

万米深层油气地质学理论与极限勘探深度的挑战及资源潜力

朱光有¹, 杨海军², 谭清文¹

(1. 长江大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430100; 2. 中国石油 塔里木油田公司, 新疆 库尔勒 841000)

摘要: 深地塔科1井的成功钻探开启了石油工业万米深层油气勘探新纪元, 探索极限勘探深度和油气赋存边界成为地质学家们关注的重点。系统总结了万米深层油气勘探发现与地质学理论。计算了南华系、埃迪卡拉系和寒武系烃源岩的生烃量。论证了低地温场盆地液态石油保存深度下限可达9 000 m, 提升了超深层石油勘探潜力。揭示了250 Ma前形成的大型油藏超长寿命的保存机制, 推动超深层古老油气藏的勘探。提出碳酸盐岩储层不存在深度下限。发现复杂渗流形成的多油-水界面缝洞型油藏新类型, 揭示了次生地球化学作用对油气性质与相态的改造机制。发现超深层超高油气柱, 揭示了高产-高效井富集分布规律。这些研究成果为超深层重大发现及勘探战略调整提供了理论支撑, 开辟了万米深层油气勘探空间, 引领石油工业迈入万米深层油气勘探新时代。分析了万米深层油气地质理论面临的重大难题, 提出极限勘探深度的概念, 探索油气赋存边界, 加快攻克地球深部高温-高压带来的认知盲区挑战, 使极限深度范围内油气实现效益勘探开发, 超万米深层油气成为保障国家能源安全的重要一极。

关键词: 深地塔科1井; 油气赋存边界; 极限勘探深度; 万米深层; 南华系; 震旦系; 寒武系; 深层油气勘探

中图分类号: TE132.1

文献标识码: A

Theory of petroleum geology at 10 000-meter depth: Challenges of hydrocarbon exploration depth limits and resource potential

ZHU Guangyou¹, YANG Haijun², TAN Qingwen¹

(1. School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China; 2. Tarim Oilfield Company, PetroChina, Korla, Xinjiang 841000, China)

Abstract: The successful drilling of well Shendi Take-1 has opened a new era in the petroleum industry, marking the beginning of 10 000-meter deep hydrocarbon exploration. Consequently, investigating the hydrocarbon exploration depth to its limits and the boundaries for hydrocarbon occurrence has become a hot topic in the geological community. In this study, we present a systematic summary of the discoveries and geological theory of hydrocarbon exploration at a depth of 10 000 m. The hydrocarbon generation potential of the Nanhua, Ediacaran, and Cambrian source rocks is quantitatively assessed. It is demonstrated that the depth threshold for preserving liquid oil extends up to 9 000 m in basins with low geothermal gradients, thereby enhancing the potential for ultra-deep oil exploration. Mechanisms responsible for the preservation of large-scale oil reservoirs formed 250 million years ago are identified, supporting the exploration of ultra-deep ancient hydrocarbon reservoirs. Furthermore, it is proposed that carbonate reservoirs exhibit no definitive lower depth limit. Additionally, a new type of fractured-vuggy oil reservoirs, formed by complex seepage processes and characterized by multiple oil-water interfaces, is identified. This discovery reveals the mechanisms by which secondary geochemical processes modify the properties and phases of hydrocarbons. Ultra-high oil and gas columns are discovered in ultra-deep reservoirs, revealing the enrichment and distribution patterns of hydrocarbons in high-yield and high-efficiency wells. These findings provide theoretical support for achieving major hydrocarbon discoveries in ultra-deep reservoirs and for reshaping hydrocarbon exploration strategies. Furthermore, they also open

收稿日期: 2025-08-23; 修回日期: 2025-09-15。

第一作者简介: 朱光有(1973—), 男, 二级教授, 深层油气成藏与油气地球化学。E-mail: zhuguangyou@yangtzeu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金委重点项目(42230812)。

the new frontier of hydrocarbon exploration at a depth of 10 000 m, marking a new era for the petroleum industry. Additionally, we analyze major challenges in the geological theory of hydrocarbon exploration at such a depth, propose the concept of limit hydrocarbon exploration depth, and examine the boundaries for hydrocarbon occurrence. It is therefore essential to accelerate efforts to bridge the knowledge gap created by the high temperature and high pressure conditions in the Earth's interior, thereby enabling free hydrocarbon exploration within the limit depth range. Such progress will help position hydrocarbon resources in 10 000-m-deep plays as a vital component in safeguarding China's energy security.

Key words: well Shendi Take-1, hydrocarbon occurrence boundary, limit hydrocarbon exploration depth, 10 000-meter-deep play, Nanhua System, Sinian System, Cambrian System, deep oil and gas exploration

引用格式:朱光有,杨海军,谭清文. 万米深层油气地质学理论与极限勘探深度的挑战及资源潜力[J]. 石油与天然气地质, 2026, 47(2): 366–384. DOI: 10. 11743/ogg20260202.

ZHU Guangyou, YANG Haijun, TAN Qingwen. Theory of petroleum geology at 10 000-meter depth: Challenges of hydrocarbon exploration depth limits and resource potential[J]. Oil & Gas Geology, 2026, 47(2): 366–384. DOI: 10. 11743/ogg20260202.

塔里木盆地深地塔科1井(2025年2月完钻,井底深度10 910 m;8月完成了试油)万米深井的成功钻探是中国向地球深部进军的重大科技工程,不仅刷新了古生代碳酸盐岩层系深井钻探的世界纪录,更在高温-高压领域的科学探索、能源发现和工程创新等方面领域具有里程碑意义,开启了石油工业万米深层油气勘探新纪元。万米深井的顺利实施是中国深地探索的地质望远镜、放大器和听诊器,是继中国“深空”与“深海”探索之后,国家在“深地”领域的重大战略行动;他重新建立了人类对地球深部资源的认知框架,并推动了高端装备与工程配套技术的全面提升。中国一举从深地探索的“并跑者”转变为“领跑者”,将为全球超深层油气勘探开发贡献中国塔里木样板。

近年来,塔里木盆地超深层勘探成效十分显著,中国石油和中国石化两家石油公司相继在超深层碳酸盐岩领域取得一系列重大勘探发现,并在开发建产上也取得重大效益。中国石油塔里木油田公司在2006年探井平均井深达6 130 m,2020年轮探1井完钻井深达到8 882 m,为当时亚洲最深井。2024年完钻井深超8 000 m的井45口^[1]。2020年塔里木油田油气产量当量突破 $3\,000 \times 10^4$ t,超深层油气产量当量 $1\,407 \times 10^4$ t,占比47%;2024年塔里木油田油气产量当量 $3\,366 \times 10^4$ t,超深层油气产量当量 $2\,047 \times 10^4$ t,占比超60%、塔里木油田已建成中国最大超深油气生产基地^[1]。

中国石化西北油田发现顺北油田,已建成年产量 100×10^4 t的油气产能^[2]。顺北84X井完钻井深9 195.00 m,垂深8 937.77 m,钻至奥陶系鹰山组下段;对裸眼段深度8 334.52~9 195.00 m进行常规测试,油压37.36 MPa,获日产石油496.4 t、天然气 65.3×10^4 m³,折算油气当量共1 017.0 t/d^[3]。

塔里木盆地深层油气勘探取得巨大成就,特别是在

超深层碳酸盐岩领域,发现了一系列大型缝洞型油气藏,有力支撑超深层油气勘探与探索。其中,碳酸盐岩勘探经历了从轮南—塔河—塔中—哈拉哈塘—顺北—富满,从奥陶系潜山岩溶—台缘带—礁滩体岩溶—层间岩溶—断控岩溶—盐下白云岩,从构造高部位—平台区—斜坡区—超深层的发展历程,不断探索油气勘探的新类型与油气赋存边界^[4],推动了海相石油地质理论的快速发展。特别是2020年在阿满过渡带部署的满深1井,在奥陶系一间房组7 509.50~7 665.62 m深度段获日产油量624 t、日产气量 37×10^4 m³,开辟了超深层断控岩溶储层新领域,发现了富满十亿吨级大油田^[5],超深层油气赋存潜力可能超越常规认识^[6],最终推动了深层油气领域向万米深层勘探的步伐。塔里木盆地碳酸盐岩受走滑断裂控制,中奥陶统鹰山组+一间房组油气藏为碳酸盐岩缝洞型断裂体油藏^[7-9],部署在顺北8号带的顺北84X井测试后获得了重大油气突破,指示了断控缝洞型油气藏具备含千米油气柱高度的能力^[10]。平面上,油气分布受断裂规模影响,通常表现为“大断裂、大油藏”和“小断裂、小油藏”的分布特点,通源的深大断裂或与之相关的次级断裂呈条带状展布,控制油气富集^[11-15,3,16]。目前已发现的奥陶系油气藏的油气源为下寒武统玉尔吐斯组烃源岩^[17]。油气成藏具有“寒武系供烃、多期成藏、断裂控储、垂向运聚”的特点^[18-19]。

1 万米深层勘探发现

深地塔科1井是中国首口万米超深科探井,位于塔里木盆地塔北隆起带(图1),钻探深度达10 910 m。在万米深层高温-高压(井底温度220 ℃、压力>150 MPa)与强非均质特性的地质环境下,在埋深10 000 m以深的寒武系沙依里克组、吾松格尔组和肖尔布拉克组见

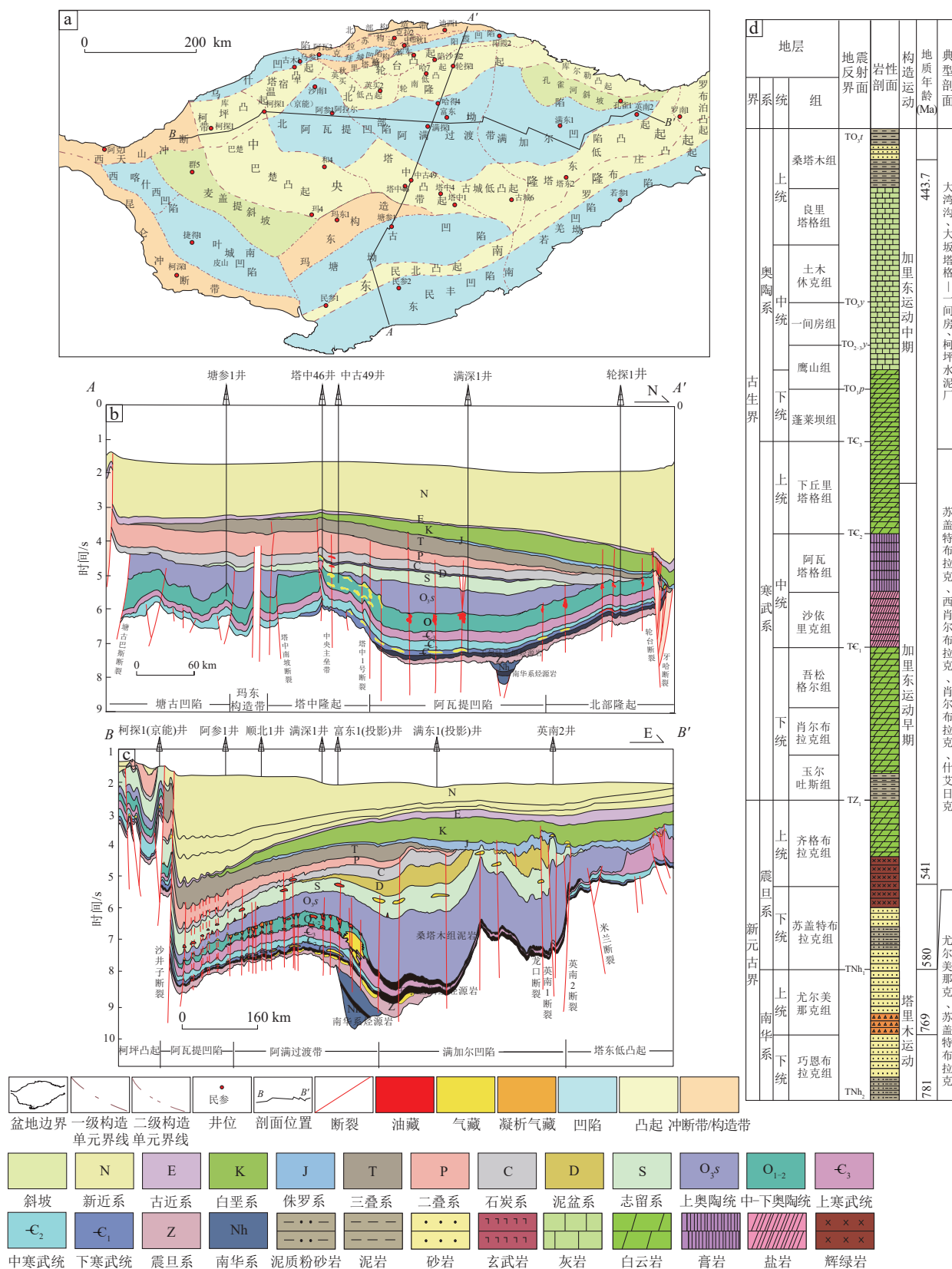


图1 塔里木盆地万米深井地塔科1井综合地质图(据文献[1,24]修改)

Fig. 1 Comprehensive geological map revealed by well Shendi Take-1 with a depth of 10 000 m in the Tarim Basin (modified after references [1,24])

a. 地质概况图; b. 南北向地层单元格架剖面; c. 东西向地层单元格架剖面; d. 地层综合柱状图
(剖面位置见图1a.)

