

塔里木盆地柯坪南地区复杂山前带微生物地球化学勘探

段野^{1,2,3},陈永权¹,刘成鑫³,成艳³,张昊³,许风光³,周鹏³,丁力⁴,吴宇兵⁴

[1. 中国科学院南京地质古生物研究所,江苏南京210008;2. 中国科学院大学,北京100049;3. 新疆申能石油天然气有限公司,上海200041;4. 盎亿泰地质微生物技术(北京)有限公司,北京102200]

摘要:在复杂地质条件下,地震资料往往成像精度低,多解性强,难以有效开展烃类检测及流体识别。以塔里木盆地柯坪南地区为例,探讨微生物油气检测技术在复杂山前带地区的适用性,为油气勘探提供多技术融合的新途径。通过检测地表微生物的含量和分布特征,预测了地下油气富集区并判别流体性质,并结合地震信息开展了综合评价。研究结果表明:①研究区共识别出5个稳定的微生物异常区,通过微生物指标与地球化学指标综合评价将研究区划分为3类有利区。②微生物高值分布区保存条件最好,且具有一定的构造背景,为一类异常区;异常微生物高值分布区保存条件较好,且与构造均有不同程度的匹配性,为二类异常区;构造暂不落实的区域,评价为三类异常区。③异常区分布得到了后续钻井的验证,吻合度较好。④微生物地球化学技术在复杂山前带地区的应用取得了较好的效果,微生物油气检测技术通过烃氧化菌丰度直接反映现今渗漏活动,对动态保存条件敏感,适用于快速圈定有利区。⑤地球化学技术通过历史吸附烃反映长期渗漏累积,两者互补,形成“动态充注-历史保存”双指标模型,在无可靠直接烃类指示数据时,可进行勘探有利区的识别和评价。在柯坪南地区用地震技术建立构造格架,以微生物技术为主导开展勘探目标优选,辅以地球化学技术验证保存条件演化,这一种地震-微生物-地球化学协同新模式可为复杂山前带油气勘探提供新思路。

关键词:微生物油气检测技术;烃氧化菌;酸解吸附烃;微生物异常;地球化学;复杂山前带;柯坪南地区;塔里木盆地

中图分类号:TE132.4

文献标识码:A

Microbial geochemistry of a complex piedmont zone in the southern Keping area, Tarim Basin

DUAN Ye^{1,2,3}, CHEN Yongquan¹, LIU Chengxin³, CHENG Yan³, ZHANG Hao³, XU Fengguang³, ZHOU Peng³, DING Li⁴, WU Yubing⁴

(1. Nanjing Institute of Geology and Palaeontology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Xinjiang Shenergy Petroleum Co., Ltd., Shanghai 200041, China; 4. AE&E Geomicrobial Technologies Inc., Beijing 102200, China)

Abstract: In complex geological settings, seismic data often suffer from limited imaging accuracy and a strong multiplicity of possible interpretations, making it difficult to conduct effective hydrocarbon detection and fluid identification. By investigating the southern Keping area, Tarim Basin, we assess the applicability of the microbial oil survey technique (MOST) to complex piedmont zones, aiming to develop a novel, integrated multi-technique approach to hydrocarbon exploration. By analyzing the content and distribution of surface microorganisms, we predict the subsurface hydrocarbon enrichment zones and identify the fluid properties. A comprehensive assessment is conducted by combining microbial data with seismic data. The results indicate the presence of five stable microbial anomaly zones within the study area. The comprehensive assessment based on microbial and geochemical indicators reveals that the study area can be divided into three categories of play fairway, i. e., classes I, II, and III anomaly zones. Class I anomaly zones, among others, are characterized by high microbial values (MVs), optimal hydrocarbon preservation conditions, and favorable structural trap conditions. Class II anomaly zones exhibit high MVs and favorable preservation conditions but moderate structural trap conditions. In contrast, microbial anomaly zones with poor structural trap

收稿日期:2025-02-10;修回日期:2025-05-09。

第一作者简介:段野(1990—),男,博士研究生、高级工程师,油气勘探技术方法、石油地质和沉积储层等。E-mail: bieqingwen123@163.com。

基金项目:深地国家科技重大专项(2025ZD1010303)。

conditions are classified as class III. The distribution of the anomaly zones has been confirmed by subsequent drilling, exhibiting a high degree of consistency. The microbial geochemical technique has yielded encouraging application results in the complex piedmont zone. The MOST, which directly reflects the present-day hydrocarbon leakage activity based on the abundance of hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOB), is highly sensitive to dynamic hydrocarbon preservation conditions, making it suitable for the rapid delineation of play fairways. In contrast, the geochemical technique, i. e., sorbed soil gas (SSG), captures long-term hydrocarbon leakage by detecting historically adsorbed hydrocarbons. MOST and SSG thus complement each other, forming a dual-indicator model that considers both dynamic charging and historical preservation. This model allows for the assessment and classification of play fairways in cases where no reliable direct hydrocarbon indicators (DHIs) are available. Overall, a novel seismic-microbial-geochemical integrated model has been established for the southern Keping area, in which the tectonic framework is defined using seismic data, optimal exploration targets are primarily selected using MOST, and the evolution of hydrocarbon preservation conditions is validated using SSG. This integrated model can provide new ideas for hydrocarbon exploration in the complex piedmont zone.

Key words: microbial oil survey technique (MOST), hydrocarbon-oxidizing bacteria (HOB), acid-extracted hydrocarbon, microbial anomaly, geochemistry, complex piedmont zone, southern Keping area, Tarim Basin

引用格式:段野,陈永权,刘成鑫,等. 塔里木盆地柯坪南地区复杂山前带微生物地球化学勘探[J]. 石油与天然气地质,2026,47(1):34-43. DOI: 10.11743/ogg20260103.

DUAN Ye, CHEN Yongquan, LIU Chengxin, et al. Microbial geochemistry of a complex piedmont zone in the southern Keping area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(1): 34-43. DOI: 10.11743/ogg20260103.

