

文章编号: 0253-2697(2023)12-2020-13 DOI:10.7623/syxb202312002

# 中国陆上叠合盆地超深层油气成藏条件与勘探地位

赵文智<sup>1</sup> 汪泽成<sup>1</sup> 黄福喜<sup>1</sup> 赵振宇<sup>1</sup> 姜华<sup>1</sup> 徐洋<sup>2</sup>

(1. 中国石油勘探开发研究院 北京 100083; 2. 中国石油杭州地质研究院 浙江杭州 310023)

**摘要:** 中国叠合盆地超深层油气资源丰富, 是重要的战略接替领域。勘探研究与实践揭示, 超深层油气成藏条件具有两分性: 有利成藏条件只存在于特定的盆地环境, 具有地域性; 不利成藏条件是超深层固有属性, 具有普遍性。烃源灶有效且有规模、储集层至今保持有效储集性能且有规模、生-储-盖要素存在空间组合且至今保持有效性是超深层是否具有勘探价值的决定性要素。有利于超深层具备勘探潜力的盆地具有以下特征: ①存在克拉通差异沉降演化, 且在漫长地质历史时期未被深埋, 烃源灶发育且至今仍在有效生烃窗口; ②发育碳酸盐岩为主的沉积层系, 存在颗粒型台缘和台内滩并经过建设性成岩作用改造, 或者在地质历史时期曾经经历地下水溶蚀淋滤, 使超深层孔隙(含裂缝、溶洞)发育的储层至今依然有效; ③碎屑岩、基岩或火山岩储层发育需要满足长期浅埋+后期深埋且深埋时间不长、存在构造桥的托举作用、较少压实作用影响、构造作用产生裂缝或长期风化作用建设性改造结晶岩类等单一要素或多种要素组合作用; ④盆地总体呈中-低地温场, 或烃源岩发育阶段环境中无过量放射性物质存在, 规模生烃过程不被速化。不利于超深层成藏的原因有: ①机械压实和高温高压导致超深层成岩作用强、岩石颗粒塑性增加, 不利于储层孔隙空间的保存; ②超深层因埋藏深、埋藏历史长, 多数烃源岩已经失去生烃能力, 烃源灶有效性受限; ③形成生-储-盖-圈有效组合的机会偏少, 且有经济性的资源成矿几率降低。中国超深层油气资源丰富, 勘探潜力大, 但规模勘探面临着成藏理论有待完善、工程技术有待提高等挑战, 亟待开展攻关研究。

**关键词:** 超深层; 成藏条件两分性; 烃源灶; 储集层; 生-储-盖组合; 有效性; 勘探地位; 中国陆上

中图分类号: TE122

文献标识码: A

## Hydrocarbon accumulation conditions and exploration position of ultra-deep reservoirs in onshore superimposed basins of China

Zhao Wenzhi<sup>1</sup> Wang Zecheng<sup>1</sup> Huang Fuxi<sup>1</sup> Zhao Zhenyu<sup>1</sup> Jiang Hua<sup>1</sup> Xu Yang<sup>2</sup>

(1. PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Beijing 100083, China;

2. PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, Zhejiang Hangzhou 310023, China)

**Abstract:** The ultra-deep oil and gas resources are abundant in China's superimposed basins, which are an important strategic replacement field. The exploration and research work has revealed that there is a dichotomy of accumulation conditions for ultra-deep oil and gas reservoirs; favorable accumulation conditions only exist in specific basin environments, characterized with regionality, while the unfavorable accumulation conditions are inherent attributes of ultra-deep layers, characterized with universality. The decisive factors determining whether ultra-deep layers have exploration value are the effectiveness and scale of source kitchens, the effective reservoir and its scale, as well as the spatial combination and effectiveness of source, reservoir, and cap. The basins with exploration potential in ultra-deep layers have the following characteristics: (1) there is differential subsidence evolution in cratons, which have not been deeply buried during a long geological history, and where source kitchens are developed and still in an effective hydrocarbon-generation window to this day; (2) sedimentary strata mainly composed of carbonate rocks are developed, with granular platform marginal-platform shoals and intraplatform shoals, and have undergone constructive diagenesis and modification, or have experienced groundwater dissolution and leaching during geological history, as result of which reservoirs with pores in ultra-deep layers (including fractures and caves) are developed and have been effective till today; (3) the development of clastic rock, basement, or volcanic reservoirs requires a combination of single or multiple factors, such as long-term shallow burial and later deep burial with a short burial time, the presence of structural bridges for supporting effect, less compaction, the generation of fractures by tectonism, or long-term weathering for constructive reformation of crystalline rocks; (4) the basin generally presents a medium to low geothermal field, or there is no excessive radioactive material in the environment during the development of source rock, and the large-scale hydrocarbon generation is not accelerated. The reasons for the occurrence of unfavorable accumulation conditions in ultra-deep layers include:

**基金项目:** 国家科技重大专项“下古生界—前寒武系碳酸盐岩油气成藏规律、关键技术及目标评价”(2016ZX05004-001)和中国石油天然气集团有限公司科技项目“陆相深层超深层油气富集规律与勘探评价技术研究”(2021DJ02)资助。

**第一作者:** 赵文智, 男, 1958年9月生, 2003年获中国石油勘探开发研究院博士学位, 现为中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师、中国工程院院士, 长期从事石油天然气地质综合研究和科研管理工作。Email: zwz@petrochina.com.cn

**通信作者:** 汪泽成, 男, 1966年10月生, 1998年获中国矿业大学博士学位, 现为中国石油勘探开发研究院教授级高级工程师, 主要从事含油气盆地构造、油气地质综合研究与勘探选区评价工作。Email: wangzecheng@petrochina.com.cn

(1) mechanical compaction and high temperature and pressure result in strong diagenesis and increased plasticity of rock particles in ultra-deep layers, which is not favorable to the preservation of reservoir pore space; (2) most source rocks in ultra-deep layers have lost their hydrocarbon-generation potential, and the effectiveness of source kitchens is limited due to deep burial and long burial history; (3) there is a low probability for forming an effective combination of source-reservoir-seal-trap, and the probability of economic resource mineralization is reduced. China has abundant oil and gas resources and great exploration potential in ultra-deep layers, but large-scale exploration faces challenges in terms of the hydrocarbon accumulation theory to be perfected and engineering technology, and it is urgent to carry out researches to achieve relevant breakthroughs.

**Key words:** ultra-deep layers; dichotomy of accumulation conditions; source kitchen; reservoir; source-reservoir-seal combination; effectiveness; exploration position; onshore China

引用:赵文智,汪泽成,黄福喜,赵振宇,姜华,徐洋. 中国陆上叠合盆地超深层油气成藏条件与勘探地位[J]. 石油学报, 2023, 44(12):2020-2032.

Cite: ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, HUANG Fuxi, ZHAO Zhenyu, JIANG Hua, XU Yang. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration position of ultra-deep reservoirs in onshore superimposed basins of China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2023, 44(12):2020-2032.

中国石油工业领域将中国东部盆地和西部盆地的超深层埋深分别界定为大于 4 500 m、大于 6 000 m。鉴于埋深为 6 000~6 500 m 的超深层已成为中国西部盆地增储上产的重要领域,本次讨论的超深层特指东部埋深大于 4 500 m、西部埋深大于 6 500 m 的地层。

随着油气工业发展,向深层—超深层领域进军已成为常规油气勘探开发的主要趋势。2000 年以来,全球新发现的陆上、海域深层—超深层油气田数量明显增加;截至 2018 年底,全球共发现 178 个埋深大于 6 000 m 的工业性油气田(藏)<sup>[1]</sup>。中国超深层油气勘探始于 20 世纪 70 年代,重大油气发现及规模勘探主要集中在 21 世纪,尤其是近 10 年在塔里木盆地、四川盆地的海相碳酸盐岩和塔里木盆地库车坳陷、准噶尔盆地南缘的碎屑岩发现了一批大油气田,在四川盆地二叠系火山岩、柴达木盆地基岩、渤海湾盆地潜山等超深层领域也取得重大勘探突破,展示了中国叠合盆地超深层油气勘探的巨大潜力。但同时,在塔里木盆地台盆区富满走滑断裂带和库车坳陷克深构造带、四川盆地德阳—安岳裂陷台缘带、准噶尔盆地南缘深层大构造等超深层有利区带的油气勘探也出现一些失利井。勘探实践表明,超深层油气成藏条件具有“有利”和“不利”两分性,需要深入开展油气地质基础研究,客观评价超深层油气成藏条件与富集规律,以指导勘探部署。