到多层油气显示^[20],在超万米深层的肖尔布拉克组试采获得数万方天然气产量。万米深层天然气组分以干气为主,甲烷含量介于91.880%~99.750%,平均值为98.000%;乙烷含量在0.100%~0.140%,平均值为0.120%;丙烷含量范围为0.004%~0.009%,平均值为0.005%;丁烷含量甚微。非烃类二氧化碳、硫化氢和氮气含量较低,绝大部分样品测试获得含量都小于1%,说明天然气主要来自于高温裂解气。万米深层天然气组分甲烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_1$)介于-34.99‰~-32.43‰、平均值为-33.99‰,乙烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_2$)为-30‰,丙烷碳同位素值($\delta^{13}\text{C}_3$)约为-27‰^[20];其同位素组成与塔中等深层天然气对比,属于典型原油裂解气^[21],应来自于寒武系玉尔吐斯组烃源岩形成的原油裂解气^[22]。

深地塔科1井的钻探首次揭开了万米深层发育的颗粒白云岩和藻白云岩组成的优质储层^[23](图1),该储层累计厚度96 m,共四层,最大孔隙度大于4%。储集层发育于高能礁后滩相和台缘丘滩相中,储集空间包括基质溶孔、高角度裂缝、溶洞和溶缝。白云岩储层溶蚀孔洞顺层分布,纵向上多个旋回叠置,研究认为是准同生期海平面下降引起的暴露溶蚀作用形成的基质孔隙^[23],发现的优质白云岩储层是万米深井科学探索的重大标志成果之一。

深地塔科1井的钻探证实了塔里木盆地万米深层具备油气大规模成藏条件^[1]。对于碳酸盐岩领域,台盆区万米深层垂向上主要发育的上震旦统奇格布拉克组白云岩与下寒武统泥岩构成的储-盖组合、中-下寒武统碳酸盐岩与中寒武统蒸发盐岩形成的储-盖组合(图1),是目前比较确定的两套最有利的万米深层成藏组合。下寒武统玉尔吐斯组优质烃源岩作为主力烃源岩^[17],已经被超深井钻探证实。震旦系和南华系烃源岩初步有一些新的认识^[6],其展布与资源潜力将逐步得到论证落实,是塔里木盆地不断开拓超深层新领域的重要区域。王清华系统剖析了库车前陆、台盆区克拉通和塔西南山前3个含油气系统在万米深层的成藏有利条件与勘探方向,指出该层系具有 $10 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 储量规模的天然气勘探前景;围绕台盆区,重点针对满加尔、满西及阿瓦提3个主力生烃凹陷,提出轮南-富满台缘带、阿瓦提周缘寒武系-奥陶系、塔北震旦系及塔中下寒武统4个万米深层勘探领域,以及台缘带、震旦系风化壳和下寒武统缓坡滩三大重要勘探方向,有利面积约 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$,天然气资源量约 $6.6 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。因此万米深层的大规模勘探即将拉开序幕并将成为常态^[1]。

郝芳院士等针对深层油气成藏面临的难题,系统总

结了深层储层发育与保持机理、深层油气藏成藏过程厘定和深层油气相态转变与次生改造等方面所取得的重要进展^[25];并提出了未来深层研究重点关注的两个方面:①深化超深层高温-高压环境下的“烃-水-岩”相互作用机制及油气-伴生资源(氦气、氢气)协同成藏研究范式;②推进深层油气成藏过程的动态恢复,发展高精度测试和智能化模拟技术方法体系,实现深层油气四维时空定量预测。这些认识和钻探成果,必将推动石油地质学理论的快速发展;塔里木盆地超深层的钻探,也必将成为引领石油地质学发展的重要实践载体。

孙龙德院士等系统对陆上深层-超深层油气重新厘定和总结分析,并对未来作出了研判和预测^[26]。油气地质理论不断丰富发展,高精度地震勘探、高温-高压测井、安全优快钻完井和立体高效储层改造等工程装备创新发展,推动油气持续增储上产;在攻克“万米深度、纳米尺度、百年跨度”三个维度的科学问题和系列技术装备挑战上,建议强化国家战略引领、统筹规划,突出科技创新驱动、聚焦攻坚,发挥新型举国体制优势,开放协同攻关,抢占深层-超深层油气科技制高点,保持全球领跑位置,支撑未来深地产业高质量发展,预测到2035年,深层油气将成为增储上产的主战场。总之,深地塔科1井的成功钻探与试油,掀开了万米之下深层领域油气勘探新的篇章,将引领全球超深层油气勘探开发迈入新轨道。

2 万米深层油气地质学理论

万米深层油气地质学理论的形成源于勘探实践和基础研究。众所周知,随着中、浅层油气资源的枯竭,向超深层勘探已成为必然趋势,中国克拉通盆地在7 000~9 000 m深度一系列大型油气田的发现,以及超深井钻探的重大突破,成为驱动向万米领域探索的重大动力。2018年以来团队先后在塔里木盆地和四川盆地(华南)发现的南华系烃源岩^[27-28],奠定了盆地底层的资源潜力和近源勘探方向,又经过对储层保存下限分析,万米之下保存了规模优质储集层,基本解决了万米深层的资源问题和规模效益问题,催生了万米深层概念。随后,又针对塔里木盆地等开展了万米深层领域的评价工作^[29];发现白云岩储层孔-洞-缝保存深度下限远超可钻深度,储层存在规模连片分布,奠定了盆地深层的资源规模和勘探效益,并刻画出万米深层重大勘探领域^[30],引起了业界的广泛关注,最终催生了万米深井的开钻。目前深地塔科1井成功钻至10 910 m深度并完钻试油;四川盆地川科1井钻至

9 000 m深度,仍在继续钻进中;随后在准噶尔盆地沙湾凹陷部署的新安1井,截至目前已钻至10 700 m深度。因此,万米深层油气富集成藏理论与资源潜力成为关注的焦点。本文作者在长期超深层研究的基础上,结合近期同行研究进展和勘探发现,系统总结了超深层油气地质理论。

2.1 超深层、超古老烃源岩的发现与资源潜力

深层油气勘探潜力取决于深层烃源岩的规模和质量。前寒武纪—寒武纪是地球演化历史上的最重要转变时期之一,经历了从新元古代的大冰期事件^[31],到古生代暖球事件的过渡,期间气候、海洋环境、生物演化和构造等发生剧烈变化^[28,32-33]。在油气勘探逐渐转向超深层和古老地层的背景下,新元古界和古生界作为记录地质历史上生物演化与环境变化最剧烈的关键地层沉积,发育了多套重要的黑色页岩,比如发现的华南(重庆、贵州一带分布较广)南华系大塘坡组黑色页岩、塔里木盆地南华系特瑞艾肯组和埃迪卡拉系水泉组/苏盖特布拉克组下寒武统玉尔吐斯组/西大山组等黑色泥岩等。围绕这些黑色页岩开展了大量基础研究,为重建这一关键时期古海洋环境的演化过程和烃

源岩分布评价预测等打下了坚实基础。

2.1.1 南华系烃源岩

华南扬子地区南华系大塘坡组烃源岩厚度分布在8~70 m,总有机碳含量(TOC)较高,高达4.0%以上,平均值在1.5%以上(图2),发育腐泥型干酪根。黑色页岩段形成于硫化水体环境,这为有机质的富集提供了有利的保存条件。较高的氮同位素值($\delta^{14}\text{N} > 4\text{‰}$)揭示了大塘坡组沉积期气候转暖条件下表层水体中发育稳定氮库^[34],这为生物复苏和演化提供了充足的营养来源,是优质烃源岩形成的重要基础。

塔里木盆地周缘南华系间冰期优质烃源岩发现于盆地东部的雅尔当山剖面,特瑞艾肯组下部,TOC分布在0.5%~5.0%,平均值大于1.5%(图2)。烃源岩有机质成熟度折算指标镜质体反射率(R_o)在1.3%~1.6%。在新藏公路、尤尔美那克及恰克马克铁什等剖面,间冰期地层发育黑色岩系,但TOC普遍偏低,大部分小于0.5%^[6]。

2.1.2 震旦系烃源岩

埃迪卡拉纪(震旦纪)早期沉积一套在全球广泛分

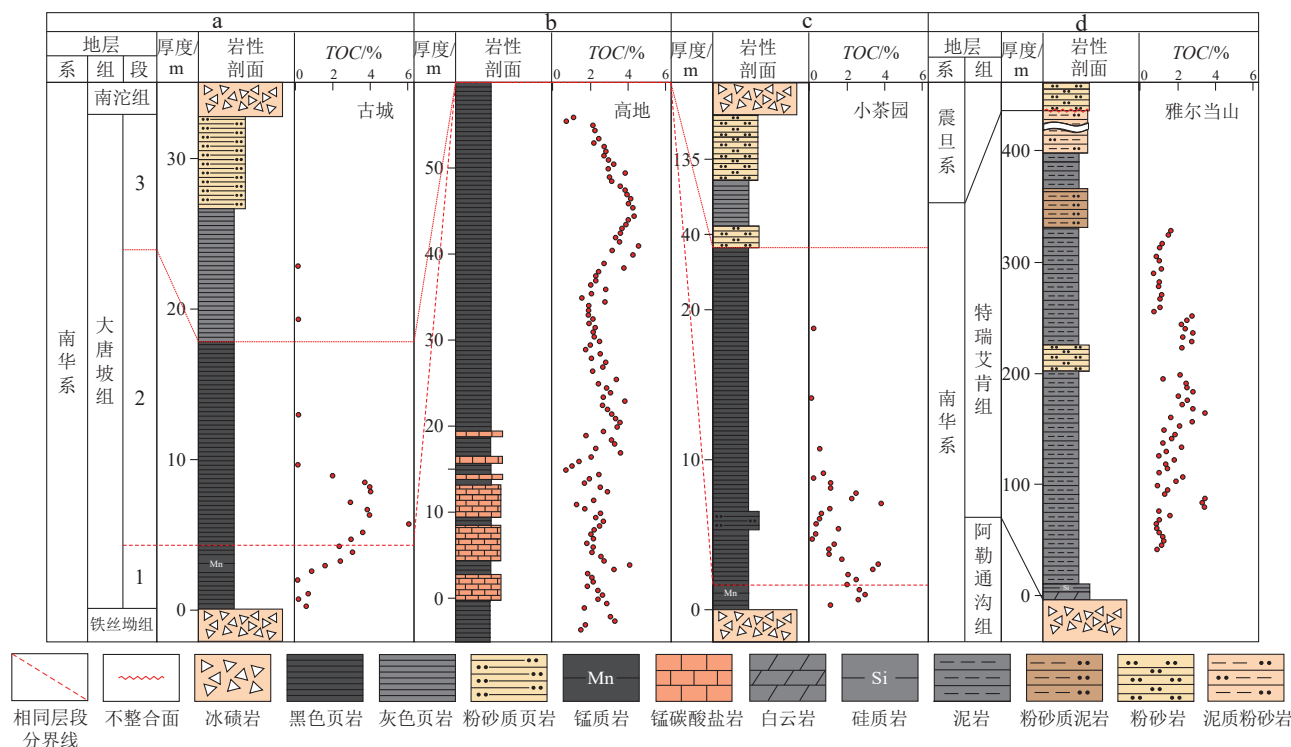


图2 塔里木盆地和扬子地区南华系间冰期烃源岩总有机碳含量(TOC)分布剖面

Fig. 2 Total organic carbon (TOC) content profiles of the source rocks formed during the Nanhua interglacial period in South China and the Tarim Basin

a. 古城地区南华系大塘坡组黑色页岩;b. 高地地区南华系大塘坡组黑色页岩;c. 小茶园地区南华系大塘坡组黑色页岩;d. 塔里木盆地南华系特瑞艾肯组黑色页岩

(a—c 分别据文献[27,35]修改;d 图据文献[36]修改。)