微生物油气检测技术是一种以轻烃微渗漏为理论基础^[1],通过采集和检测地表土壤或海底表层沉积物样品中烃氧化菌含量和轻烃浓度,圈定微生物异常范围,确定地球化学组分特征,钻前预测圈闭含油气性及流体性质的勘探技术。近年来,在传统采集和检测技术的基础上,先后发展了现场快速检测、环境校正和保存条件预测等新技术,成果可靠性不断提升^[2]。在准噶尔盆地南缘冲断带超深层^[3]、车排子凸起火山岩油气藏勘探^[4]等方面均取得了较好的效果,展现出在圈闭含油气性预测方面良好的应用前景。

塔里木盆地柯坪南地区地表条件差,地下构造复杂,走滑+逆冲断裂系统十分发育,属于典型的“双复杂”山前构造带,在油气勘探方面至今仍处于初期阶段。周边早期仅钻探舒探1井和柯探1井(中国石油),均未获得油气发现^[5]。2019年9月,在柯坪北部地区钻探的柯探1井(京能集团)在寒武系吾松格组碳酸盐岩地层中试油取得重大突破,开辟了塔里木盆地天然气勘探的新区域。经测试,该井天然气自然日产气量达 $6 \times 10^4 \text{ m}^3$,酸化改造后日产气量达 $114 \times 10^4 \text{ m}^3$,无阻流量 $220 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。这是首次在柯坪地区获得工业油气发现,证实了柯坪断隆面积 $2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的油气勘探潜力,为塔里木盆地中-下寒武统的油气勘探提供了重要借鉴意义。然而,柯坪南地区相比邻区有效烃源岩展布范围不清晰,生烃量不落实;受山前带地震资料品质影响,寒武系盐下构造形态不清

晰,储层预测及烃类检测工作也很难开展,无法提取可靠的直接烃类指示(DHI)属性(如振幅随偏移距变化异常和频率衰减等),这些因素都制约着柯坪南地区的勘探效率^[6]。针对这种复杂新区,可在传统地震勘探技术落实圈闭的基础上借助微生物油气检测技术的高效、灵敏和快捷的特点,快速圈定有利区域,降低勘探成本,优选钻探目标,助力勘探突破^[7]。因此,本文以塔里木盆地柯坪南地区为例,探索将地震勘探与微生物油气检测及地球化学技术相结合的综合勘探方法在复杂山前带地区的适用性和有效性,并评估保存条件评价新技术的应用效果。

1 研究区概况

研究区构造位置属于塔里木盆地西北缘柯坪断隆阿合奇凸起中部,北以乌恰-阿合奇断裂为界与南天山相邻,南以柯坪塔格断裂与巴楚隆起分界,东接阿瓦提凹陷,西至喀什凹陷(图1)。该构造区段以发育东西向—北东东向叠瓦状逆冲推覆构造为特征,区段内发育了多排与山脉走向近于平行的逆冲推覆体,构造样式主要包括叠瓦逆冲构造和褶皱构造。全区有二维、三维地震以及时-频电磁等地球物理资料,主要目的层为奥陶系、寒武系和震旦系碳酸盐岩储层及上部志留系碎屑岩储层。地表地貌以山地和戈壁为主,山地第四系土壤覆盖较薄,多处基岩出

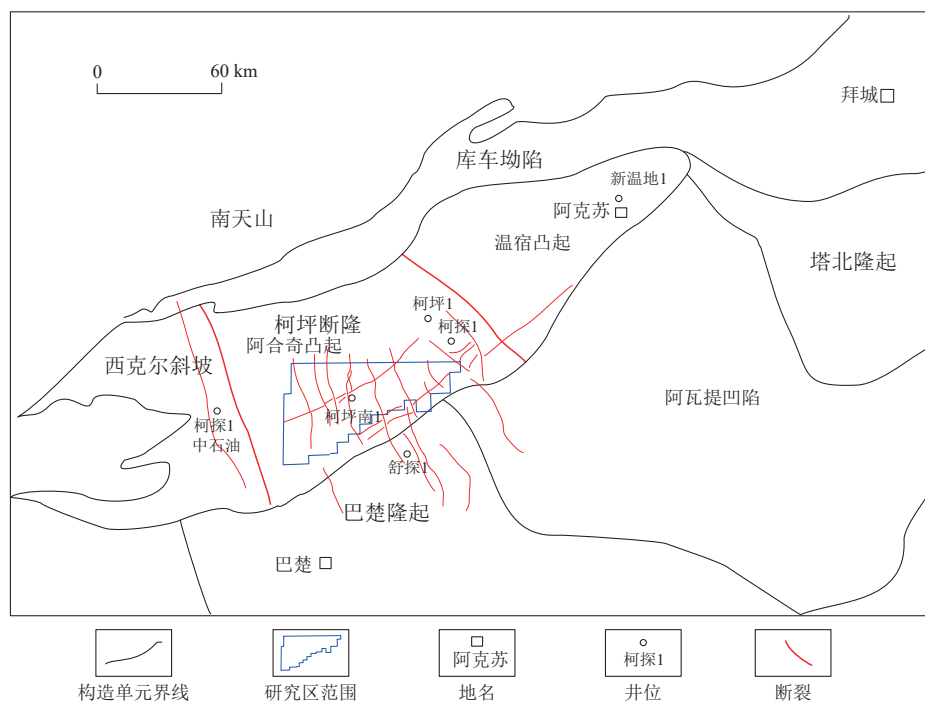


图1 塔里木盆地柯坪南地区构造位置

Fig. 1 Tectonic location of the southern Keping area, Tarim Basin

露;戈壁区土壤厚度较大,大部分区域适合开展微生物油气检测工作(图2)。

2 方案设计与实验分析

2.1 方案设计

依据微生物圈闭和区带烃检测的设计原则,以柯探1井(工业油气井)和舒探1井(干井)为正演模型,研究已知油气井和干井微生物响应特征,建立地质对比

依据^[8];基于二维和三维地震资料,针对1号和2号构造目标进行均匀网格布设,测点网格间距 $500\text{ m} \times 500\text{ m}$;针对3号构造,沿着已有二维地震测线进行布设,测点间距 500 m 。

研究区共布设1 687个点位,网格总面积为 274 km^2 ,测线总长度为 139 km (图3)。

2.2 野外采集

在开展野外采集工作时,为了尽量抑制与减少自然因素的不良影响,需要制订严格的样品采集与预处理操作规范并付诸执行,以确保土壤样品中的微生物以及烃类组分始终处于稳定状态。本次研究野外采样深度约为 20 cm ,重量 $150 \sim 200\text{ g}$ 。研究表明随着深度的增加,微生物的发育强度有显著降低的趋势^[9]。这是由于烃氧化菌在有氧环境下生长,随着深度增加,土壤含氧量显著降低,微生物活性就会降低。越接近地表,微生物检测数值的分辨率越高,但接近地表,表层的土壤受环境影响也较大。

2.3 实验分析

2.3.1 实验分析原理

实验室分析分为微生物和酸解吸附烃两个内容,微生物检测与酸解吸附烃分析流程如图4所示,分别

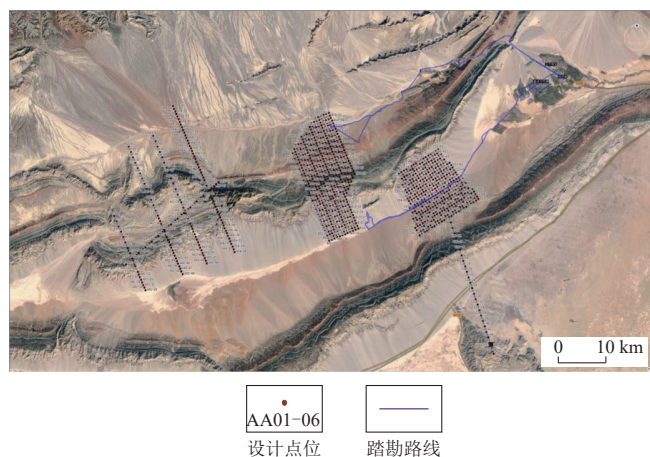


图2 塔里木盆地柯坪南地区设计点位分布与地貌环境叠合

Fig. 2 Geomorphologic environment map with superimposed designed survey points of the southern Keping area, Tarim Basin