中国叠合盆地的地质特点决定了其深层—超深层油气成藏的复杂性,地质学家从成烃、成储、成藏机制和油气富集规律等角度分析了超深层油气的有利形成条件,取得了一系列新认识和重要理论进展<sup>[2-6]</sup>。然而,中国叠合盆地超深层油气勘探程度仍然较低,理论认识仍待进一步深化,尤其是超深层碎屑岩、基岩及火山岩等领域的相关研究开展较少。此外,超深层及古老层系勘探揭示的特殊石油地质现象尚需进一步加强

研究,如鄂尔多斯盆地杭锦旗地区 1650Ma 的长城系石英砂岩<sup>[7]</sup>具有良好的储集条件,锦 114 井、锦 118 井等 5 口井的岩心物性测试显示其孔隙度为 1.6%~12.2%,平均可达 8.0%<sup>[8]</sup>;放射性物质对烃源岩成熟度具有重要影响,四川盆地龙马溪组页岩放射性元素含量高的烃源岩热演化程度高,塔里木盆地寒武系玉尔吐斯组烃源岩放射性元素含量低、热演化成熟度低;塔里木盆地埋深超 8 000 m、地层温度超 200 ℃的超深层还产出凝析油。如何认识这些特殊现象对深化超深层领域的油气勘探具有重要意义。

在剖析超深层油气勘探案例基础上,笔者客观分析了超深层油气成藏的有利与不利条件,以期为超深层油气理论与勘探实践提供参考。

## 1 超深层油气勘探案例

中国超深层油气钻探已有 50 余年历史,但主要集中在近十余年。截至 2022 年,中国已在陆上 11 个含油气盆地实施钻探深度大于 6 000 m 的超深井,超深井的数量和钻井深度不断刷新。据不完全统计,截至 2022 年底,已在塔里木盆地台盆区及库车坳陷、四川盆地川西北及川东地区、准噶尔盆地淮南地区以及柴达木盆地柴北缘地区实施了 78 口超 8 000 m 的钻井,涉及海相碳酸盐岩、碎屑岩和基岩 3 大领域(表 1),发现了富满、塔中、顺南—顺北等(5~10)亿吨级大油田和蓬莱—中江、克深、博孜—大北等万亿立方米级大气田,在淮南地区超深层碎屑岩、柴北缘地区超深层基岩以及渤海湾盆地深潜山等领域也取得了重大勘探突破,充分展示了叠合盆地超深层油气巨大的勘探开发潜力。同时,也必须清楚地看到在超深层油气勘探实践中也出现了许多失利井。据初步分析(表 2),截至 2022 年底,中国石油天然气集团有限公司(中国石油)已实施的 23 口超 8 000 m 探井中有 11 口失利井,包括

2口圈闭不落实井(克深7井、博孜8井)、5口储层不落实井(满蓬1井、轮探3井、五探1井、阿满3加深井、新和1加深井)、3口保存不落实井(满深20井、中寒2井、天安1井)和1口工程原因失利井(克深21

井)。这些失利井主要分布在成藏条件有利的区域,如塔里木台盆区富满走滑断裂带、四川盆地德阳—安岳裂陷台缘带、库车坳陷克深构造带、准噶尔盆地南缘深层大构造,足以说明超深层油气成藏的复杂性。

表1 近年来中国石油超深层油气勘探主要成果与增储潜力

Table 1 Main achievements of ultra-deep oil and gas exploration and the potential of PetroChina in recent years

领域	盆地	地区	代表井	层位	油气发现潜力
海相碳酸盐岩	塔里木	塔北富满	满深1井	奥陶系	10亿吨级
		塔中	中古58井、中深1井	奥陶系	5亿吨级
	四川	古隆起北斜坡	角探1井、蓬探1井	震旦系—寒武系等	万亿立方米级
		川西北	双探1井、红星1井	二叠系栖霞组—茅口组	千亿立方方级
碎屑岩	塔里木	克拉—克深	克探1井	白垩系	万亿立方米级
		博孜—大北	大北4井	白垩系	万亿立方米级
	准噶尔	秋里塔格	中秋1井	白垩系	千亿立方米级
		南缘	呼探1井、天湾1井	侏罗系—白垩系	亿吨级
火山岩及基岩潜山	四川	河套	河探1井	白垩系—古近系	5亿吨级
		天府	永探1井	二叠系火山岩	千亿立方米级
	渤海湾	兴隆台潜山	兴古7井	中生界潜山	亿吨级
		牛东潜山	牛东1井	奥陶系潜山	高产油气藏
柴达木	杨税务潜山	安探1X井	奥陶系潜山	高产凝析气藏	
	昆特依	昆2加深井	基岩潜山	千亿立方米级	