布的盖帽白云岩,厚2~4 m,这套盖帽碳酸盐岩作为从极端的冰室气候向温室气候转变的标志层,具有显著的碳同位素负异常。在盖帽碳酸盐岩之上,发育一套黑色页岩,在中国华南陡山沱组和塔里木盆地的库尔卡克组,均发育泥质烃源岩。其中,华南陡山沱组发育两套黑色泥页岩[陡(陡山沱组)二段和陡四段],*TOC*高(平均值为3.4%),沉积厚度大(10~120 m),分布面积超过 $160 \times 10^4 \text{ km}^2$,是一套优质烃源岩^[37]。在四川盆地发现的全球最古老的超大型气田——安岳-蓬莱气田,天然气主要来自于筇竹寺组和陡山沱组泥岩形成的古油藏高温裂解气^[38]。鄂阳页2井(湖北)在震旦系陡山沱组获得页岩气产量 $5.53 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 、无阻流量 $19.82 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流^[39],为中国页岩气勘查向深部进军提供了一套新的层系。

塔里木盆地震旦系野外露头也发现了黑色泥岩^[6]。其中,盆地北部阿克苏地区什艾日克剖面埃迪卡拉系苏盖特布拉克组上部、X1井苏盖特布拉克组、东北缘库鲁克塔格南区雅尔当山剖面育肯沟组和塔西南地区新藏公路剖面库尔卡克组等均发现了深灰色泥岩,厚度在40~60 m。位于新藏公路剖面附近的叶震1井发育厚约350 m的下埃迪卡拉统库尔卡克组烃源岩,岩性主要为深灰色-灰色泥质粉砂岩和泥岩。位于什艾日克剖面附近的柯震1井发育厚度约380 m的下埃迪卡拉统苏盖特布拉克组烃源岩,岩性主要为深灰色和浅灰色的泥质粉砂岩和泥岩,*TOC*主要在0.4%~1.2%。目前在野外和钻孔中均未发现像华南陡山沱组那样*TOC*高、稳定分布的厚层优质烃源岩,推测烃源岩在水体相对较深的陆棚相沉积中更为发育。

2.1.3 寒武系烃源岩

塔里木盆地发现的潜山型塔河油田、哈拉哈塘油田以及全球最深的古生界富满-顺北等断控型奥陶系碳酸盐岩超大型油田,原油均来自于寒武系玉尔吐斯组烃源岩^[17]。轮探1井在深度8 260 m储层中获得高产工业油流,并发现寒武系玉尔吐斯组*TOC*高达

20.0%以上的优质烃源岩层^[40]。四川盆地的麦地坪组 and 筇竹寺组富有机质泥页岩,也均已证实为重要的烃源岩层。塔里木盆地和四川盆地两口万米深井均钻遇寒武系优质烃源岩,证实了寒武系是两个克拉通盆地深层最重要最落实的优质烃源岩和主力烃源岩。

总之,发现南华系间冰期优质烃源岩,氮同位素值等揭示了间冰期气候转暖条件下生物复苏与有机质富集机制;论证了震旦系高度分层的氧化-还原条件对优质烃源岩形成的控制机理;Mo、Fe和Hg等金属同位素揭示了早寒武世海侵事件及海洋环境由缺氧环境主导、持续铁化并伴有间歇性硫化的水体环境对下寒武统优质烃源岩的控制机理^[41],建立了3套主要烃源岩的沉积模式^[6],并刻画了空间展布规律,为开辟万米深层勘探空间和预测万亿立方米大气田分布区打下了基础。

2.1.4 超深层烃源岩生烃潜力

针对上述6套烃源岩,均系统编制了烃源岩厚度、有机质丰度(*TOC*)和原始生烃潜力(HI_0 ,取决于干酪根类型)等基础图件。通过单井热演化史模拟,并用实测*R_o*值标定,获取典型气区主要烃源层及储层的埋藏史、热演化史和温度史曲线,用于确定烃源层生油、生气和储层原油裂解生气的高峰期。通过编制古构造图或古构造演化剖面图,确定生油、生气高峰期和油气充注期次。最后通过盆地模拟^[42],编制主要烃源层和古油藏的累计总生气强度平面图,落实了万米深层天然气资源潜力。

通过盆地模拟,计算出克拉通盆地南华系、震旦系和寒武系烃源岩在关键地质历史时期的生气强度和生气量(表1),华南和塔里木克拉通盆地总生气量分别为 $6\,551 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 和 $2\,332 \times 10^{12} \text{ m}^3$,资源潜力巨大,奠定了万米深层油气勘探的资源基础。

2.2 液态石油保存的极限深度

随着油藏埋深加大,储层温度增高,原油将发生裂解,形成天然气。因此,深层以天然气勘探为主。在地

表1 塔里木盆地和扬子地区重点层系烃源岩生烃强度及生烃潜力计算值^[42]

Table 1 Calculated hydrocarbon generation intensities and potential of source rocks in key strata^[42]

盆地	南华系				震旦系				寒武系			
	关键期生烃量(气: 10^{12} m^3)				关键期生烃量(气: 10^{12} m^3)				关键期生烃量(气: 10^{12} m^3 ; 油: 10^8 t)			
扬子地区	奥陶纪末	二叠纪末	燕山期末	合计	奥陶纪末	二叠纪末	燕山期末	合计	奥陶纪末	二叠纪末	燕山期末	合计
	148	192	262	602	602	894	1 308	2 804	682	1 006	1 457	3 145
塔里木盆地	加里东晚期	海西晚期	喜马拉雅晚期	合计	加里东晚期	海西晚期	喜马拉雅晚期	合计	加里东晚期	海西晚期	喜马拉雅晚期	合计
	287	334	413	1 034	72	98	175	345	81(气), 1 638(油)	224(气), 2 497(油)	648(气)	953(气), 4 135(油)

质条件下,原油在深度超过6 000 m时或油藏温度大于160 °C时开始裂解成气,随后液相石油逐渐消失^[43-46]。因此油气勘探存在“油气窗”和“死亡线”^[47-48]。但是原油的热稳定性也是一个比较复杂的问题,与盆地成藏演化史、热演化史以及油气性质等有着密切关系^[49]。塔里木盆地油气勘探深度已经超过8 000 m,储层温度超过160 °C,在这种深层极端高温条件下,仍持续有大油田发现^[50],突破了传统液态石油保存下限的认识。作者通过一系列模拟实验,提出塔里木盆地台盆区液态石油勘探深度下限可达9 000 m^[49],修订了国际著名地质学家Bjørøy等(1988)和Mango(1991)提出的石油勘探深度下限6 000 m的传统概念^[43,51]。

早在2012年笔者就研究发现了塔里木盆地原油稳定保存的独特现象^[52]。原油裂解是时间和温度的函数,二者具有互相补偿的特点,通过模拟实验揭示了低地温梯度和晚期快速深埋,时间和温度补偿效应不平衡,是造成原油稳定保存的动力学基础。

对塔里木盆地海相正常原油开展热模拟实验和原油裂解生气的动力学计算(图3),发现原油在180 °C恒

温埋藏条件下,达到51%的转化率需52.8 Ma;而在一般持续埋深条件下(2 °C/Ma),达到同样的裂解程度,需要的时间超过100 Ma。塔里木盆地自二叠纪至今的地温梯度约在20 °C/km(塔东南部和塔西南则高于此,导致油藏裂解另文论述这个问题),属于低地温场盆地,8 000 m的深度虽然对应165 °C油藏温度^[27],但原油成藏后的大部分生命周期内处于稳定埋深阶段的较低温度下,仅在晚期快速深埋阶段达到高温条件,持续时间较短,小于5 Ma,这种特殊的构造-热演化过程导致了早期古油藏成藏后经历不充分的时间-温度补偿效应,原油未发生大量裂解,仍保持单一油相。

现今台盆区埋藏深度在10 000 m的地区,若原油发生裂解成气转化率到达50%,至少需要2 Ma(图3)。这也从时间-温度补偿关系的角度说明塔里木盆地塔中和轮古东地区海相裂解气形成时间较晚且来自于万米深层。由此提出在9 000 m深度范围内液相石油是大量存在的,也决定了近期勘探过程中以发现黑油(正常油)和凝析油气为主。目前探明油气不足10%,大规模待探明油气资源均赋存在深层,并发表了《塔里木盆

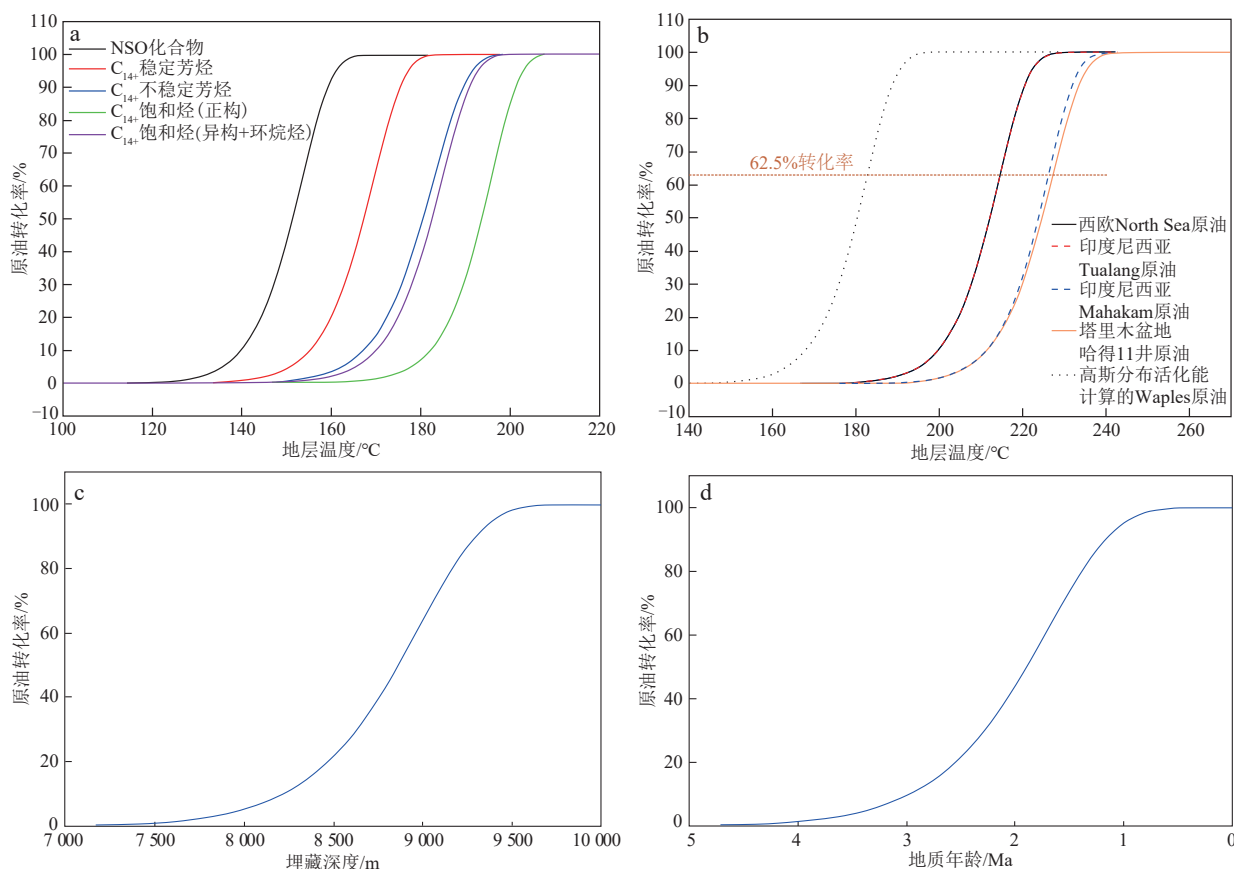


图3 塔里木盆地海相原油裂解模拟曲线^[52]