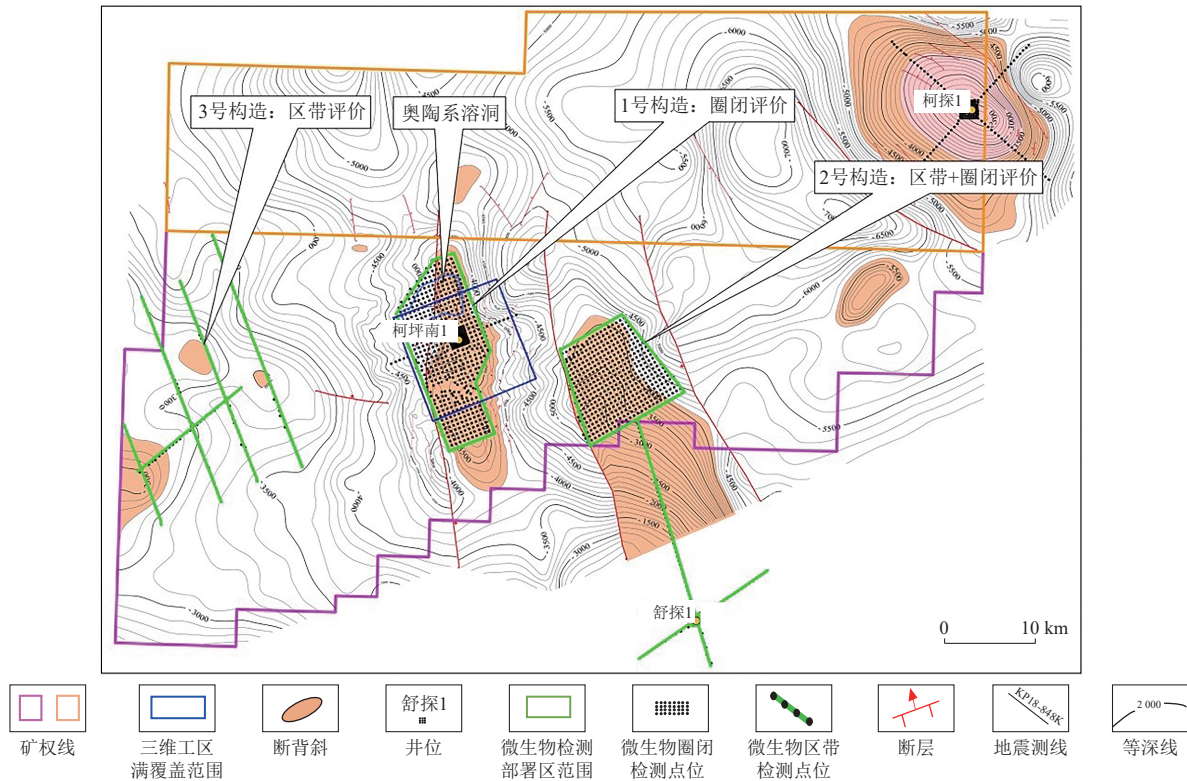


图3 塔里木盆地柯坪南地区微生物圈闭部署方案

Fig. 3 Survey point deployment for microbial oil detection in the southern Keping area, Tarim Basin

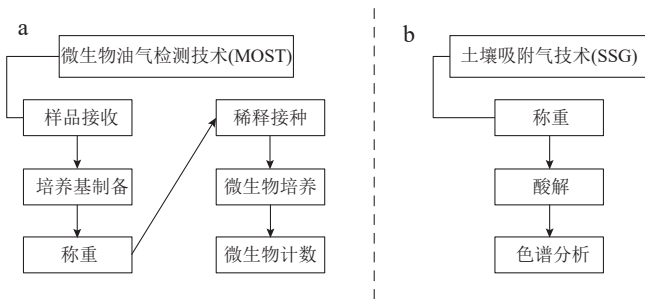


图4 微生物检测与酸解吸附烃分析流程

Fig. 4 Flow charts of the MOST and soil sorbed gas (SSG) analyses
a. MOST; b. SSG

通过培养计数和色谱法完成数据获取。

1) 微生物油气检测技术(MOST)

微生物的检测计数方法基于微生物检测计数技术领域通用的方法,检测中采用特殊的培养基对土壤样品中的烃氧化菌进行专一性的培养和计数。具体实验方法:①将待测样品经适当稀释之后,其中的微生物充分分散成单个细胞;②取一定量的稀释样液接种到平板上;③经过培养,由每个单细胞生长繁殖而形成肉眼可见的菌落,即一个单菌落应代表原样品中的一个单细胞(图5)。对培养之后的平板进行菌落计数,得到微生物值(MV)。

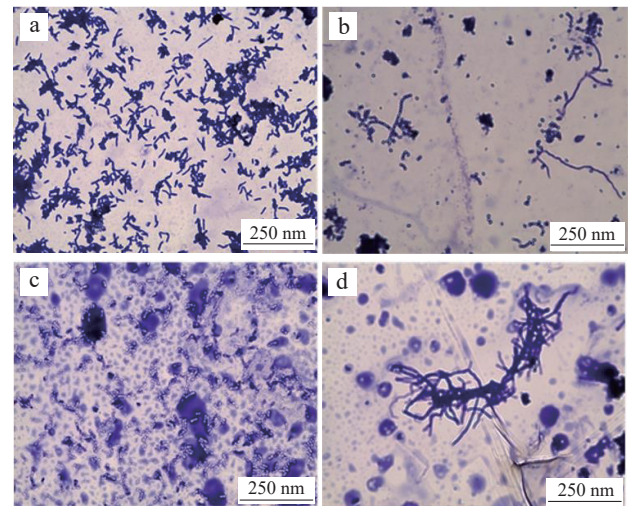


图5 微生物检测实验中烃氧化菌显微照片(光片)

Fig. 5 Micrographs of HOB

a. 不动杆菌; b. 红球菌; c. 假单胞菌; d. 丝状菌

2) 土壤吸附气技术(SSG)

本研究采用的土壤酸解吸附烃技术是经 Phillips 石油公司改进的 Horvitz 吸附气技术,检测方法采用的是色谱法,适用于油气化探中甲烷(C_1)—丁烷(C_4)轻烃的测定^[10-11]。SSG 分析所选样品根据 MOST 的分析结果来确定,这是因为 MOST 可以提供关于土壤中油气微渗漏的综合信息,包括烃类气体的浓度和