表2 中国石油超8000m超深井部分失利井分析

Table 2 Analysis of some failed ultra-deep wells exceeding 8000 m of PetroChina

原因类型	井号	盆地	构造单元	完井深度/m	油气显示或测井解释	试油情况	失利井分析
构造不落实	克深7	塔里木	克拉苏构造带	8023	气层+差气层共11.9m/12层	水层	浅层砾岩造成深层地震预测偏浅,构造不落实
	博孜8	塔里木	克拉苏构造带	8235	差油气层5.0m/2层、油水同层8.0m/3层	未测试	地震资料重新处理显示圈闭不落实,且有断层切穿
储层不落实	满蓬1	塔里木	满加尔凹陷	8464	气测显示39.0m/20层	未测试	蓬莱坝组白云岩硅质充填、储层物性变差
	阿满3加深	塔里木	满加尔凹陷	8390	油气层20.0m/2层、差油气层12.0m/2层	干层	钻遇二叠系火山岩侵入体,储层不发育
	新和1加深	塔里木	轮南低凸起	8113	气测显示46.0m/13层	未测试	钻遇二叠系火山岩侵入体,储层不发育
	轮探3	塔里木	轮南低凸起	8699	差气层13.5m/4层	产微气	钻遇汉格乐乔克组致密储层
	五探1	四川	川东高陡褶带	8060		未测试	灯影组储层致密
其他成藏条件不落实	满深20	塔里木	满加尔凹陷	8235	油层+差油层共54.5m/17层	水层	走滑断裂张性段油气封堵条件差
	中寒2	塔里木	塔中凸起	8791	气测显示36.0m/8层	含气水层	走滑断裂多期活动与二叠系火成岩侵入造成气藏破坏

### 1.1 塔里木盆地超深层断控型缝洞体油气藏勘探

塔里木盆地台盆区的油气勘探前期以塔北、塔中两大隆起带为主战场,主攻奥陶系潜山和层间岩溶储层,发现了塔河、轮南等大油田。受塔里木盆地顺北地区超深层碳酸盐岩断溶体油气藏勘探成功<sup>[9]</sup>的启示,2018年以来,中国石油塔里木油田公司提出了“主干走滑断裂控储、控藏、控富”的新认识<sup>[10]</sup>,部署的风险探井满深1井获重大突破。目前,通过高精度三维地震精细刻画,落实34条断裂带,累计长度达1300km。截至2022年底,探明地质储量 $4.8 \times 10^8$ t,落实整体储

量规模近 $8 \times 10^8$ t,形成了10亿吨级储量规模大油气区。向东甩开部署的富东1井探索断控+滩相储层发育区也获得高产突破,在塔中I号断裂带下盘的顺托果勒低隆地区钻探的顺托1井获高产气流,拓展了新的接替领域。

塔里木盆地台盆区超深层油气勘探也出现失利现象,尤其是塔东隆起带古城地区因遭受晚加里东—早海西、晚海西—印支2期剧烈抬升,剥蚀厚度达4400m,部分钻井虽遇良好储层,但因缺乏“黑被子”盖层,整体以产水为主。

## 1.2 川中古隆起北斜坡灯影组天然气藏勘探

2011—2012 年,高石 1 井、磨溪 8 井在震旦系灯影组及寒武系龙王庙组获高产工业气流,拉开川中古隆起高磨地区深层高效勘探序幕,发现了储量超万亿立方米的特大气田——安岳大气田,揭示了德阳—安岳克拉通裂陷灯影组台缘带具有近源成藏的有利条件<sup>[1]</sup>。此后,按照斜坡区寻找岩性气藏的勘探思路,强化层序地层精细对比、岩溶古地貌恢复、灯影组台缘丘滩体刻画等基础研究,2018 年以来在古隆起北斜坡部署的风险探井蓬深 1 井、角探 1 井、东坝 1 井均获高产突破,展示了北斜坡超深层碳酸盐岩具备多层系立体成藏的有利条件,初步落实天然气储量规模超  $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。