Fig. 3 Cracking curves of marine crude oil in the Tarim Basin derived using simulation experiments^[52]

a. 原油不同组分的裂解转化率与地层温度关系;b. 不同地区原油裂解的地质推演(2 °C/Ma) 转化率对比(哈得11井原油是塔里木盆地哈得逊油田的原油);c. 塔里木盆地海相原油裂解转化率随埋藏深度的变化;d. 现今埋藏深度为10 000 m的地区海相原油裂解转化率与时间的关系

地海相石油的真实勘探潜力》^[52],系统论述了塔里木盆地低地温梯度和晚期快速深埋过程的补偿效应不充分,液态石油大量裂解成气的深度下限在9 000 ~ 10 000 m深度以深,对应的碳酸盐岩储层温度大于210℃,在此深度以浅石油可以大量存在。由此将塔里木盆地液态石油勘探深度下限从6 000 m推至9 000 m,石油资源量至少增加 50×10^8 t;超过9 000 m深度时原油将逐渐开始裂解成为凝析油和天然气,因此,在台盆区9 000 m深度以浅的碳酸盐岩储层中,流体成分主体还是以黑油和凝析油为主(虽然塔中和轮古东勘探发现天然气,那些都是深层油藏裂解运移而来,并非原地裂解),在万米深层局部稳定区块,还保存有少量的凝析油(地下储层内为气相)。原油绝大部分裂解成气需要储层温度大于210℃。目前找到的海相裂解气主要是来自于9 000 m深度以深的深层气源。

塔里木盆地海相石油的主要成藏期在晚海西期,这已被大量研究工作所证实。晚海西期塔里木台盆区古隆起及其围斜区碳酸盐岩储层埋藏深度在800 ~ 4 000 m范围内(图4),分布面积超过 10×10^4 km²,岩溶储集体发育。虽然现今深度在7 000 ~ 9 000 m,而油气注入时则远浅于此深度。这些油藏在地质历史中没有经历过超过目前的埋深,原油也未发生裂解,这是

台盆区形成大面积层状油气聚集和保存的基础,也决定了现今在7 000 ~ 9 000 m深度范围内成为黑油和凝析油的重要勘探区。

2.3 万米深层碳酸盐岩储集空间保持机理与物性深度下限

对于超深层碳酸盐岩储层来说,传统观点认为碳酸盐岩原生孔隙的保存深度较浅,当沉积物埋藏深度超过3 000 m时,原生孔隙在成岩作用、地层温度和压力等多种因素的综合影响下将逐步消失殆尽^[53]。通过对塔里木盆地和四川盆地等超深层碳酸盐岩储层物性统计发现,随埋藏深度增加物性并无明显的线性变化趋势,在8 000 m深度以深仍保存有较好的孔渗性^[54],认为碳酸盐岩次生孔隙、裂缝和溶洞构成的复合储集空间和渗流通道可能不存在下限。塔里木盆地富满油田奥陶系储层沿断裂呈条带状分布^[55],储层受断裂及溶蚀作用影响,沿断裂方向呈“板状”缝洞发育,具有明显的穿层性,纵向高度300 ~ 1 500 m。

2.3.1 白云岩储层

超深层白云岩储层保存较好的原生溶蚀孔洞或发育次生孔-洞-缝,白云岩Mg同位素与沉积旋回周期

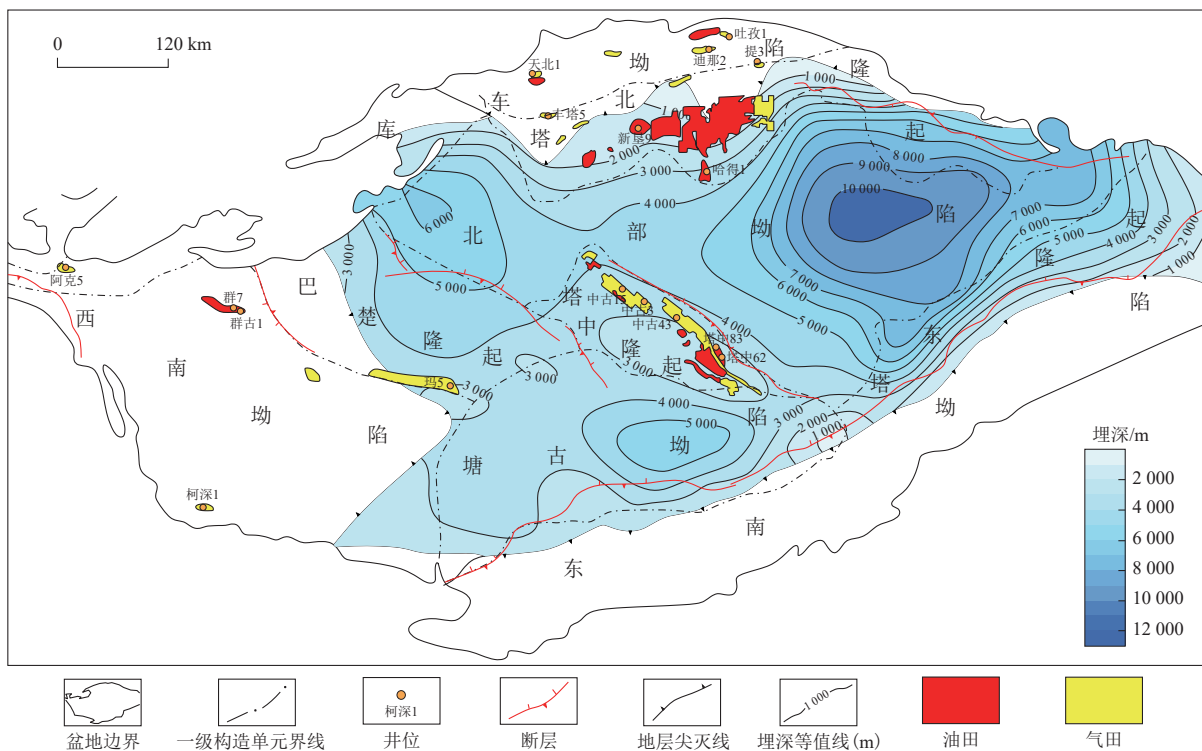


图4 塔里木盆地中奥陶统底晚海西期埋深等值线图与现今油气分布叠合图^[52]

Fig. 4 Contour map showing the Late Hercynian burial depth with superimposed distribution of the coeval oil and gas discoveries at the base of the Middle Ordovician strata in the Tarim Basin^[52]

性(米级层系界面)变化揭示厚层白云岩是由不同白云石化过程在时空尺度上叠加的结果,每个米级沉积旋回中白云岩Mg同位素的变化趋势,指示不同期次白云石化过程及白云石化流体运移方向和白云石化路径(图5),揭示了米级层序界面是白云石化作用的起点,也是储层最发育部位^[30],阐明了白云石化机理。利用激光原位U-Pb同位素定年技术测定了古老白云岩白云石化发生的时间和孔隙形成的时期,提出白云石化过程大规模发生在沉积后50 Ma以内的准同生期和浅埋藏阶段,孔隙形成于准同生期-早成岩期;提出准同生期的白云石化是成储效应关键期。因此,在高能相带、构造背景及成岩作用等多因素联合控制下,白云岩可形成多种类型的储集空间并且在超深层均能长期保持,塔里木盆地深地塔科1井万米深层白云岩优质储集层的发现,证实了这个推断。

2.3.2 溶洞与孔隙保存

超深储层中的溶洞之所以能够保存,主要是因为溶洞有自稳能力,其围岩中能形成压力拱,将作用在溶洞顶部的压力传导到溶洞周边,可以有效防止溶洞的进一步压实。在溶洞顶部岩体中形成压力拱,这种结构不产生弯矩和剪力,而且能将来自顶部的压力传递到拱脚周边岩体,提高了溶洞的抗垮塌能力,溶洞得以在深层-超深地层中保存。使用岩石力学模拟软件,模拟静岩压力作用下溶洞的变形特征,在10 000 m深度,模拟跨度10 m,高/跨比分别为1:1,3:1,5:1和7:1的溶洞,其顶部受上覆岩层压力240 MPa,模拟溶洞围岩变形特征。对比不同高/跨比的溶洞围岩破坏区,发现随着高/跨比的增大,围岩破坏区逐渐减少。在10 000 m深度条件下,不同高/跨比的溶洞在上覆岩层压力下均不会发生闭合,高/跨比大的溶洞比高/跨比小的溶洞更易保存,这与地震剖面上的串珠状特征有着较好的吻合性^[56]。进一步模拟1:1型溶洞围岩的变形特征,当溶洞顶部受到2 000 MPa的压应力,相当于75 000 m深度时,溶洞侧壁和底板发生了剪切破坏和张拉破坏,但是溶洞的大部分空间仍保存完好,未发生闭合,证实溶洞在超深层是可以保存的。因此,仅受静岩压力作用,即便是在75 000 m深度,溶洞空间仍保持完好。

使用ANSYS有限元数值模拟软件进行模拟,设计了直径为20 cm的溶蚀孔隙围岩模型,分别模拟在10 000,15 000,20 000,25 000,30 000,35 000,40 000,45 000和90 000 m深度条件下白云岩溶蚀孔隙围岩变形破坏特征^[56]。图6显示了10 000 m深度条件下,溶蚀孔隙网格模型、围岩破坏区和位移分布特征。位移

云图中(图6c),冷色调表示较小的位移,暖色调表示较大的位移,可见最大位移均发生在溶蚀孔隙顶部。模拟表明随着埋深的增大,溶蚀孔隙围岩中的未破坏区逐渐缩小,最大位移逐渐增加,最大位移分别为 2.13×10^{-4} , 5.52×10^{-4} , 9.01×10^{-4} , 1.25×10^{-3} , 1.60×10^{-3} , 1.95×10^{-3} , 2.31×10^{-3} , 2.66×10^{-3} 和 5.83×10^{-3} m,表明孔隙仍保留绝大部分空间,未发生闭合。因此,模拟实验证实,在构造挤压应力较弱的条件下,仅承受上覆地层压实作用,碳酸盐岩溶蚀孔隙可以保存完好,不存在储层深度下限。

2.4 缝洞型油气藏新类型与非均质储层油气渗流-赋存机理

超深层碳酸盐岩储层非均质性极强,油气渗流-运移方式与中、浅层浮力驱动模式差异明显,针对该深度已发现的、不遵循浮力分异定律且具有多油-水界面的缝洞型油气藏,建立了相应的非均质储层油气渗流-赋存模式^[58],提出横-纵向无统一边界的大面积准层状缝洞型断珠体油藏概念与油源断裂带富集理论,指导了斜坡区勘探。

准层状缝洞型油气藏处于常规与非常规油气的过渡地带,属于准连续油气藏的一种类型,油气分布受准层状储层、特别是缝洞系统的控制^[58]。由于碳酸盐岩储层沿潜山面或层间不整合面大规模集中分布,横向延伸连片,没有明晰边界,有效厚度通常超过150 m;储层之上的致密层为有效盖层。油气藏底部往往为致密灰岩,局部致密灰岩中可能发育走滑断裂或大型裂缝,且由于生产动态及压力变化由封闭到开启进而沟通深层水体,导致油气藏烃类底界起伏,无明确统一的油-水界面;总体上油气集中分布在不整合面之下150~200 m的区域,或者沿着断裂带呈板状分布,油气藏规模十分庞大。由于断裂与缝-洞系统等空间输导体系复杂,油气藏流体的性质也较为复杂,油-气-水的空间分布呈现出较高的复杂性。准层状缝洞型油气藏的主要特点如下:非均质性显著,大面积含油气,油气相态丰富,油气产能变化大;10%~20%的高产井占了总产量的70%以上;相对独立的油储单元呈复合叠置连片分布;低渗非均质储集层结构特征造成油-气-水分异不明显;油气在纵向上近似层状分布,具有统一的常温-常压系统。

针对深层高压非均质储层油-水分布预测难题,通过油气充注物理模拟,发现了一种复杂渗流形成的多油-水界面缝洞型油藏新类型。深层流体在不同缝洞体系中的流动形式差异显著,在基质体系内,主要以孤立洞穴型和微裂缝沟通的储集单元为主,渗流能力