组成等。通过 MOST 分析,可以更准确地识别出具有油气勘探潜力的区域,从而为 SSG 分析选择合适的样品提供依据。

由于酸解烃的绝对值受土壤湿度、土壤岩性类型、土壤吸附能力及微生物的影响较大,所以,在关注 SSG 数据中总烃与各个烃组分的绝对浓度值(单位: 10^{-6})的同时,更强调关注各个烃组分之间绝对浓度值的比值及其在经验模式图上投落的区域,进而对潜在的油气藏的类型进行定性判识^[12-13]。

2.3.2 实验分析成果

1) 微生物成果

在微生物油气检测中,微生物异常值与背景值的划分是评价研究区内油气有利区带的关键环节。首先,应排除环境影响因素,确保微生物数据真实可靠,如对采样人、地貌、土壤颜色、高程、采样时间和含水率等外部因素进行统计分析,排除人为因素或环境影响^[14]。其次,应对影响微生物数值的土壤物理-化学性质进行分析,主要包括盐度及 pH 值^[15]。经检测,研究区土壤盐度范围为 0~2, pH 值为 6.4~9.6,均满足微生物检测技术要求(盐度 ≤ 2 , pH 值 4.0~10.0),所得数据均有效。

接下来采用多种方法划分出微生物异常门槛值。一般来说,门槛值的划分需要分析以下内容:①基于数据本身特征,利用数理统计、分形以及频率分布等数学方法,划分出异常值与背景值可能的界限值;②分析邻区已知相似正演模型上方 MV 的数值特征;③参考微生物地球化学勘探全球数据库相关信息^[16]。本次研究中数理统计计算界限值为 77~145,数学分形方法计算界限值为 141,频率分布直方图显示界限值为 129~139;邻区正演模型显示界限值为 24(舒探 1 井)~149(柯探 1 井)。综合上述方法,最终将研究区 MV 异常门槛值定为 137。

为了突显不同等级的微渗漏异常点、异常带和异常区,在以原始 MV 值成图时采用了 6 个等级来刻画。选取在 279~450 范围内的微生物值为超高异常值,用红色表示,代表极有利区;选取在 219~278 范围内的微生物值为高异常值,用橙色表示,代表有利区;选取在 137~218 范围内的微生物值为中异常值,用黄色表示,代表一般有利区;选取在 93~136 范围内的微生物值为过渡区异常值,用灰色表示,代表具有一定的勘探风险;选取在 51~92 范围内的微生物值为低异常值,用绿色表示,代表非有利区;而在 0~50 范围内的微生物值属背景值,用蓝色表示(表 1)。在评价由烃类微渗漏异常指示的勘探远景时,不仅要看图上红色点和

表 1 塔里木盆地柯坪南地区微生物值异常区分级

Table 1 Grading of abnormal MVs in the study area of the southern Keping area, Tarim Basin

MOST 调查区		研究区
实际采集样品总数/个		1 687
全部数据(最大值/最小值)		450/0
全部数据(平均值/标准偏差)		109/102
背景数据(平均值/标准偏差)		43/34
微生物 分级值	红色区(超高异常)	279~450
	橙色区(高异常)	219~278
	黄色区(中异常)	137~218
	灰色区(过渡区)	93~136
	绿色区(低异常)	51~92
背景值	蓝色区(无异常)	0~50

橙色点的绝对数量,更要看有没有多个红色点和橙色点集中分布在一起形成簇群,且簇群周围是否有指示中、低值异常的黄色点和灰色点对其形成支撑,从而识别最稳定异常区的存在。

微生物异常等级划定之后,得到该区微生物值平面分布图。整体上,工区 3 个目标区带和两个正演井目标的微生物异常背景区分显著。微生物异常在 1 号、2 号目标及柯探 1 井区较为明显,呈块状分布;而在 3 号目标微生物异常区零散分布;在舒探 1 井区则以背景值为主。通过对微生物成果分析,在 1 号和 2 号目标微生物网格区共识别出 5 个稳定的微生物异常区,形态呈现块状,连续性好,具有较好的勘探潜力(图 6a)。

2) 酸解吸附烃成果

本次研究 SSG 样品部署原则为沿主要目标构造断层附近的高值微生物异常点以及过已知正演井柯探 1 井和舒探 1 井井口位置进行 SSG 分析,分析样品共 195 个。SSG 检测结果分布如图 7 所示。其中,图 7c、d 为正演模型参考井舒探 1 井与柯探 1 井的 C_1 浓度分布对比,两口正演井中,舒探 1 井井口位置 SSG 结果较高,柯探 1 井整体较低。1 号目标 SSG 分析结果呈现南高、北低的趋势,2 号目标圈闭内 SSG 结果整体显示极高值,3 号目标呈零星高值。

将 SSG 数据投到 $[C_1/(C_2+C_3)-C_2/(C_3+C_4)]$ 交汇图版(图 8)上^[17],可以清晰地看到以下特征:柯探 1 井的数据点显示为油-气并存,与试油结果相符;1-I 号异常区为油及油-气并存的特征;1-II 号异常区为油-气并存及气的特征;1-III 号异常区为干气特征;2-I 号异常区为干气特征;2-II 号异常区为油-气并存特征。其中,纵坐标(指数坐标) $C_1/(C_2+C_3)$ 从某种意义上讲代表了生烃有机质演化程度(或成熟度),随着成熟度增

