉克组的有机质已经进入高-过成熟生气阶段,而生烃潜量数据普遍较低,可能与其演化程度高导致大量可溶烃类逸散有关。

3) BY1井的玉尔吐斯组和肖下段中,Ba、Cu、Zn和Ni等元素含量明显偏高,表明其具有较高的古生产力水平。此外,Th/U元素含量比值主要分布在0.30~2.75,平均值为1.24,指示了一个强还原环境的存在。

4) KTJ1井、BY1井和XSC1井的肖尔布拉克组位于台内洼陷沉积,闭塞缺氧的环境为有机质的保存提供了有利条件,进而形成了一套有效的烃源岩,该项认识为深层油气资源评价和勘探部署提供了重要依据。

参 考 文 献

- [1] 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.
YANG Haijun, CHEN Yongquan, TIAN Jun, et al. Great discovery and its significance of ultra-deep oil and gas exploration in Well Luntan-1 of the Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(2): 62-72.
- [2] 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.
ZHU Guangyou, HU Jianfeng, CHEN Yongquan, et al. Geochemical characteristics and formation environment of source rock of the Lower Cambrian Yuertusi Formation in well Luntan 1 in Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2022, 96(6): 2116-2130.
- [3] 吕修祥,白忠凯,谢玉权,等. 塔里木盆地西北缘柯坪地区油气勘探前景再认识[J]. 沉积学报, 2014, 32(4): 766-775.
LYU Xiuxiang, BAI Zhongkai, XIE Yuquan, et al. Reconsideration on petroleum exploration prospects in the Kalpin thrust belt of northwestern Tarim Basin [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(4): 766-775.
- [4] 熊冉,周进高,倪新锋,等. 塔里木盆地寒武统玉尔吐斯组烃源岩分布预测及油气勘探的意义[J]. 天然气工业, 2015, 35(10): 49-56.
XIONG Ran, ZHOU Jingao, NI Xinfeng, et al. Distribution prediction of Lower Cambrian Yuertusi Formation source rocks and its significance to oil and gas exploration in the Tarim Basin [J]. Natural Gas Industry, 2015, 35(10): 49-56.
- [5] 刘丽红,高永进,王丹丹,等. 塔里木盆地寒武系膏盐岩对盐下白云岩储层的影响[J]. 岩石矿物学杂志, 2021, 40(1): 109-120.
LIU Lihong, GAO Yongjin, WANG Dandan, et al. The impact of gypsum salt rock on Cambrian subsalt dolomite reservoir in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Et Mineralogica, 2021, 40(1): 109-120.