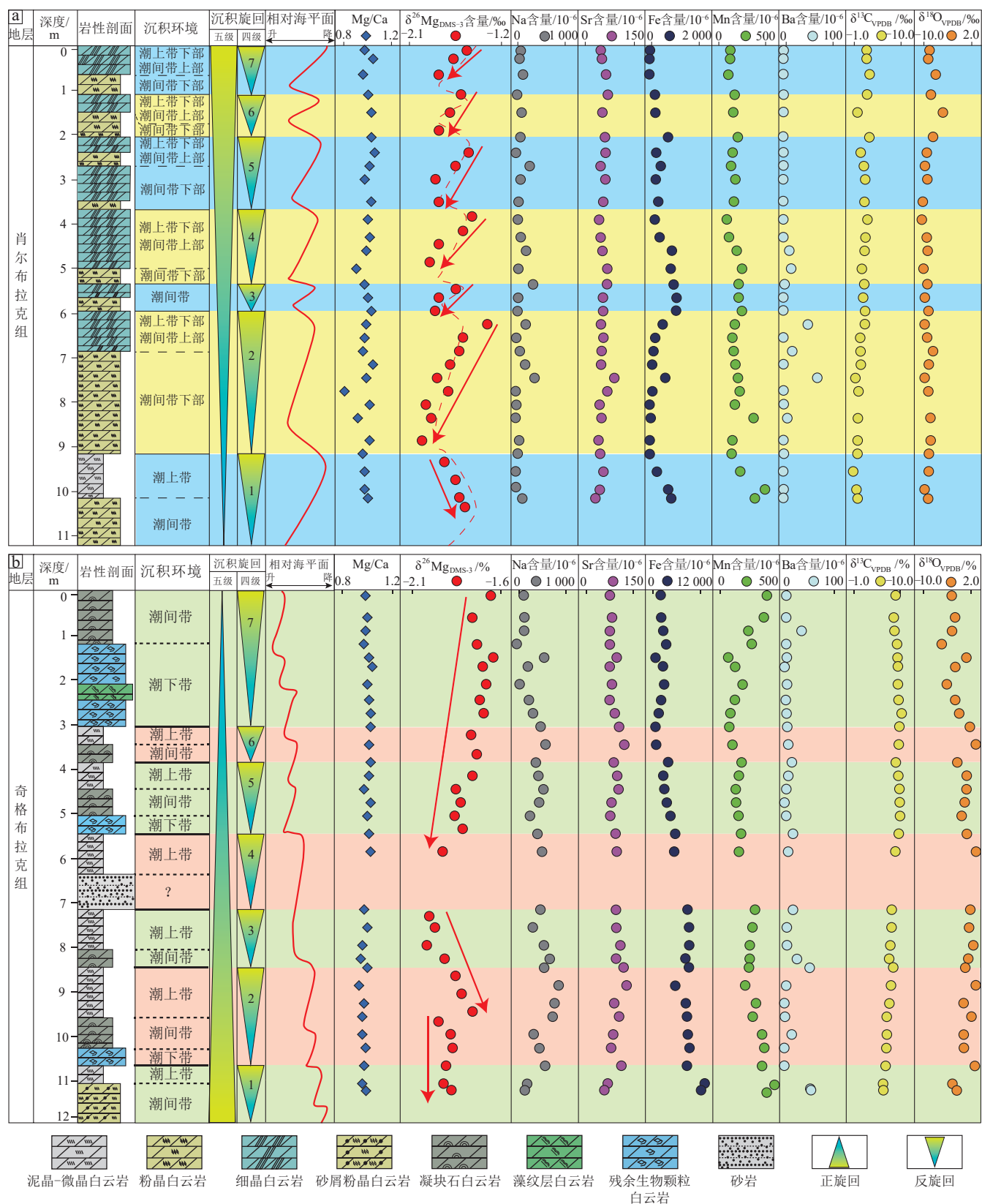


图5 塔里木盆地肖尔布拉克西沟剖面白云岩Mg同位素等地球化学参数垂向变化趋势与岩相和沉积旋回关系
(据文献[30]修改)

Fig. 5 Xigou section showing the relationships of vertical variation trends in the geochemical parameters (e. g. , Mg isotopes) of dolomites with the lithofacies and sedimentary cycles for the Xiaerbulake and Qigebulake formations , Tarim Basin (modified after reference [30])

a. 下寒武统肖尔布拉克组; b. 上震旦统奇格布拉克组

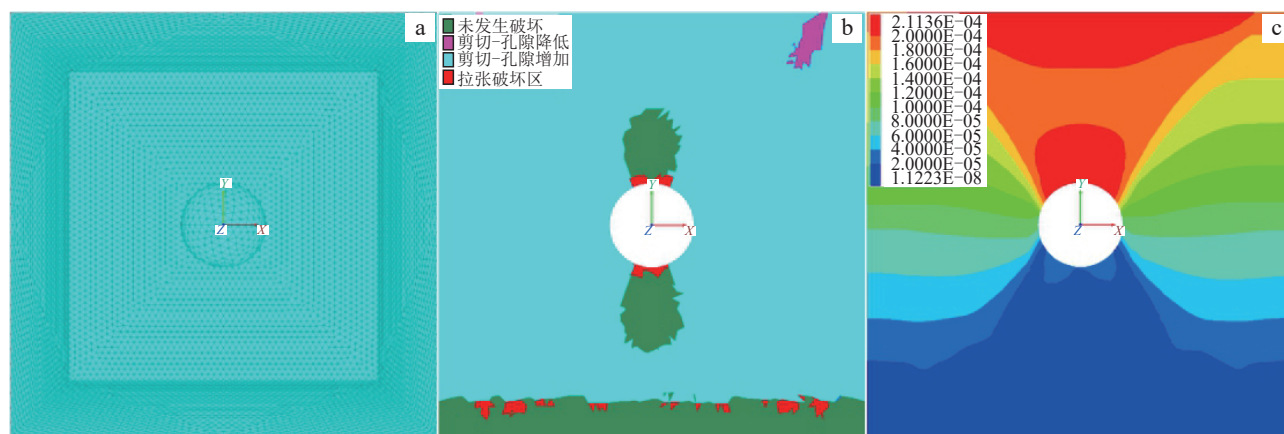


图6 万米深度碳酸盐岩储层溶蚀孔隙变形模拟(据文献[57]修改)

Fig. 6 Simulated deformation of dissolution pores in a 10 000-m-deep carbonate reservoir (modified after reference [57])

a. 溶蚀孔隙网格模型;b. 溶蚀孔隙围岩破坏区分布;c. 溶蚀孔隙围岩位移分布

较低,油气以非达西渗流形式流动;在有断裂系统和大型裂缝沟通的岩溶体系内,油气以达西流形式流动聚集;在连通性较好的大型孔洞、暗河管道内,油气以管流形式流动,聚集成藏。这些流动形式的差异,导致油-水分布受构造控制不明显的特征,由此提出横-纵向无统一边界的大面积层状缝洞型油藏断珠体概念(地震剖面上呈现串珠状反射)。这种油藏具有网状输导、立体成藏、大面积分布和断裂带富集等特点。准层状缝洞型油气藏模式的提出^[58],丰富了油气藏类型,特别是古老碳酸盐岩非均质储层导致油-气-水分异不明显,在油气藏的高部位有出水井,低部位也存在油气层,整个油气藏不存在统一的气-水界面,一井一藏,各井油-气-水界面差异较大。经典油气成藏理论认为,油气总是聚集在圈闭的高部位,油-水界面明显,而在超深层油气田实际勘探中,受储集层孔隙类型、喉道类型和孔喉连通性等非均质性的影响,油气在运移过程中所受的毛细管力差异较大,导致油-水界面不分异现象时有发生,且在深层碳酸盐岩缝洞型油气藏中表现得尤为突出,不存在统一的油-水界面。准层状缝洞型断珠体油气藏理论模式^[58],突破了传统背斜高点找油理论^[47],丰富和发展了石油地质学理论,开拓了斜坡区和深层勘探领域,指导了油气勘探领域向深层发展,使勘探领域向万米深层、向构造低部位和向斜区与坳陷区大幅度拓展,在7 000~10 000 m深度取得一系列油气勘探发现,打破了Buller等提出的油气勘探“黄金带”理论^[59-60],发现的油气储量和产量也迅速增长^[5,61]。

2.5 深层油气演化和相态转化机制

塔里木盆地超深层油气藏的相态类型丰富多样且空间分布复杂。表现为平面上正常油、稠油、挥发油、

凝析气和干气等多种油气相态共存,而且海相原油物性变化大^[62-64],这与次生地球化学作用对油气性质与相态的改造有关,包括热裂解、硫酸盐热化学还原作用(TSR)、生物降解和气侵分馏等^[65]。

其中,生物降解主要是细菌等厌氧生物对原油的降解和破坏作用,塔北北部这种作用多发生在古油藏埋藏较浅且温度较低的阶段,导致油藏被破坏并形成稠油。气侵主要发生在塔中和塔北隆起靠近满加尔坳陷的围斜区域,在这些区域,古油藏受到深层天然气的气侵,发生油气相态的转化^[28,34](图7)。古城地区由于地温较高且埋藏较深,古油藏在高温作用下发生裂解,形成干气气藏。TSR则主要见于塔中地区,原油烃类与地层中的硫酸盐在高温条件下发生TSR反应,生成高含硫化氢的天然气以及高硫原油和凝析油^[17,66]。通常在不同盆地或同一盆地的不同地区往往以发生某一种或两种次生改造作用为主,而在一个地区或一个油气藏中存在上述所有次生作用的情况则十分少见。然而,在塔里木盆地一张油气藏剖面中,既有生物降解的稠油油藏、也有气侵作用形成的次生凝析气藏,还有TSR形成的高含硫化氢气藏、因热裂解形成的干气气藏以及未遭受次生改造、保存完好的超深层古油藏^[67],指示了不同类型的次生改造作用可以共存于同一油气藏中。

金刚烷类化合物和原油裂解密切相关,随裂解程度增高而发生富集^[68-70]。4-甲基双金刚烷与3-甲基双金刚烷含量之和(4-MD+3-MD)是常用的反映原油裂解程度的参数^[68,71],也有效应用于含油气盆地原油裂解程度评价。在塔里木盆地超深层原油中发现一类与金刚烷结构十分相似的乙基降金刚烷化合物^[70],在经受严重热裂解的原油样品中测量到的浓度较高。其

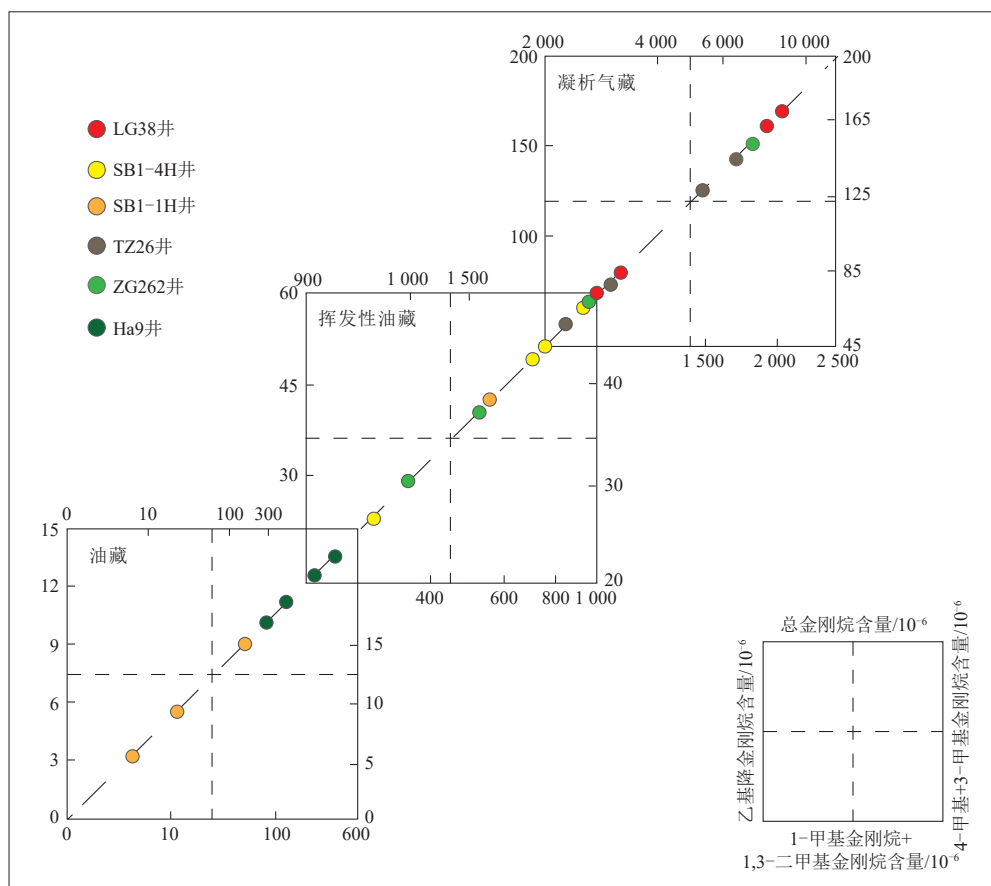


图8 塔里木盆地超深层原油相态判识图版(据文献[72]修改)