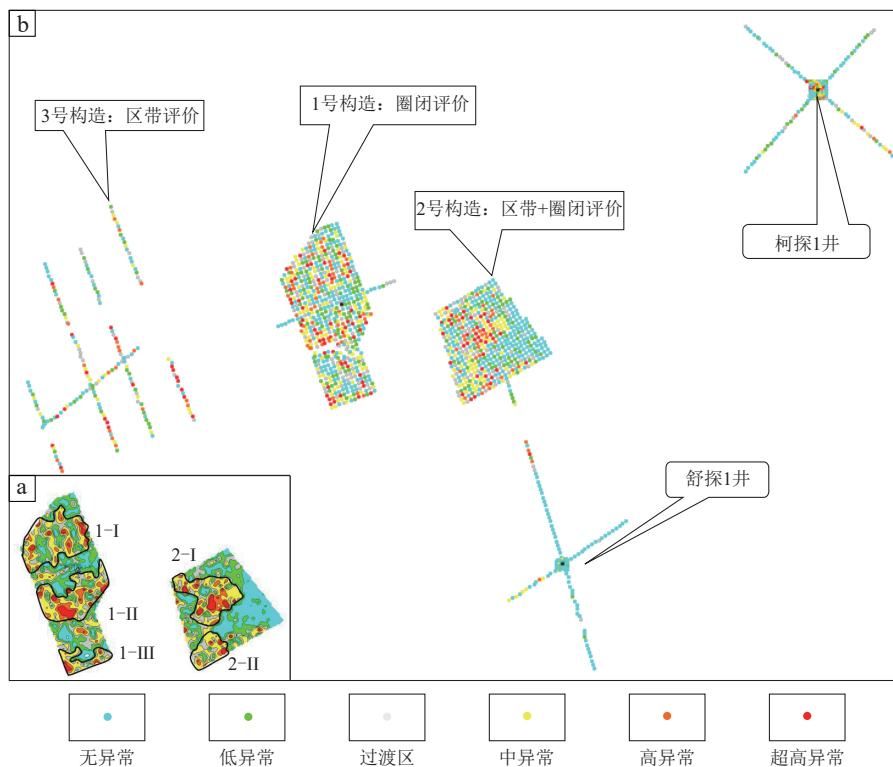
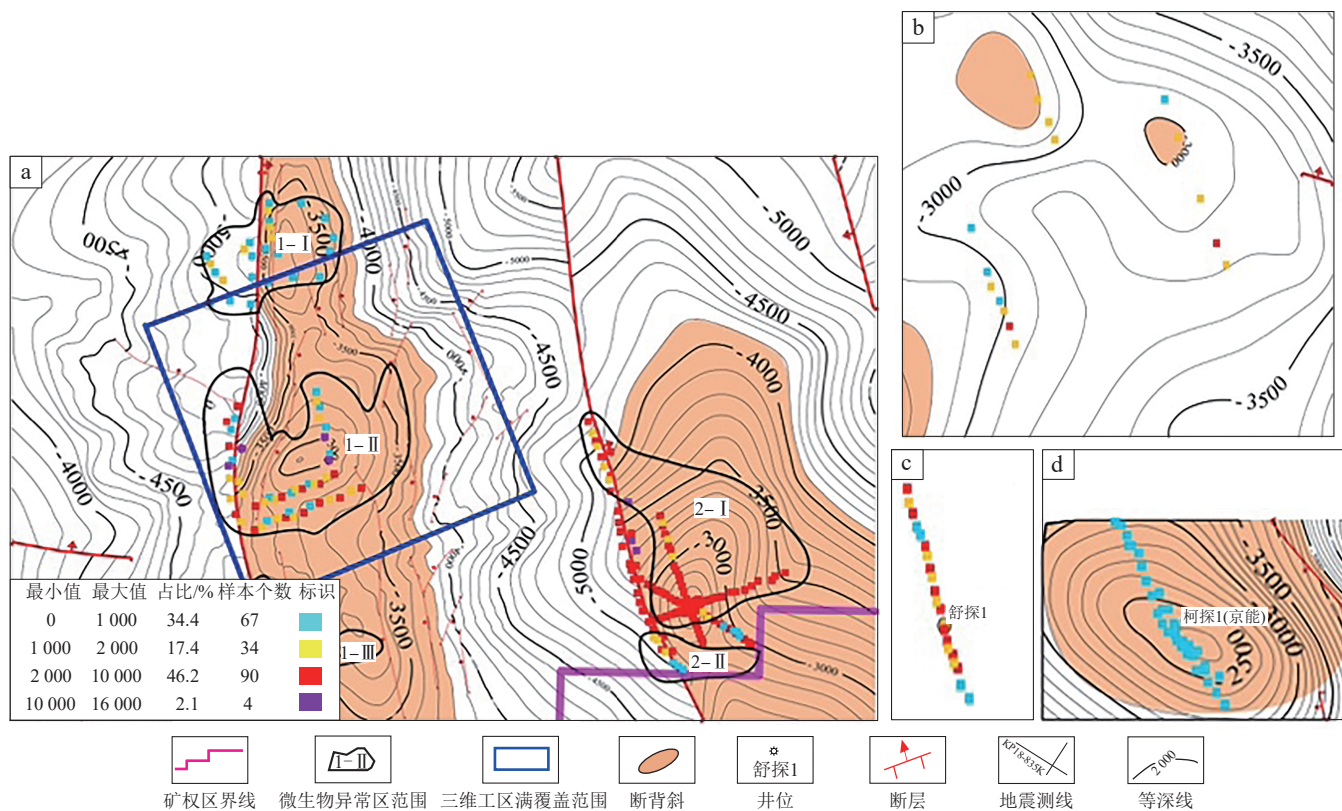


图6 塔里木盆地柯坪南地区微生物异常区平面分布与分区

Fig. 6 Map showing the distribution and zoning of microbial anomalies of the southern Keping area, Tarim Basin

a. 1号和2号构造异常区分; b. 微生物异常区平面分布

图7 塔里木盆地柯坪南地区SSG技术检测C₁含量分析结果平面分布Fig. 7 Maps showing the distribution of SSG-derived C₁ concentrations of the southern Keping area, Tarim Basin

a. 1号和2号构造; b. 3号构造; c. 舒探1井; d. 柯探1井

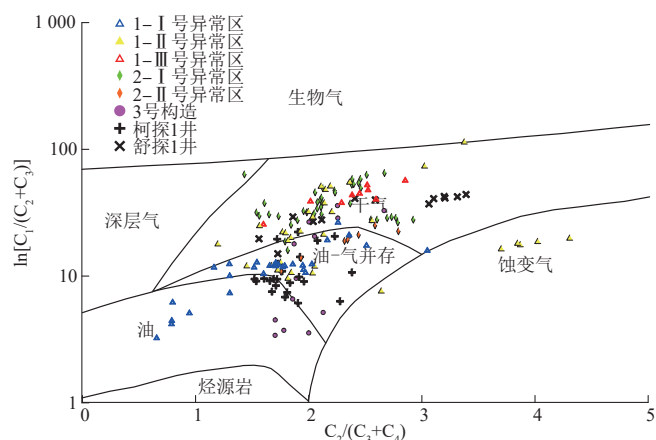


图8 塔里木盆地柯坪南地区微生物异常区SSG技术分析三组分图版(修改自参考文献[17])

Fig. 8 SSG-derived $C_1/(C_2+C_3)$ vs. $C_2/(C_3+C_4)$ cross plot of the microbial anomaly zones of the southern Keping area, Tarim Basin (modified after reference [17])

$C_1/(C_2+C_3)$. 甲烷/(乙烷+丙烷); $C_2/(C_3+C_4)$. 乙烷/(丙烷+丁烷)

大,该值呈指数增加,所指示的下伏地层油气性质从源岩、原油及凝析油气等逐渐过渡到干气。横坐标反映了酸解吸附轻烃中重组分之间的相互关系,从代表油、凝析油气及干气在图版中所处区域的横坐标数值变化来看,指标 $C_2/(C_3+C_4)$ 在一定程度上也可反映生烃母质的演化程度^[18]。

3 综合评价

油气保存条件研究是柯坪南地区油气勘探的难点问题。油气保存条件评价技术利用微生物和地球化学数据可以识别正在进行和历史上进行过的烃类渗漏的特点,通过研究不同的微生物和地球化学数值搭配规律来识别渗漏的时期与强度,从而对油气藏的保存条件和保存有效性进行评价。微生物指标(MV)代表了现今活跃的渗漏信息,地球化学指标土壤吸附气(sorbed soil gas,简称SSG)分析技术结果代表了历史时期的渗漏信息。通过微生物指标MV和