随着勘探不断深入,川中古隆起北斜坡灯影组天然气藏表现出明显复杂性:①气、水关系复杂,具有多个气水界面,角探 1 井和蓬深 2 井灯影组四段(灯四段)气水界面的海拔相差近 300 m;②储层非均质性强,东坝 1 井钻遇灯四段上亚段储层厚度达 118 m,而邻近蓬深 13 井的灯四段上亚段储层厚度仅为 59 m;③灯影组控藏因素复杂,主要受断裂和岩性双重因素控制。

## 1.3 库车坳陷超深层天然气勘探

库车坳陷博孜一大北区块位于克拉—克深万亿立方米级大气区的西部,但构造更加复杂、膏盐层厚度更大,近年来该区超深层天然气勘探取得重大突破。2018 年以来,强化博孜一大北构造转换带地震攻关,在“圈闭空白区”新落实 30 个圈闭,钻探的博孜 1 井、博孜 9 井、大北 4 井等井获得  $(20 \sim 110) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$  以上高产气流,新发现了博孜 9、大北 4 等 19 个含气构造,累计发现 23 个气藏,初步形成新的万亿立方米级大气区。2022 年,以“克拉 2 之下找克拉 2”的思路为指导,在克拉 2 背斜深层部署的克探 1 井获高产突破,拓展了库车坳陷天然气勘探领域,初步评价 8000 m 以浅有利勘探面积达  $4960 \text{ km}^2$ ,资源量近  $1 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,有望成为库车坳陷天然气战略接替层系。但受超深层地震分辨率和成像精度的影响,库车坳陷超深层油气勘探存在构造圈闭不落实(如克深 7 井)、储层变差(如克深 21 井)等复杂情况。

## 1.4 准噶尔盆地南缘下组合油气勘探

准噶尔盆地南缘下组合发育侏罗系煤系烃源岩—侏罗系—白垩系砂岩储集层的良好成藏组合,是风险勘探的重点领域。近年来,瞄准南缘深层大构造,持续加强三维地震成像、钻井技术攻关,2019 年部署在西段高泉背斜的高探 1 井在白垩系清水河组获高产油气流(原油产量为  $982.50 \text{ t/d}$ 、天然气产量为  $32.18 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ )。随后针对中段清水河组 4 类不同目标先

后实施了 4 口风险探井,其中,2021 年呼探 1 井、天湾 1 井在清水河组  $7000 \sim 8000 \text{ m}$  超深层相继获得超  $700 \text{ t/d}$  油气当量的高产,实现了隐伏背斜新类型目标勘探重大突破,打开了南缘超深层规模勘探新局面。2023 年呼 101 井、呼 102 井在超深层喀拉扎组新层系又获得高产,坚定了在盆地南缘寻找大油气田的信心。

然而,准噶尔盆地南缘地区晚期构造活动强烈,断层发育,这导致该区超深层圈闭的有效性及其封盖条件评价难度大。如安集海背斜的天安 1 井在  $7046 \sim 7101 \text{ m}$  段钻遇良好储层,但以产水为主,可能与断裂发育、深层油气保存条件差有关。

## 2 叠合盆地超深层油气成藏条件

中国大型含油气盆地普遍经历了多旋回构造运动、多期多类型盆地叠合、海相与陆相沉积交互、复杂温度场演变和多期构造改造等,导致盆地超深层油气成藏条件复杂。油气成藏富集规律既不同于叠合盆地中—浅层,也不同于中生代—新生代单旋回沉积盆地的超深层。近年来,勘探实践和研究表明超深层油气成藏条件存在“有利”和“不利”两个方面,烃源灶有效且规模发育、储集层有效且规模发育、生储盖要素存在空间组合且至今保存三大要素决定了超深层是否具有勘探价值。