Fig. 8 Identification chart for crude oil phase behavior in ultra-deep formation (modified after reference [72])

碳酸盐岩溶缝-洞系统,呈大面积层状分布,储层基质孔隙度低,非均质性强,以低孔-低渗为主,储层厚度可达100 m以上。单井平均日产油量30~70 t、日产气量约500~30 000 m³,气/油比约为100~400 m³/m³。油气分布不受局部构造高低控制,受储层控制,具有整体含油、局部富集的特征^[67]。油藏的盖层为上奥陶统吐木休克组、良里塔格组和桑塔木组的致密泥灰岩和泥岩地层。油藏类型为受岩溶储层发育程度控制的超深层、超高温正常压力系统的大型准层状碳酸盐岩缝洞型油藏,局部发育异常高压,油层不受局部构造高点控制,没有统一的油-水界面。这些古老油气藏中的石油保存至今是因为:①油气藏所在地区构造稳定,处于一个克拉通内盆地,稳定沉降;②油气藏具备极好的封盖条件,区域性分布的致密盖层,阻碍油气扩散和泄露。250 Ma前形成并保存至今的大型油藏,揭示了超长寿命油藏保存机制和复杂油气藏演化过程^[76],修订了著名石油勘探家Miller和Macgregor等对油藏保存极限寿命的界定,并且对于评价塔里木盆地万米深层油气勘探潜力与指导油气勘探具有十分重要的意义。

2.7 超高幅度油气柱形成机制与高产-高效井富集分布规律

油气柱高度反映了地下油气聚集在纵向上的展布,油气柱越高,其所具有的勘探开发价值就越高^[77]。油气柱高度取决于盖层封闭能力以及圈闭的闭合高度两者之间的最小值。油气柱高度反映了地下油气聚集在纵向上的展布特征,决定了含油气构造内油气富集的程度。超高油气柱的存在与充足的烃源供给、巨厚的储集层、优质的封盖条件等成藏要素密不可分,反映出规模油气聚集的优越条件。

塔里木盆地钻探发现富满油田油柱高度大,普遍大于450 m,满深301H井油柱高度达627 m,满深2井实钻油柱高度为550 m,满深1井油柱高度达782 m,满深3井油柱高度可达904 m。顺北8号断裂带的顺北84X井含千米油气柱高度^[15]。单井投产后,单井平均日产油量54~196 t,整体表现为油柱高度越大,单井生产效果越好。基于断控油气藏垂向运聚成藏模式,油气源供给能力决定了油气充满度与油气柱高度;储层厚度和流体渗流条件决定了可容纳油气空

间的规模;盖层封堵能力直接影响可封存的油气柱高度且决定了超高油气柱的有效保存^[6]。满深区块储层纵向规模发育、断裂活动性强、油气充注强度大,是满深区块形成超高油柱的主要原因。克拉通盆地超高油气柱的发现,证实古老海相碳酸盐岩层系的勘探潜力。

2021年富满油田发现了台盆区单井产量最高的满深3井,折日产油量超过1 600 t,随着油藏认识的不断深化,发现千吨井9口,落实了富满油田 10×10^8 t资源规模,使富满油田近年来快速上产^[78]。分析富满油田已发现的9口千吨井生产动态特征,单井控制储量一般大于 200×10^4 t,稳产期3~4 a,见水前基本无递减,累产油量预计超过 20×10^4 t,地层能量充足,以弹性驱+水压驱动为主。统计表明,富满油田的千吨井集中分布于通源主干断裂带,该认识指导了勘探领域由早期的隆起高部位,逐渐扩展至斜坡区乃至坳陷区。

创新形成了超深碳酸盐岩断裂控藏地质富集理论,突破了传统圈闭理论认识的束缚,明确了断控缝洞储层发育机理,走滑断裂带多期活动引发的滑动破碎,叠加流体改造,形成了沿断裂破碎带分布的多尺度储集体,断层活动强度与地层能干性控制着储层的发育规模,丰富完善了碳酸盐岩储层发育和保存机理,拓展了勘探空间;实现了勘探领域向超深层、向构造低部位的大幅度拓展,丰富了海相勘探新类型^[4]。有效地指导了富满油田奥陶系碳酸盐岩 10×10^8 t级储量富油气区的勘探发现,指导了一批千吨井的钻成与建产,为高效建成 400×10^4 t原油年产量提供了有力的理论支撑^[78]。超深层油气勘探发现的超高油气柱幅度的油藏,油柱高度近千米;单井日产油量超过 1×10^3 t,突破了以往石油地质理论认识的极限,揭示了万米深层超高油气柱形成机理与富油气区分布规律。

3 万米深层油气地质理论面临的重大难题

万米深层油气勘探开发不仅是中国塔里木、四川、准噶尔、柴达木和鄂尔多斯等大型盆地的攻坚目标,也是世界上其他超级含油气盆地、大型含油气盆地、新生代快速沉降盆地、甚至所有含油气盆地的未来终极走向。塔里木盆地卓有成效的超深层油气勘探开发实例已证实了万米深层石油地质学理论形成的必要性和应用的可行性,前期理论认识也已在不同领域有效指导超深层油气勘探开发与资源评价等,取得了重大成效。当然,万米深层油气勘探也面临一些新的挑战,需要继续深化研究,最终实现极限深度下油气的高效勘探开发。

3.1 前震旦系烃源岩成烃母质相对单一,生烃能力被质疑,能否形成规模油藏或大气油田?

万米深层的突破,必然带动超古老烃源岩研究的重视,寒武系和震旦系烃源岩形成的大型油气田已被发现,南华系和前南华系发育的黑色页岩能否形成规模油气聚集?这已成为万米深层油气勘探时代地质学家们关注的问题。因此,明确前南华系烃源岩的特征、发育背景及其能否形成大规模油气藏对于万米深层油气勘探工作具有重要意义。

3.2 超深层浅变质岩层系油气资源潜力

全球多数地区发现了大量的变质岩油气藏,这些油气藏均为变质岩岩体受风化溶蚀或构造改造作用而形成的变质岩油气储层^[79],油气一般来源于近源烃源岩或没有变质的烃源岩。然而,烃源岩经浅变质作用改造后是否仍具有生烃潜力,目前仍不明确,还在探索之中。因此,盆地基底之上的浅变质岩层生烃的潜力还需要加强深化研究。

3.3 垂向超长运移距离

塔里木盆地勘探发现,深层奥陶系油气来源于下寒武统玉尔吐斯组烃源岩,沿走滑断裂发生垂向运移,距离介于1 500~4 000 m,这在全球极为罕见,超长垂向运移的动力与方式是石油地质学研究的薄弱环节。垂向运移是油气在浮力或超压驱动下沿输导体系向上迁移的过程。在超深层油气系统中,烃源岩与储层常被巨厚的地层分隔,且储层强烈的非均质性与多层次结构导致运移路径呈现多级跃迁模式,纵向上需经历超长距离垂向运移方能聚集成藏^[80]。含油气盆地深层-超深层油气垂向运移均表现出一个共性特征:断裂、裂缝及不整合面构成了油气垂向运移的核心通道。已经发现的垂向超长距离运移聚集形成的油气田均分布于中、浅层,而塔里木盆地发现的深度约8 000 m的海相大油田,是油气垂向数千米超长运移而来,这是否是个案?

4 极限勘探深度及资源潜力与未来挑战

4.1 极限勘探深度

塔里木盆地万米深井的钻探从多维度证实了超万米深层存在油气资源,颠覆了一些传统认识和理论,但是

万米深层不是终点,恰恰开启了新的发展空间,是引领地学革命的战略新支点,万米深层油气资源将成为下一步勘探的重点领域之一,由此本文提出含油气盆地极限勘探深度的概念,加快探索油气赋存的边界,拓展地球能源认知盲区,进一步明确极限深度范围内的油气资源潜力。

含油气盆地极限勘探深度是指油气赋存的边界空间的最大埋藏深度,是蕴含油气的极限深度,因此烃源岩埋藏的深度下限基本就是含油气盆地极限勘探深度,可能接近或超过20 000 m。这里的油气是指有机成因的油气,无机气可能没有极限勘探深度。因此,在中国塔里木、四川、准噶尔、柴达木和鄂尔多斯等大型盆地,烃源岩埋藏深度大,极限勘探深度范围内的油气资源可观,目前还没有手段来计算,需要系统研究超万米深层油气保存机制与油气成藏条件,并通过勘探实践来持续突破深度、温度、压力及介质条件的极限。

4.2 万米以深重大勘探领域与资源潜力

深地塔科1井的钻探证实塔里木盆地万米深层具备油气大规模成藏条件^[1],明确了3个含油气系统近源垂向叠置发育多套储-盖组合,库车坳陷的侏罗系-三叠系煤系成藏系统、台盆区寒武系盐下-震旦系白云岩海相古老油气系统、塔西南昆仑山山前石炭系-二叠系储-盖组合系统,是万米深层油气勘探的有利领域。本文对塔里木、四川、准噶尔、柴达木以及鄂尔多斯等大型和超级含油气盆地的成藏条件开展了基础综合分析,并对主要领域开展了初步评价,提出了11个潜在的万亿立方米大气区,为下一步万米深井钻探提供了依据。

4.3 未来挑战

未来挑战主要来自于地球深部高温-高压环境带来的认知盲区。可能包括:超万米极限深度范围内生烃理论;高温-高压环境下有机分子的裂解、聚合与保存理论;高温-高压环境下烃类运移聚集机制与赋存状态;高温-高压环境下岩石稳定性与储层储集新类型;常规-非常规资源富集属性与高效开发技术;以及无机成因气体和固体矿产资源预测等。另外,需通过自主和引进再创新、推动高端装备自主化等,实现技术突破和技术迭代,攻克世界级难题,取得极限深度范围内油气的效益勘探开发,使超万米深层油气成为保障国家能源安全的重要一极,使中国真正成为深地油气探索的“领跑者”和能源高效、绿色、智能勘探开发的“示范者”。

5 结论

1) 刻画了南华系、埃迪卡拉系和寒武系烃源岩的空间展布规律,计算出关键地质历史时期的生气强度和生烃量,奠定了超深层油气勘探的资源基础,为开辟万米深层勘探空间和预测万亿立方米大气田分布区打下了基础。

2) 论证了低地温场盆地中液态石油的保存深度下限可达9 000 m,突破了石油勘探深度下限6 000 m的传统认识,提升了超深层石油勘探潜力,并被近期超深井钻探证实。揭示了250 Ma前形成的大型油藏超长寿命的保存机制,修订了油气藏保存极限寿命的界定,推动了超深层油气勘探重大发现与战略突破。发现复杂渗流形成的多油-水界面缝洞型油藏新类型,提出横-纵向无统一边界的大面积层状缝洞型油藏断珠体概念,丰富了油气藏类型,突破了传统背斜高点找油理论。

3) 超深层碳酸盐岩储层非均质性极强,古老碳酸盐岩储层不存在深度下限。建立了原油裂解程度和油气相态的快速判识图版,揭示了次生地球化学作用对油气性质与相态的改造机制。发现了超深层油柱高度近千米的油藏,揭示了高产高效井富集分布规律,打破油气勘探黄金带理论,揭示了万米深层超高油气柱形成与富油气区分布机制。这些研究成果为超深层重大勘探发现及勘探战略调整提供了理论支撑,开辟了万米深层油气勘探空间。

4) 指出万米深层油气地质理论面临的重大难题,包括前震旦系烃源岩成烃母质相对单一,能否形成规模油藏或大油气田;超深层浅变质岩层系烃源岩生烃能力;垂向超长运移距离等问题。这些问题的提出以及随后的研究将为万米深层油气勘探提供理论新依据。

参 考 文 献

- [1] 王清华,朱永峰,唐雁刚,等.塔里木盆地万米超深层油气地质条件及勘探潜力[J].深地能源科技,2025,1(1):36-48.
WANG Qinghua, ZHU Yongfeng, TANG Yangang, et al. Oil and gas geological conditions and exploration potential in ultra-deep formations below ten thousand meters in Tarim Basin[J]. Deep Earth Energy Science & Technology, 2025, 1(1): 36-48.
- [2] 云露,邓尚.塔里木盆地深层走滑断裂差异变形与控储控藏特征——以顺北油气田为例[J].石油学报,2022,43(6):770-787.
YUN Lu, DENG Shang. Structural styles of deep strike slip faults in Tarim Basin and the characteristics of their control on reservoir formation and hydrocarbon accumulation: A case study of Shunbei