地球化学指标SSG组合分析,可以有效识别轻烃组分的微渗漏和宏渗漏强度,也能识别现今或地质历史时期内的烃类变化^[19-21](表2)。

柯探1井虽SSG值较低,但微生物值(MV)显著偏高,表明当前微渗漏活跃且保存条件良好,证实了微生物油气检测技术对动态渗漏的敏感性,属于模式1;而舒探1井区SSG高值(C_1 浓度平均值 $>2\,000 \times 10^{-6}$)指示历史宏渗漏,结合区域构造演化分析,该区喜马拉雅期逆冲推覆活动导致盖层破裂,油气沿断裂逸散,现今微生物低值($MV=24$)进一步证实了保存条件的破坏,属于模式3。因此,需综合MV与SSG指标,避免单一参数误判。本次研究中,通过微生物指标与地球化学指标综合分析,确定了1-I号异常区表现为高MV-低 C_1 浓度特征,表明该区油气保存条件好,以微渗漏为主(表3)。

众多勘探实践表明,碳酸盐岩储层非均质性较强,油气富集区域往往受到多种因素的控制,包括沉积环境、成岩作用以及构造背景等^[22],而非单一的构造因素,油气可能在储层物性较好的区域富集,而这些区域可能并不位于构造高点^[23-30],因此,在综合评价时需要进行统筹考虑,既不能完全无构造背景,也不能唯构造论。通过对5个异常区的微生物及SSG成果进行统计,结合地震信息进行综合分析,将异常分为3类(表4)。其中,1-I号异常区微生物高值分布,保存条件最好,且具有一定的构造背景,评价为一类异常区;2-I号和1-II号异常区微生物高值发育,保存条件较好,且与构造均有不同程度的匹配性,评价为二类异常区;1-III号和2-II号异常区及3号构造暂不落实,评价为三类异常区。

值得一提的是,在开展微生物地球化学研究的同时,区块内正开展柯坪南1井的钻探。研究成果显示柯坪南1井微生物值($MV=98$)低于柯探1井($MV=149$),但高于舒探1井($MV=24$),属过渡区,表明其保存条件介于两者之间,具有一定的勘探风险,见图6。最终柯坪南1井实钻结果也证明了这一观点。柯坪南

表2 塔里木盆地柯坪南地区油气保存条件研究指标组合模式

Table 2 Index combinations used for research on hydrocarbon preservation conditions of the southern Keping area, Tarim Basin

模式	MV	SSG指标(C_1 浓度 平均值 $1\,000 \times 10^{-6}$)	地质解释
1	高	低	高MV(高异常/超高异常)指示现今微渗漏强度高,低SSG($<1\,000$)指示宏渗漏强度低,油气富集保存条件好
2	高	高	高MV指示现今微渗漏强度高,高SSG指示宏渗漏强度高,油气相对富集且正在逸散,保存条件受影响
3	低	高	低MV指示微渗漏强度低,高SSG指示油气藏保存条件受到破坏,油气藏逸散殆尽
4	低	低	MV与SSG双低,指示渗漏强度低,地质历史时期内缺少烃类发育富集,为勘探开发风险区

注: MV代表微生物值。

表3 塔里木盆地柯坪南地区油气保存条件研究分析结果

Table 3 Analytical results of hydrocarbon preservation conditions of the southern Keping area, Tarim Basin

异常区	MV	SSG 指标	分析结果
1-Ⅱ号异常区	高	高	模式2
1-Ⅰ号异常区	高	低	模式1
1-Ⅲ号异常区	高	高	模式2
2-Ⅰ号异常区	高	高	模式2
3号构造	高	高	模式2
柯探1井	高	低	模式1
舒探1井	低	高	模式3

注: MV代表微生物值。

表4 塔里木盆地柯坪南地区微生物异常区评价结果

Table 4 Assessment of microbial anomalies of the southern Keping area, Tarim Basin

异常区	MV平均值	保存条件	构造落实程度	评价结果
1-Ⅰ号异常区	174	好(模式1)	较落实, 部分对应	一类
1-Ⅱ号异常区	159	较好(模式2)	较落实, 部分对应	二类
1-Ⅲ号异常区	179	较好(模式2)	暂不落实	三类
2-Ⅰ号异常区	188	较好(模式2)	较落实, 对应好	二类
2-Ⅱ号异常区	171	较好(模式2)	暂不落实	三类
3号异常区	—	较好(模式2)	暂不落实	三类

注: MV代表微生物值; “—”表示因区带评价样本数据较少, 不作定量评价。

1井整体气测值偏弱, 在寒武系盐下肖尔布拉克组钻遇35 m厚的灰质白云岩, 全烃浓度最大值为2.08%, 但整体电阻率较高, 储层段在1 000~2 000 $\Omega \cdot m$, 孔隙不发育, 孔隙度约为2%, 岩性较为致密, 测试结果仅见少量气, 未达到工业油气流标准。实钻结果与微生物预测较为吻合, 验证了微生物油气检测成果的可靠性。

本次研究认为, 微生物地球化学技术在复杂山前带地区的应用取得了较好的效果。微生物油气检测技术通过烃氧化菌丰度直接反映现今渗漏活动, 对动态保存条件敏感, 适用于快速圈定有利区; 而地球化学(SSG)技术通过历史吸附烃反映长期渗漏累积。两者互补, 形成“动态充注-历史保存”双指标模型, 在无可靠直接烃类指示(DHI)数据的情况下, 仍可实现勘探有利区的精准划分。在柯坪南地区, 利用地震资料建立构造格架, 以微生物技术为主导优选勘探目标, 辅以SSG验证保存条件演化, 这一地震-微生物-地球化学协同的新模式可为复杂山前带的碳酸盐岩油气勘探提供新思路。但必须指出的是该技术仍然存在一定的局限性, 即无法提供垂向上的层位信息。柯坪断隆已经证实的含油气层系有志留系、奥陶系及盐下的寒武系和震旦系, 微生物地球化学技术反应的是垂向上各含

油层系综合的油气异常响应, 在实际勘探过程中仍需结合多方面信息综合考虑。

4 结论

1) 通过对微生物油气检测成果分析, 在塔里木盆地柯坪南地区1号和2号目标构造微生物网格区共识别出5个稳定的微生物异常区, 形态呈现块状, 连续性好, 具有较好的勘探潜力。

2) 两口正演井中, 舒探1井井口位置SSG分析结果较高, 柯探1井整体较低。1号目标SSG结果呈现南高、北低的趋势, 2号目标SSG结果整体显示极高值, 3号目标呈零星高值。另外, 定性判别1-Ⅰ号异常区为油及油-气并存的特征, 1-Ⅱ号异常区为油-气并存及气的特征, 1-Ⅲ号异常区为干气特征, 2-Ⅰ号异常区为干气特征, 2-Ⅱ号异常区为油-气并存特征。