- [6] 朱光有, 陈斐然, 陈志勇, 等. 塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组优质烃源岩的发现及其基本特征[J]. 天然气地球科学, 2016, 27(1): 8–21.
ZHU Guangyou, CHEN Feiran, CHEN Zhiyong, et al. Discovery and basic characteristics of the high-quality source rocks of the Cambrian Yuertusi Formation in Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2016, 27(1): 8–21.
- [7] 王飞宇, 张水昌, 张宝民, 等. 塔里木盆地寒武系海相烃源岩有机成熟度及演化史[J]. 地球化学, 2003, 32(5): 461–468.
WANG Feiyu, ZHANG Shuichang, ZHANG Baomin, et al. Maturity and its history of Cambrian marine source rocks in the Tarim Basin [J]. Geochimica, 2003, 32(5): 461–468.
- [8] 刘丽红, 高永进, 朱光有, 等. 塔里木盆地西北缘埃迪卡拉纪—寒武纪转折期黑色岩系中硅质岩成因及其环境指示意义[J]. 地质学报, 2024, 98(2): 511–529.
LIU Lihong, GAO Yongjin, ZHU Guangyou, et al. Genesis of siliceous rock in the black rock series of Ediacaran-Cambrian transition and its environmental significance in northwestern Tarim Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(2): 511–529.
- [9] 熊冉, 郑剑锋, 黄理力, 等. 塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组丘滩体露头地质建模及地震正演模拟[J]. 天然气地球科学, 2020, 31(5): 735–744.
XIONG Ran, ZHENG Jianfeng, HUANG Lili, et al. Mound-shoal complexes geological and seismic forward modeling of the Cambrian Xiaerbulake Formation in the Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2020, 31(5): 735–744.
- [10] 郑剑锋, 潘文庆, 沈安江, 等. 塔里木盆地柯坪露头区寒武系肖尔布拉克组储集层地质建模及其意义[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(3): 499–511.
ZHENG Jianfeng, PAN Wenqing, SHEN Anjiang, et al. Reservoir geological modeling and significance of Cambrian Xiaerbulak Formation in Keping outcrop area, Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(3): 499–511.
- [11] 吕海涛, 耿锋, 尚凯. 塔里木盆地寒武系盐下领域勘探关键问题与攻关方向[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(5): 1049–1058.
LYU Haitao, GENG Feng, SHANG Kai. Key factors and directions of exploration in the Cambrian pre-salt sequence, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(5): 1049–1058.
- [12] 刘丽红, 韩森, 高永进, 等. 塔里木盆地寒武系肖尔布拉克组储层发育主控因素及成岩演化过程——以柯坪南1井为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(5): 763–779.
LIU Lihong, HAN Miao, GAO Yongjin, et al. Main reservoir controlling factors and diagenetic evolution of the Xiaerbulak Formation of Tarim Basin, NW China: Case study of Well Kepingnan 1 in Keping area [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(5): 763–779.
- [13] 刘丽红, 韩森, 田亚, 等. 白云岩矿特征、成因类型、分布及其开发利用价值[J]. 中国地质, 2023.
LIU Lihong, HAN Miao, TIAN Ya, et al. The characteristics, types, distributions and utilization value of dolomite deposit [J]. Geology in China, 2023.
- [14] 李峰, 朱光有, 吕修祥, 等. 塔里木盆地古生界海相油气来源争议与寒武系主力烃源岩的确定[J]. 石油学报, 2021, 42(11): 1417–1436.
LI Feng, ZHU Guangyou, LYU Xiuxiang, et al. The disputes on the source of Paleozoic marine oil and gas and the determination of the Cambrian system as the main source rocks in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(11): 1417–1436.
- [15] 易士威, 李明鹏, 郭绪杰, 等. 塔里木盆地南华纪古裂谷对寒武系沉积的控制及勘探意义[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1293–1308.
YI Shiwei, LI Mingpeng, GUO Xujie, et al. Control of the Nanhua paleo-rift on Cambrian sedimentation and its exploration significance in Tarim Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(11): 1293–1308.
- [16] 陈强路, 储呈林, 杨鑫, 等. 塔里木盆地寒武系沉积模式与烃源岩发育[J]. 石油实验地质, 2015, 37(6): 689–695.
CHEN Qianglu, CHU Chenglin, YANG Xin, et al. Sedimentary model and development of the Cambrian source rocks in the Tarim Basin, NW China [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2015, 37(6): 689–695.
- [17] 白忠凯, 韩森, 邱海峻, 等. 塔里木盆地柯坪冲断带寒武系肖尔布拉克组下段古氧相研究[J]. 中国矿业, 2017, 26(增刊2): 213–217.
BAI Zhongkai, HAN Miao, QIU Haijun, et al. Paleo-oxygen facies conditions of lower member of Cambrian Xiaerbulak formation in Kalpin thrust belt, Tarim Basin [J]. China Mining Magazine, 2017, 26(S2): 213–217.
- [18] 白忠凯, 谢李, 韩森, 等. 塔里木盆地柯坪地区寒武系肖尔布拉克组下段古生产力研究[J]. 中国地质, 2018, 45(2): 227–236.
BAI Zhongkai, XIE Li, HAN Miao, et al. Paleoproductivity conditions of lower member of Cambrian Xiaerbulak Formation in Kalpin thrust belt, Tarim Basin [J]. Geology in China, 2018, 45(2): 227–236.
- [19] 汪宗欣, 吕修祥, 钱文文. 寒武系海相碳酸盐岩元素地球化学特征及其油气地质意义——以塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组为例[J]. 天然气地球科学, 2017, 28(7): 1085–1095.
WANG Zongxin, LYU Xiuxiang, QIAN Wenwen. Geochemical characteristics of the Cambrian marine carbonate elements and its petroleum geological significance: Case study of Xiaerbulake Formation in Keping area of Tairm Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(7): 1085–1095.
- [20] 张君峰, 高永进, 周新桂, 等. 塔里木盆地温宿凸起石油地质特征及油气远景, [M]. 北京: 地质出版社, 2020.
ZHANG Junfeng, GAO Yongjin, ZHOU Xingui, et al. Petroleum geological characteristics and oil and gas prospects of Wensu uplift in Tarim Basin [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2020.
- [21] 刘亚雷, 高永进, 张君峰, 等. 塔里木盆地温宿凸起构造特征新认识[J]. 岩石学报, 2022, 38(9): 2665–2680.
LIU Yalei, GAO Yongjin, ZHANG Junfeng, et al. New understanding of tectonic characteristic of the Wensu salient in Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2022, 38(9): 2665–2680.
- [22] 贾承造. 环青藏高原巨型盆山体系统构造与塔里木盆地油气分布规律[J]. 大地构造与成矿学, 2009, 33(1): 1–9.