- oil and gas field [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43 (6): 770-787.
- [3] 云露, 曹自成, 李海英, 等. 塔里木盆地顺北地区中部低序级走滑断裂全方位一体化勘探实践[J/OL]. *石油与天然气地质*: 1-17 [2025-08-09]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4820.TE.20250709.1655.002>.
- YUN Lu, CAO Zicheng, LI Haiying, et al. Fully integrated exploration practices for low-order strike-slip faults in the central Shunbei area of the Tarim Basin [J/OL]. *Oil & Gas Geology*: 1-17 [2025-08-09]. <https://link.cnki.net/urlid/11.4820.TE.20250709.1655.002>.
- [4] 朱光有, 姜华, 黄士鹏, 等. 中国海相油气成藏理论新进展与万米深层超大型油气区预测[J]. *石油学报*, 2025, 46(4): 816-842.
- ZHU Guangyou, JIANG Hua, HUANG Shipeng, et al. New progress of marine hydrocarbon accumulation theory and prediction of super large oil and gas areas in deep strata buried at a depth of about 10000 meters in China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2025, 46(4): 816-842.
- [5] 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 source 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.
- [6] ZHU Guangyou, ZHANG Zhiyao, JIANG Hua, et al. Evolution of the Cryogenian cratonic basins in China, paleo-oceanic environment and hydrocarbon generation mechanism of ancient source rocks, and exploration potential in 10,000 m-deep strata [J]. *Earth-Science Reviews*, 2023, 244: 104506.
- [7] 王清华, 杨海军, 汪如军, 等. 塔里木盆地超深层走滑断裂断控大油气田的勘探发现与技术创新[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(4): 58-71.
- WANG Qinghua, YANG Haijun, WANG Rujun, et al. Discovery and exploration technology of fault-controlled large oil and gas fields of ultra-deep formation in strike slip fault zone in Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(4): 58-71.
- [8] 王清华, 杨海军, 张银涛, 等. 塔里木盆地富满油田富东1井奥陶系重大发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2023, 28(1): 47-58.
- WANG Qinghua, YANG Haijun, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance in the Ordovician in Well Fudong 1 in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2023, 28(1): 47-58.
- [9] 贾承造, 张水昌. 中国海相超深层油气形成[J]. *地质学报*, 2023, 97(9): 2775-2801.
- JIA Chengzao, ZHANG Shuichang. The formation of marine ultra-deep petroleum in China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97 (9): 2775-2801.
- [10] 曹自成, 云露, 漆立新, 等. 塔里木盆地顺北地区顺北84X井超千米含油气重大发现及其意义[J]. *石油与天然气地质*, 2024, 45(2): 341-356.
- CAO Zicheng, YUN Lu, QI Lixin, et al. A major discovery of hydrocarbon-bearing layers over 1,000-meter thick in well Shunbei 84X, Shunbei area, Tarim Basin and its implications [J]. *Oil & Gas Geology*, 2024, 45(2): 341-356.
- [11] 田军, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地富满油田成藏地质条件及勘探开发关键技术[J]. *石油学报*, 2021, 42(8): 971-985.
- TIAN Jun, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Geological conditions for hydrocarbon accumulation and key technologies for exploration and development in Fuman Oilfield, Tarim Basin [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(8): 971-985.
- [12] 杨海军, 张银涛, 关宝珠, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘奥陶系缝洞型碳酸盐岩油田的勘探发现与评价探明[J]. *海相油气地质*, 2023, 28(2): 113-122.
- YANG Haijun, ZHANG Yintao, GUAN Baozhu, et al. Exploration and development of the Ordovician carbonate oil field in Halahatang, Tarim Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2023, 28(2): 113-122.
- [13] 杨海军, 能源, 邵龙飞, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂带多层叠加样式及石油地质意义[J]. *新疆石油地质*, 2024, 45 (4): 387-400.
- YANG Haijun, NENG Yuan, SHAO Longfei, et al. Multilayer superimposition patterns of strike-slip fault zones and their petroleum geological significance in platform area, Tarim Basin [J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2024, 45(4): 387-400.
- [14] 杨海军, 蔡振忠, 李勇, 等. 塔里木盆地富满地区吐木休克组烃源岩有机地球化学特征及其油气勘探意义[J]. *地质科技通报*, 2024, 43(3): 81-93.
- YANG Haijun, CAI Zhenzhong, LI Yong, et al. Organic geochemical characters of source rock and significance for exploration of the Tumuxiuke Formation in Fuman area, Tarim Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(3): 81-93.
- [15] 曹自成, 云露, 平宏伟, 等. 塔里木盆地顺北地区奥陶系天然气地球化学与成因[J]. *地质科技通报*, 2025, 44(5): 40-52.
- CAO Zicheng, YUN Lu, PING Hongwei, et al. Geochemistry and origin of Ordovician natural gas in Shunbei area of Tarim Basin [J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2025, 44 (5): 40-52.
- [16] 云露, 曹自成, 耿锋, 等. 塔里木盆地塔北台盆区奥陶系油气分布有序性[J]. *石油与天然气地质*, 2025, 46(1): 15-30.
- YUN Lu, CAO Zicheng, GENG Feng, et al. Regularity of the Ordovician hydrocarbon system distribution in the Tabei non-foreland area of the Tarim Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2025, 46 (1): 15-30.
- [17] ZHU Guangyou, CHEN Feiran, WANG Meng, et al. Discovery of the Lower Cambrian high-quality source rocks and deep oil and gas exploration potential in the Tarim Basin, China [J]. *AAPG Bulletin*, 2018, 102(10): 2123-2151.
- [18] 韩剑发, 苏洲, 陈利新, 等. 塔里木盆地台盆区走滑断裂控储控藏作用及勘探潜力[J]. *石油学报*, 2019, 40(11): 1296-1310.
- HAN Jianfa, SU Zhou, CHEN Lixin, et al. Reservoir-controlling and accumulation-controlling of strike-slip faults and exploration

- potential in the platform of Tarim Basin[J]. *Acta Petroli Sinica*, 2019, 40(11): 1296–1310.
- [19] 杨宪彰, 能源, 徐振平, 等. 塔里木盆地三大构造旋回油气成藏特征[J]. *现代地质*, 2024, 38(2): 287–299.
YANG Xianzhang, NENG Yuan, XU Zhenping, et al. Characteristics of the hydrocarbon accumulation formed through the three structural cycles in Tarim Basin[J]. *Geoscience*, 2024, 38(2): 287–299.
- [20] 杨宪彰, 王祥, 张海祖, 等. 深地塔科1井万米超深层寒武系天然气成藏地质特征及资源潜力[J]. *深地能源科技*, 2025, 1(1): 61–73.
YANG Xianzhang, WANG Xiang, ZHANG Haizu, et al. Geological characteristics and resource potential of the Cambrian gas reservoirs in ten thousand-meter ultra-deep formation in the Well Shendi Take 1 [J]. *Deep Earth Energy Science & Technology*, 2025, 1(1): 61–73.
- [21] DAI Jinxing, ZOU Caineng, LIAO Shimeng, et al. Geochemistry of the extremely high thermal maturity Longmaxi shale gas, southern Sichuan Basin [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 74: 3–12.
- [22] ZHU Guangyou, ZHANG Baotao, YANG Haijun, et al. Origin of deep strata gas of Tazhong in Tarim Basin, China [J]. *Organic Geochemistry*, 2014, 74: 85–97.
- [23] 杨海军, 王平, 孙崇浩, 等. 深地塔科1井万米深层优质白云岩储层特征及成因分析[J]. *深地能源科技*, 2025, 1(1): 49–60.
YANG Haijun, WANG Ping, SUN Chonghao, et al. Characteristics and genesis of high-quality dolomite reservoir in the Well Shendi Take 1 in ten thousand-meter deep formations [J]. *Deep Earth Energy Science & Technology*, 2025, 1(1): 49–60.
- [24] 张辉, 徐珂, 郑鹏麟, 等. 塔里木盆地万米储层地质力学特征及勘探开发启示[J]. *深地能源科技*, 2025, 1(1): 95–109.
ZHANG Hui, XU Ke, ZHENG Penglin, et al. Geomechanical properties of ten thousand-meter deep reservoirs in Tarim Basin and enlightenments for petroleum exploration and development [J]. *Deep Earth Energy Science & Technology*, 2025, 1(1): 95–109.
- [25] 郝芳, 田金强, 王广伟, 等. 关于深层油气成藏研究若干问题的思考[J]. *深地能源科技*, 2025, 1(1): 1–13.
HAO Fang, TIAN Jinqiang, WANG Guangwei, et al. Ideas on several issues concerning the study of hydrocarbon accumulation in deep formations [J]. *Deep Earth Energy Science & Technology*, 2025, 1(1): 1–13.
- [26] 孙龙德, 马锋, 江航, 等. 陆上深层-超深层油气勘探开发进展与研判[J]. *深地能源科技*, 2025, 1(1): 14–26.
SUN Longde, MA Feng, JIANG Hang, et al. Progress and assessment of onshore oil and gas exploration and development in deep to ultra-deep formations [J]. *Deep Earth Energy Science & Technology*, 2025, 1(1): 14–26.
- [27] ZHU Guangyou, LI Tingting, ZHAO Kun, et al. Excellent source rocks discovered in the Cryogenian interglacial deposits in South China: Geology, geochemistry, and hydrocarbon potential [J]. *Precambrian Research*, 2019, 333: 105455.
- [28] ZHU Guangyou, YAN Huihui, CHEN Weiyan, et al. Discovery of Cryogenian interglacial source rocks in the northern Tarim, NW China: Implications for Neoproterozoic paleoclimatic reconstructions and hydrocarbon exploration [J]. *Gondwana Research*, 2020, 80: 370–384.
- [29] 闫磊, 朱光有, 王珊, 等. 塔里木盆地震旦系-寒武系万米超深层天然气成藏条件与有利区带优选[J]. *石油学报*, 2021, 42(11): 1446–1457.
YAN Lei, ZHU Guangyou, WANG Shan, et al. Accumulation conditions and favorable areas for natural gas accumulation in the 10000 meters ultra-deep Sinian-Cambrian in Tarim Basin [J]. *Acta Petroli Sinica*, 2021, 42(11): 1446–1457.
- [30] 朱光有, 李茜, 李婷婷, 等. 塔里木盆地震旦纪-寒武纪之交白云岩成因机理及Mg同位素差异[J]. *中国科学: 地球科学*, 2023, 53(2): 319–344.
ZHU Guangyou, LI Qian, LI Tingting, et al. Genesis mechanism and Mg isotope difference between the Sinian and Cambrian dolomites in Tarim Basin [J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 53(2): 319–344.
- [31] HOFFMAN P F, KAUFMAN A J, HALVERSON G P, et al. A Neoproterozoic snowball earth [J]. *Science*, 1998, 281(5381): 1342–1346.
- [32] ZHAO Kun, ZHU Guangyou, MENG Xianghao, et al. Enrichment of mercury in the Lower Cambrian sedimentary successions by submarine hydrothermal venting [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2022, 240: 105439.
- [33] ZHAO Kun, ZHU Guangyou, LI Tingting, et al. Fluctuations of continental chemical weathering control primary productivity and redox conditions during the Earliest Cambrian [J]. *Geological Journal*, 2023, 58(10): 3659–3672.
- [34] ZHU Guangyou, LI Tingting, ZHANG Zhiyao, et al. Nitrogen isotope evidence for oxygenated upper ocean during the Cryogenian interglacial period [J]. *Chemical Geology*, 2022, 604: 120929.
- [35] CHENG Meng, ZHANG Zihu, ALGEO T J, et al. Hydrological controls on marine chemistry in the Cryogenian Nanhua Basin (South China) [J]. *Earth-Science Reviews*, 2021, 218: 103678.
- [36] 朱光有, 闫慧慧, 陈玮岩, 等. 塔里木盆地东部南华系-寒武系黑色岩系地球化学特征及形成与分布[J]. *岩石学报*, 2020, 36(11): 3442–3462.
ZHU Guangyou, YAN Huihui, CHEN Weiyan, et al. Geochemical characteristics, formation and distribution of the Nanhua-Cambrian black rock series in the eastern Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2020, 36(11): 3442–3462.
- [37] 朱光有, 赵坤, 李婷婷, 等. 中国华南陡山沱组烃源岩的形成机制与分布预测[J]. *地质学报*, 2021, 95(8): 2553–2574.
ZHU Guangyou, ZHAO Kun, LI Tingting, et al. Formation mechanism and distribution prediction of source rocks in the Ediacaran Doushantuo Formation, South China [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2021, 95(8): 2553–2574.
- [38] ZHU Guangyou, WANG Tongshan, XIE Zengye, et al. Giant gas discovery in the Precambrian deeply buried reservoirs in the Sichuan Basin, China: Implications for gas exploration in old cratonic basins [J]. *Precambrian Research*, 2015, 262: 45–66.