3) 结合微生物指标与地球化学指标综合分析将研究区划分为3类有利区。其中, 1-Ⅰ号异常区微生物高值分布, 保存条件最好, 且具有一定的构造背景, 评价为一类异常区; 2-Ⅰ号和1-Ⅱ号异常区微生物高值发育, 保存条件较好, 且与构造均有不同程度的匹配性, 评价为二类异常区; 1-Ⅲ号和2-Ⅱ号异常区及3号构造暂不落实, 评价为三类异常区。同时, 也解释了舒探1井的失利原因, 即舒探1井区在历史时期曾经成藏, 后由于保存条件变差而导致油气藏逸散殆尽。

4) 研究成果得到了钻井的验证, 表明微生物地球化学技术在复杂山前带地区具有一定的适用性; 其虽不能提供垂向上的层位信息, 但可为立体勘探发现新层系、新目标提供重要线索, 凭借其经济、高效、快捷的特点可作为常规勘探手段的有力补充。利用地震资料建立构造格架, 以微生物技术为主导勘探目标优选, 辅以SSG验证保存条件演化, 这一地震-微生物-地球化学协同的新模式可为复杂山前带的碳酸盐岩油气勘探提供新思路。

参 考 文 献

- [1] 许科伟, 郑旭莹, 顾磊, 等. 油气微生物分子勘探技术与初步应用[J]. 石油实验地质, 2022, 44(5): 896-903.
XU Kewei, ZHENG Xuying, GU Lei, et al. Molecular microbial prospecting for oil and gas and its preliminary application [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2022, 44(5): 896-903.
- [2] 张春林, 庞雄奇, 梅海, 等. 微生物油气勘探技术的实践与发展[J]. 新疆石油地质, 2010, 31(3): 320-322.
ZHANG Chunlin, PANG Xiongqi, MEI Hai, et al. Application and progress of microbial oil survey technique (MOST) [J].

- Xinjiang Petroleum Geology, 2010, 31(3): 320–322.
- [3] 丁力, 郝纯, 吴宇兵, 等. 微生物油气检测技术在准噶尔盆地油气勘探中应用[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 136–146.
DING Li, HAO Chun, WU Yubing, et al. Progress and application of microbial oil and gas detection technology in oil and gas exploration, Junggar Basin[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 136–146.
- [4] 丁力, 吴宇兵, 刘芬芬. 中拐凸起火山岩油气藏微生物地球化学勘探研究[J]. 特种油气藏, 2018, 25(4): 24–28.
DING Li, WU Yubing, LIU Fenfen. Microbiological and geochemical exploration for hydrocarbon reservoirs in volcanic rocks of Zhongguai uplift [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2018, 25(4): 24–28.
- [5] 姜鹏, 刘亚雷, 周新桂, 等. 塔里木盆地柯坪断隆早古生代断裂构造特征: 以柯坪南地区为例[J]. 现代地质, 2024, 38(5): 1248–1257.
JIANG Kunpeng, LIU Yalei, ZHOU Xingui, et al. Fault structural characteristics of the Early Paleozoic in the Keping fault-uplift, Tarim Basin: A case study in the southern Keping area[J]. Geoscience, 2024, 38(5): 1248–1257.
- [6] 王清华, 徐振平, 张荣虎, 等. 塔里木盆地油气勘探新领域、新类型及资源潜力[J]. 石油学报, 2024, 45(1): 15–32.
WANG Qinghua, XU Zhenping, ZHANG Ronghu, et al. New fields, new types of hydrocarbon explorations and their resource potentials in Tarim Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 2024, 45(1): 15–32.
- [7] 曹军, 周进松, 银晓, 等. 微生物地球化学勘探技术在黄土原地貌区油气勘探中的应用[J]. 特种油气藏, 2020, 27(5): 53–60.
CAO Jun, ZHOU Jinsong, YIN Xiao, et al. Application of microbial geochemical exploration technology in oil and gas exploration in loess tableland regions [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2020, 27(5): 53–60.
- [8] 张春宇, 管树巍, 吴林, 等. 塔西北地区下寒武统碳酸盐岩地球化学特征及其古环境意义: 以舒探1井为例[J]. 地质科技通报, 2021, 40(5): 99–111.
ZHANG Chunyu, GUAN Shuwei, WU Lin, et al. Geochemical characteristics and its paleo-environmental significance of the Lower Cambrian carbonate in the northwestern Tarim Basin: A case study of Well Shutun-1[J]. Geological Science and Technology Information, 2021, 40(5): 99–111.
- [9] 康小虎, 刘鑫, 刘姗姗, 等. 不同时空尺度下土壤微生物群落分布及驱动因素研究进展[J]. 土壤, 2024, 56(4): 689–696.
KANG Xiaohu, LIU Xin, LIU Shanshan, et al. Distribution patterns and drivers of soil microbial communities at different spatiotemporal scales: A review [J]. Soils, 2024, 56(4): 689–696.
- [10] 肖细炼, 陈卫明, 李庆霞, 等. 气相色谱法测定高碳酸盐土壤样品中酸解烃[J]. 理化检验(化学分册), 2014, 50(12): 1517–1520.
XIAO Xilian, CHEN Weiming, LI Qingxia, et al. GC determination of acidolysis hydrocarbons in high carbonate soil samples [J]. Physical Testing and Chemical Analysis (Part B: Chemical Analysis), 2014, 50(12): 1517–1520.
- [11] 陈卫明, 肖细炼, 李庆霞, 等. 气相色谱法测定油气化探样品中酸解烃的研究[J]. 岩矿测试, 2015, 34(6): 698–703.
CHEN Weiming, XIAO Xilian, LI Qingxia, et al. Determination of acidolysis hydrocarbons in oil/gas geochemical exploration samples by gas chromatography [J]. Rock and Mineral Analysis, 2015, 34(6): 698–703.
- [12] 李武, 朱怀平. 钻井中油气地球化学勘探技术及其应用[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32(1): 159–166.
LI Wu, ZHU Huaiping. Borehole oil and gas geochemical exploration technique and its application [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2012, 32(1): 159–166.
- [13] 罗敏, 李军业, 刘晓辉, 等. 松辽盆地西部斜坡区四方台组砂岩中烃类流体特征与铀成矿关系[J]. 地质与资源, 2021, 30(2): 118–125.
LUO Min, LI Junye, LIU Xiaohui, et al. Sandstone of Sifangtai Formation in the western slope of Songliao Basin: Relation between hydrocarbon fluid characteristics and uranium mineralization [J]. Geology and Resources, 2021, 30(2): 118–125.
- [14] 孙宏亮, 袁志华, 朱卫平, 等. 新庄油田油气微生物勘探研究[J]. 天然气勘探与开发, 2014, 37(2): 24–28.
SUN Hongliang, YUAN Zhihua, ZHU Weiping, et al. Microbial prospecting of oil and gas in Xin Zhuang Oilfield [J]. Natural Gas Exploration and Development, 2014, 37(2): 24–28.
- [15] 卫雨西, 陈丽娟, 冯起, 等. 干旱区盐碱土微生物特征及其影响因素研究进展[J]. 中国沙漠, 2024, 44(3): 18–30.
WEI Yuxi, CHEN Lijuan, FENG Qi, et al. Progress on microbial characteristics in arid salt-affected soils and related factors [J]. Journal of Desert Research, 2024, 44(3): 18–30.
- [16] 颜承志, 施和生, 庞雄, 等. 微生物地球化学勘探技术在白云凹陷深水油气勘探中的应用[J]. 中国海上油气, 2014, 26(4): 15–19.
YAN Chengzhi, SHI Hesheng, PANG Xiong, et al. Applying a technique of microbiological geochemistry to hydrocarbon exploration in Baiyun sag deep water area [J]. China Offshore Oil and Gas, 2014, 26(4): 15–19.
- [17] VON DER DICK H, WYMAN R E, BOSMAN D A. 复杂土壤气烃的分解: 油气勘探的概念和应用(摘要)[Z]. AAPG Hedberg 研究会议. 油气运移的近地表表现, 不列颠哥伦比亚省温哥华, 会议记录, 1994.
VON DER DICK H, WYMAN R E, BOSMAN D A. Unmixing of complex soil gas hydrocarbons: concepts and application for hydrocarbon exploration (abstr) [Z]. AAPG Hedberg Research Conference, Near-Surface Expression of Hydrocarbon Migration, Vancouver, B. C., Proceedings, 1994.
- [18] 高岗, 刘诗局, 靳军, 等. 原油物性演化规律新发现及其对页岩油勘探的启示[J]. 地质学报, 2023, 97(5): 1561–1575.
GAO Gang, LIU Shiju, JIN Jun, et al. A new discovery of physical property evolution of crude oil and insights into shale oil exploration [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(5): 1561–1575.