- JIA Chengzao. The structures of basin and range system around the Tibetan Plateau and the distribution of oil and gas in the Tarim Basin[J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 1-9.
- [23] 李曰俊, 杨海军, 赵岩, 等. 南天山区域大地构造与演化[J]. *大地构造与成矿学*, 2009, 33(1): 94-104.
- LI Yuejun, YANG Haijun, ZHAO Yan, et al. Tectonic framework and evolution of South Tianshan, NW China [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 2009, 33(1): 94-104.
- [24] 黄擎宇, 胡素云, 潘文庆, 等. 塔里木盆地巴楚地区寒武系储层特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(6): 982-993.
- HUANG Qingyu, HU Suyun, PAN Wenqing, et al. Characteristics and controlling factors of the Cambrian carbonate reservoirs in Bachu area, Tarim Basin, NW China [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(6): 982-993.
- [25] 邓世彪, 关平, 庞磊, 等. 塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组优质微生物碳酸盐岩储层成因[J]. *沉积学报*, 2018, 36(6): 1218-1232.
- DENG Shibiao, GUAN Ping, PANG Lei, et al. Genesis of excellent Xiaoerbulak microbial carbonate reservoir in Kalpin area of Tarim Basin, NW China [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2018, 36(6): 1218-1232.
- [26] 姜伟民, 刘波, 石开波, 等. 塔里木盆地柯坪地区肖尔布拉克组碳酸盐岩微相类型和储集层特征[J]. *新疆石油地质*, 2019, 40(4): 437-448.
- JIANG Weimin, LIU Bo, SHI Kaibo, et al. Microfacies and characteristics of carbonate reservoir in Xiaoerbulake Formation of Keping area, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2019, 40(4): 437-448.
- [27] 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.
- YANG Haijun, YU Shuang, ZHANG Haizu, et al. Geochemical characteristics of Lower Cambrian sources rocks from the deepest drilling of Well LT-1 and their significance to deep oil gas exploration of the Lower Paleozoic system in the Tarim Basin [J]. *Geochimica*, 2020, 49(6): 666-682.
- [28] 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, 7.
- FENG Guoxiu, CHEN Shengji. Relationship between the reflectance of bitumen and vitrinite in rock [J]. *Natural Gas Industry*, 1988, 8(3): 20-25, 7.
- [29] BERTRAND R. Standardization of solid bitumen reflectance to vitrinite in some Paleozoic sequences of Canada [J]. *Energy Sources*, 1993, 15(2): 269-287.
- [30] 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, 21(3): 113-115.
- LIU Dehan, SHI Jiyang. Discussion on unconventional evaluation method of high maturity carbonate source rock [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 1994, 21(3): 113-115.
- [31] SCHMIDT J S, MENEZES T R, SOUZA I V A F, et al. Comments on empirical conversion of solid bitumen reflectance for thermal maturity evaluation [J]. *International Journal of Coal Geology*, 2019, 201: 44-50.
- [32] 王晔, 邱楠生, 马中良, 等. 固体沥青反射率与镜质体反射率的等效关系评价[J]. *中国矿业大学学报*, 2020, 49(3): 563-575.
- WANG Ye, QIU Nansheng, MA Zhongliang, et al. Evaluation of equivalent relationship between vitrinite reflectance and solid bitumen reflectance [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2020, 49(3): 563-575.
- [33] 解习农, 殷鸿福, 谢树成. 海相烃源岩的正反演对比分析[J]. *地球科学*, 2007, 32(6): 861-867.
- XIE Xinong, YIN Hongfu, XIE Shucheng. Comparison on forward and inverse analysis methods of marine hydrocarbon source rocks [J]. *Earth Science*, 2007, 32(6): 861-867.
- [34] TRIBOVILLARD N, ALGEO T J, BAUDIN F, et al. Analysis of marine environmental conditions based on molybdenum - uranium covariation—Applications to Mesozoic paleoceanography [J]. *Chemical Geology*, 2012, 324/325: 46-58.
- [35] WIGNALL P B, TWITCHETT R J. Oceanic anoxia and the end Permian mass extinction [J]. *Science*, 1996, 272(5265): 1155-1158.
- [36] 陈建平, 梁狄刚, 张水昌, 等. 中国古生界海相烃源岩生烃潜力评价标准与方法[J]. *地质学报*, 2012, 86(7): 1132-1142.
- CHEN Jianping, LIANG Digang, ZHANG Shuichang, et al. Evaluation criterion and methods of the hydrocarbon generation potential for China's Paleozoic marine source rocks [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2012, 86(7): 1132-1142.
- [37] 徐兆辉, 胡素云, 曾洪流, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克组上段烃源岩分布预测及油气勘探意义[J]. *地学前缘*, 2024, 31(2): 343-358.
- XU Zhaohui, HU Suyun, ZENG Hongliu, et al. Distribution and hydrocarbon significance of source rock in the Upper Xiaoerbulake Formation, Tarim Basin, NW China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2024, 31(2): 343-358.
- [38] 马庆佑, 曾联波, 徐旭辉, 等. 塔里木盆地肖尔布拉克剖面走滑断裂带内部结构及控储模式[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 69-78. DOI:10.11743/ogg20220106.
- MA Qingyou, ZENG Lianbo, XU Xuhui, et al. Internal architecture of strike-slip fault zone and its control over reservoirs in the Xiaoerbulake section, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 69-78. DOI:10.11743/ogg20220106.
- [39] 郑见超, 李斌, 袁倩, 等. 塔里木盆地巴楚-塔北地区深层寒武系油气成藏过程与勘探方向[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(1): 79-91.
- ZHENG Jianchao, LI Bin, YUAN Qian, et al. Hydrocarbon accumulation process and exploration direction of the deep Cambrian in Bachu-Tabei area, Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(1): 79-91.

(编辑 许诺)