- [39] 张家政, 朱地, 慈兴华, 等. 湖北宜昌地区鄂阳页2井牛蹄塘组和陡山沱组页岩气随钻碳同位素特征及勘探意义[J]. 石油学报, 2019, 40(11): 1346–1357.
- ZHANG Jiazheng, ZHU Di, CI Xinghua, et al. Characteristics of carbon isotope while drilling and exploration significance of shale gas in Niutitang and Doushantuo formations in Well Eyangye-2, Yichang, Hubei, China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2019, 40(11): 1346–1357.
- [40] 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.
- [41] ZHU Guangyou, LI Tingting, ZHAO Kun, et al. Mo isotope records from Lower Cambrian black shales, northwestern Tarim Basin (China): Implications for the Early Cambrian ocean [J]. *GSA Bulletin*, 2021, 134(1/2): 3–14.
- [42] ZHU Guangyou, HOU Jiakai, REN Rong, et al. Tectonic-sedimentary responses to major geological events, source rock formation mechanisms, and resource potential at depths greater than 10, 000 m in the cratonic basins of China [J]. *AAPG Bulletin*, 2025, 109(4): 497–544.
- [43] BJØRØY M, WILLIAMS J A, DOLCATER D L, et al. Variation in hydrocarbon distribution in artificially matured oils [J]. *Organic Geochemistry*, 1988, 13(4/6): 901–913.
- [44] UNGERER A, SCHMITZ-BOURGEOIS M, MÉLAN C, et al. γ -L-Glutamyl-L-aspartate induces specific deficits in long-term memory and inhibits [3 H] glutamate binding on hippocampal membranes [J]. *Brain Research*, 1988, 446(2): 205–211.
- [45] HORSFIELD B, SCHENK H J, MILLS N, et al. An investigation of the in-reservoir conversion of oil to gas: compositional and kinetic findings from closed-system programmed-temperature pyrolysis [J]. *Organic Geochemistry*, 1992, 19(1/3): 191–204.
- [46] SCHENK H J, DI PRIMIO R, HORSFIELD B. The conversion of oil into gas in petroleum reservoirs. Part 1: Comparative kinetic investigation of gas generation from crude oils of lacustrine, marine and fluviodeltaic origin by programmed-temperature closed-system pyrolysis [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 26(7/8): 467–481.
- [47] TISSOT B, DEROO G, HOOD A. Geochemical study of the Uinta Basin: Formation of petroleum from the Green River formation [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1978, 42(10): 1469–1485.
- [48] PRICE L C. Thermal stability of hydrocarbons in nature: Limits, evidence, characteristics, and possible controls [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1993, 57(14): 3261–3280.
- [49] ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, SU Jin, et al. The occurrence of ultra-deep heavy oils in the Tabei Uplift of the Tarim Basin, NW China [J]. *Organic Geochemistry*, 2012, 52: 88–102.
- [50] 朱光有, 杨海军, 朱永峰, 等. 塔里木盆地哈拉哈塘地区碳酸盐岩油气地质特征与富集成藏研究 [J]. 岩石学报, 2011, 27(3): 827–844.
- ZHU Guangyou, YANG Haijun, ZHU Yongfeng, et al. Study on petroleum geological characteristics and accumulation of carbonate reservoirs in Hanilecatam area, Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2011, 27(3): 827–844.
- [51] MANGO F D. The stability of hydrocarbons under the time-temperature conditions of petroleum genesis [J]. *Nature*, 1991, 352(6331): 146–148.
- [52] 朱光有, 杨海军, 苏劲, 等. 塔里木盆地海相石油的真实勘探潜力 [J]. 岩石学报, 2012, 28(4): 1333–1347.
- ZHU Guangyou, YANG Haijun, SU Jin, et al. True exploration potential of marine oils in the Tarim Basin [J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(4): 1333–1347.
- [53] MOORE C H, WADE W J. Chapter 5-Carbonate diagenesis: Introduction and tools [M]//MOORE C H, WADE W J. *Developments in Sedimentology*. Amsterdam: Elsevier, 2013: 67–89.
- [54] 朱光有, 曹颖辉, 闫磊, 等. 塔里木盆地8000m以深超深层海相油气勘探潜力与方向 [J]. 天然气地球科学, 2018, 29(6): 755–772.
- ZHU Guangyou, CAO Yinghui, YAN Lei, et al. Petroleum exploration potential and favorable areas of ultra-deep marine strata deeper than 8000 meters in Tarim Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2018, 29(6): 755–772.
- [55] 韩剑发, 孙冲, 朱光有, 等. 超深断控碳酸盐岩油藏空间结构表征技术与工程实践 [J]. 中国工程科学, 2024, 26(2): 255–268.
- HAN Jianfa, SUN Chong, ZHU Guangyou, et al. Spatial structure characterization technology and engineering practice of ultra-deep fault-controlled carbonate reservoir [J]. *Strategic Study of CAE*, 2024, 26(2): 255–268.
- [56] ZHU Guangyou, LI Xi, ZHAO Bin, et al. Genesis and reservoir preservation mechanism of 10000-m ultradeep dolomite in Chinese craton basin [J]. *Deep Underground Science and Engineering*, 2025, 4(3): 354–381.
- [57] ZHU Guangyou, WEI Zhenlun, LI Wanqing, et al. Interface dissolution kinetics and porosity formation of calcite and dolomite (110) and (104) planes: An implication to the stability of geologic carbon sequestration [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2023, 650(Part B): 1003–1012.
- [58] ZHU Guangyou, ZOU Caineng, YANG Haijun, et al. Hydrocarbon accumulation mechanisms and industrial exploration depth of large-area fracture-cavity carbonates in the Tarim Basin, western China [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2015, 133: 889–907.
- [59] BULLER A T, BJØRKUM P A, NADEAU P, et al. Distribution of hydrocarbons in sedimentary basins [EB/OL]. [网络访问日期缺失]. https://www.researchgate.net/profile/P-H-Nadeau/publication/284035557_Distribution_of_hydrocarbons_in_sedimentary_basins/links/564c6ab208aeab8ed5e92450/Distribution-of-hydrocarbons-in-sedimentary-basins.pdf.
- [60] NADEAU P H. Lessons learned from the golden zone concept for understanding overpressure development, and drilling safety in

- energy exploration [EB/OL]. [网络访问日期缺失]. https://www.researchgate.net/profile/P-H-Nadeau/publication/277011429_Deepwater_Horizon_Study_Group_Lessons_learned_from_the_links/555e1b5c08ae6f4dcc8dd185/Deepwater-Horizon-Study-Group-Lessons-learned-from-the.pdf.
- [61] 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.
- [62] 张水昌, 朱光有, 杨海军, 等. 塔里木盆地北部奥陶系油气相态及其成因分析[J]. 岩石学报, 2011, 27(8): 2447-2460.
- ZHANG Shuichang, ZHU Guangyou, YANG Haijun, et al. The phases of Ordovician hydrocarbon and their origin in the Tabei uplift, Tarim Basin [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27(8): 2447-2460.
- [63] YANG Haijun, ZHU Guangyou, WANG Yu, et al. The geological characteristics of reservoirs and major controlling factors of hydrocarbon accumulation in the Ordovician of Tazhong area, Tarim Basin [J]. Energy Exploration & Exploitation, 2014, 32(2): 345-368.
- [64] ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, SU Jin, et al. Alteration and multi-stage accumulation of oil and gas in the Ordovician of the Tabei Uplift, Tarim Basin, NW China; Implications for genetic origin of the diverse hydrocarbons [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 46: 234-250.
- [65] ZHU Guangyou, ZHANG Zhiyao, ZHOU Xiaoxiao, et al. The complexity, secondary geochemical process, genetic mechanism and distribution prediction of deep marine oil and gas in the Tarim Basin, China [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 198: 102930.
- [66] ZHU Guangyou, ZHANG Ying, WANG Meng, et al. Discovery of high-abundance diamondoids and thiadiamondoids and severe TSR alteration of well ZS1C condensate, Tarim Basin, China [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(7): 7383-7392.
- [67] ZHU Guangyou, MILKOV A V, ZHANG Zhiyao, et al. Formation and preservation of a giant petroleum accumulation in superdeep carbonate reservoirs in the southern Halahatang oil field area, Tarim Basin, China [J]. AAPG Bulletin, 2019, 103(7): 1703-1743.
- [68] DAHL J E, MOLDOWAN J M, PETERS K E, et al. Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking [J]. Nature, 1999, 399(6731): 54-57.
- [69] CHEN Junhong, FU Jiamo, SHENG Guoying, et al. Diamondoid hydrocarbon ratios: Novel maturity indices for highly mature crude oils [J]. Organic Geochemistry, 1996, 25(3/4): 179-190.
- [70] ZHU Guangyou, WANG Meng, ZHANG Ying, et al. Higher ethanodiamondoids in petroleum [J]. Energy & Fuels, 2018, 32(4): 4996-5000.
- [71] FANG Chenchen, XIONG Yongqiang, LI Yun, et al. The origin and evolution of adamantanes and diamantanes in petroleum [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2013, 120: 109-120.
- [72] ZHU Guangyou, LI Jingfei, WANG Meng, et al. Formation and distribution of ethanodiamondoids in deeply buried marine oil from the Tarim Basin, China [J]. Organic Geochemistry, 2021, 162: 104327.
- [73] MILLER R G. The global oil system: The relationship between oil generation, loss, half-life, and the world crude oil resource [J]. AAPG Bulletin, 1992, 76(4): 489-500.
- [74] MACGREGOR D S. Factors controlling the destruction or preservation of giant light oilfields [J]. Petroleum Geoscience, 1996, 2(3): 197-217.
- [75] 曾联波, 巩磊, 宿晓岑, 等. 深层-超深层致密储层天然裂缝分布特征及发育规律[J]. 石油与天然气地质, 2024, 45(1): 1-14.
- ZENG Lianbo, GONG Lei, SU Xiaocen, et al. Natural fractures in deep to ultra-deep tight reservoirs: Distribution and development [J]. Oil & Gas Geology, 2024, 45(1): 1-14.
- [76] ZHU Guangyou, ZHANG Shuichang, LIU Keyu, et al. A well-preserved 250 million-year-old oil accumulation in the Tarim Basin, western China; Implications for hydrocarbon exploration in old and deep basins [J]. Marine and Petroleum Geology, 2013, 43: 478-488.
- [77] 韩云浩, 姜振学, 张志遥, 等. 含油气盆地超高油气柱形成的有利地质条件[J]. 岩性油气藏, 2023, 35(2): 125-135.
- HAN Yunhao, JIANG Zhenxue, ZHANG Zhiyao, et al. Favorable geological conditions for the formation of ultra-high petroleum columns in petroliferous basins [J]. Lithologic Reservoirs, 2023, 35(2): 125-135.
- [78] 韩剑发, 王彭, 朱光有, 等. 塔里木盆地超深层千吨井油气地质与高效区分布规律[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(5): 735-748.
- HAN Jianfa, WANG Peng, ZHU Guangyou, et al. Petroleum geology and distribution law of high efficiency areas in ultra-deep kiloton wells in Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(5): 735-748.
- [79] 邹才能, 陶士振, 侯连华, 等. 非常规油气地质学[M]. 北京: 地质出版社, 2014: 429-434.
- ZOU Caineng, TAO Shizhen, HOU Lianhua, et al. Unconventional petroleum geology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2014: 429-434.
- [80] 罗晓容, 杨海军, 王震亮, 等. 深层-超深层碎屑岩储层非均质性特征与油气成藏模式[J]. 地质学报, 2023, 97(9): 2802-2819.
- LUO Xiaorong, YANG Haijun, WANG Zhenliang, et al. Heterogeneity characteristics of clastic reservoirs and hydrocarbon accumulation mode in deep-ultradeep basins [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(9): 2802-2819.

(编辑 刘格云)