- [19] 褚厚娟, 郝纯, 邓诗财, 等. 木里地区水合物轻烃微渗漏微生物群落及烃氧化菌响应特征研究[J]. 物探与化探, 2017, 41(6): 1037-1043.
- CHU Houjuan, HAO Chun, DENG Shicai, et al. A study of gas hydrate light hydrocarbon microseepage microbial communities and response characteristics of hydrocarbon oxidizing microorganism in Muli area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41(6): 1037-1043.
- [20] 段中会, 马丽, 郝纯, 等. 基于微生物烃检测技术的陕北煤层火烧区绿色探测[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(3): 175-181.
- DUAN Zhonghui, MA Li, HAO Chun, et al. Green detection method of coal burning area in northern Shaanxi based on microbial hydrocarbon detection technology[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(3): 175-181.
- [21] 张春林, 庞雄奇, 梅海, 等. 烃类微渗漏与宏渗漏的识别及镇巴长岭-龙王沟地区勘探实践[J]. 天然气地球科学, 2009, 20(5): 794-800.
- ZHANG Chunlin, PANG Xiongqi, MEI Hai, et al. Identification of microseepage from macroseepage and exploration practice in Changling-Longwanggou area of Zhenba block[J]. Natural Gas Geoscience, 2009, 20(5): 794-800.
- [22] 胡忠贵, 孙跃东, 秦鹏. 碳酸盐岩储层非均质性研究现状及发展趋势[C]//2015全国沉积学大会论文集, 武汉, 2015. 北京: 中国地质学会, 2015: 191-192.
- HU Zhonggui, SUN Yuedong, QIN Peng. Current research status and development trend of heterogeneity of carbonate reservoirs [C]//Proceedings of the 2015 National Congress on Sedimentology, Wuhan, 2015. Beijing: Geological Society of China, 2015: 191-192.
- [23] 蒋有录, 卢浩, 刘华, 等. 渤海湾盆地饶阳凹陷新近系油气富集特点与主控因素[J]. 石油学报, 2011, 32(5): 791-796.
- JIANG Youlu, LU Hao, LIU Hua, et al. Enrichment characteristics and major controlling factors of hydrocarbons in the Neogene of Raoyang Depression, Bohai Bay Basin [J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(5): 791-796.
- [24] 张三, 金强, 史今雄, 等. 塔北地区奥陶系地下河溶洞充填规律与储集性能[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1582-1594.
- ZHANG San, JIN Qiang, SHI Jinxiong, et al. Filling patterns and reservoir property of the Ordovician buried-river karst caves in the Tabei area, Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1582-1594.
- [25] 李双建, 李智, 张磊, 等. 四川盆地川西坳陷三叠系盐下超深层油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1555-1567.
- LI Shuangjian, LI Zhi, ZHANG Lei, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration targets of the Triassic subsalt ultra-deep sequences in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1555-1567.
- [26] 陈平, 李维, 周义军, 等. 鄂尔多斯盆地乌审旗古隆起与中央古隆起形成演化及其对油气的控制作用[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(6): 1653-1664.
- CHEN Ping, LI Wei, ZHOU Yijun, et al. Formation and evolution of the Wushenqi and Central paleo-uplifts, Ordos Basin and their control on hydrocarbon accumulation [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(6): 1653-1664.
- [27] 乔俊程, 常少英, 曾溅辉, 等. 塔里木盆地北部富满地区超深层走滑断裂带碳酸盐岩油气差异成藏成因探讨[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(5): 1226-1246.
- QIAO Juncheng, CHANG Shaoying, ZENG Jianhui, et al. Origin of differential hydrocarbon accumulation in ultra-deep carbonate reservoirs along strike-slip fault zones in the Fuman area, northern Tarim Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(5): 1226-1246.
- [28] 刘国勇, 薛建勤, 吴松涛, 等. 柴达木盆地柴西坳陷古近系-新近系石油地质特征与油气环带状分布模式[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(4): 1007-1017.
- LIU Guoyong, XUE Jianqin, WU Songtao, et al. Petroleum geology and ring-shaped distribution of the Paleogene-Neogene hydrocarbon resources in western Qaidam Depression, Qaidam Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(4): 1007-1017.
- [29] 王清华, 蔡振忠, 张银涛, 等. 塔里木盆地超深层走滑断控油气藏研究进展与趋势[J]. 新疆石油地质, 2024, 45(4): 379-386.
- WANG Qinghua, CAI Zhenzhong, ZHANG Yintao, et al. Research progress and trend of ultra-deep strike-slip fault-controlled hydrocarbon reservoirs in Tarim Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2024, 45(4): 379-386.
- [30] 孙国庆. 松辽盆地敖古拉断裂带构造演化及断控油气聚集机制[J]. 特种油气藏, 2024, 31(3): 45-51.
- SUN Guoqing. Structural evolution and fault-controlled hydrocarbon accumulation mechanism of Aogula Fault Zone in Songliao Basin [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2024, 31(3): 45-51.

(编辑 董奕含)