### 2.1 超深层规模生烃

叠合盆地超深层高成熟—过成熟烃源岩的生烃潜力和烃类相态保持是学者关注和研究的重点<sup>[12-14]</sup>。研究表明:①长期浅埋、晚期快速深埋的埋藏演化与地温场不断降低的耦合作用,加之超压环境对有机质生烃具抑制作用,生油高峰期可推延至镜质体反射率( $R_o$ )为  $1.4\% \sim 1.5\%$ <sup>[15-16]</sup>,使得烃源岩长期处于液态烃生烃窗,有利于超深层液态烃保持,是塔里木盆地台盆区超  $8000 \text{ m}$  埋深仍有原油存在的主因。②原油全组分裂解动力学模拟实验研究揭示,地层温度约为  $160 \text{ }^\circ\text{C}$  ( $R_o = 1.6\%$ ) 时液态烃才开始大量裂解成气,液态烃裂解气主生气期晚于干酪根裂解气,但生气量是干酪根裂解气的 2~4 倍<sup>[16]</sup>;原油大规模裂解的温度为  $190 \sim 220 \text{ }^\circ\text{C}$ ,完全裂解温度在  $210 \sim 240 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[17]</sup>。③煤系烃源岩在  $R_o$  大于  $2.5\%$  以后的生气量仍可达  $300 \text{ m}^3/\text{t}$  以上,生气期可延至  $R_o$  为  $5.0\%$ <sup>[18]</sup>。此外,超深层无机介质(如水、围岩矿物、幔源无机流体等)也会影响甚至参与油气的生成和演化<sup>[19-21]</sup>,如硫酸盐热化学还原作用(TSR)、高温条件下水或  $\text{H}_2$  的加氢作用能提高有机质的生烃潜力<sup>[22-23]</sup>。上述研究成果从机理上揭示超深层高温高压条件下仍具有良好的生烃潜力。

现今仍处于生烃窗阶段的规模有效烃源灶是超深

层油气成藏富集的先决条件。根据成烃母质类型,可将烃源灶分为干酪根型烃源灶和液态烃型气源灶两大类。其中,干酪根型烃源灶包括海相烃源岩灶(Ⅱ型干酪根为主)、湖相烃源岩灶(Ⅰ型、Ⅱ型干酪根)及煤系烃源岩灶(Ⅲ型干酪根);液态烃型气源灶可进一步划分为源内滞留液态烃气源灶、古油藏气源灶和源外半聚一半散状液态烃气源灶<sup>[15]</sup>。

克拉通盆地海相烃源岩具有广覆式大面积分布的特点,但盆地裂陷/拗陷区控制了主力烃源灶的分布。塔里木盆地海相层系发育下寒武统、中一下奥陶统、中奥陶统、上奥陶统4套烃源岩,总有机碳(TOC)含量超过1.0%的泥页岩面积达 $(10\sim 30)\times 10^4\text{ km}^2$ ,但烃源岩厚值区主要分布在满加尔拗陷区。四川盆地发育震旦系陡山沱组、寒武系筇竹寺组、志留系龙马溪组、二叠系龙潭组4套优质烃源岩,TOC含量超过1.0%的泥页岩面积达 $(10\sim 16)\times 10^4\text{ km}^2$ ,但烃源岩厚值区主要分布在克拉通裂陷区,如德阳—安岳裂陷区麦地坪组—筇竹寺组烃源岩厚度达340~600 m,而台地内该套烃源岩厚度小于100 m。

海相碳酸盐岩液态烃型气源灶主要包括烃源岩滞

留烃、储层中半聚半散液态烃和古油藏3种类型。烃源岩滞留烃含量可达40%~60%<sup>[16]</sup>,晚期裂解生成的天然气有相当一部分保留在烃源岩内成为页岩气的主力气源,部分通过断裂或裂缝向源外运移成藏。成油高峰期的古隆起及斜坡带有利于油气运聚而形成大型古油藏,后期裂解生成的天然气可以原位聚集形成古气藏,也可以通过断裂及裂缝沟通聚集成藏。四川盆地寒武系筇竹寺组烃源岩的主力生油期为二叠纪一早三叠世,受加里东期形成的川中古隆起控制,古油藏大面积分布。灯影组储层沥青展布规律研究显示(图1),川中古隆起及斜坡带沥青含量超过1.0%的分布面积可达 $6.0\times 10^4\text{ km}^2$ ,表明该区地质历史上曾存在特大型古油藏。侏罗纪—白垩纪,古油藏发生裂解生成天然气,是目前川中古隆起北斜坡天然气规模成藏的主力气源。这一成藏过程已被沥青 Re-Os 定年、热液白云石超低浓度 U-Pb 定年及流体包裹体等测试资料所证实<sup>[24-25]</sup>。

煤系气源灶是中国西部叠合盆地超深层天然气的重要气源岩<sup>[26]</sup>。从生烃演化看,西部地区侏罗系煤系烃源岩热演化受古近纪以来的快速深埋控制,具有晚期成藏特点。晚期快速深埋不仅导致烃源岩快速熟

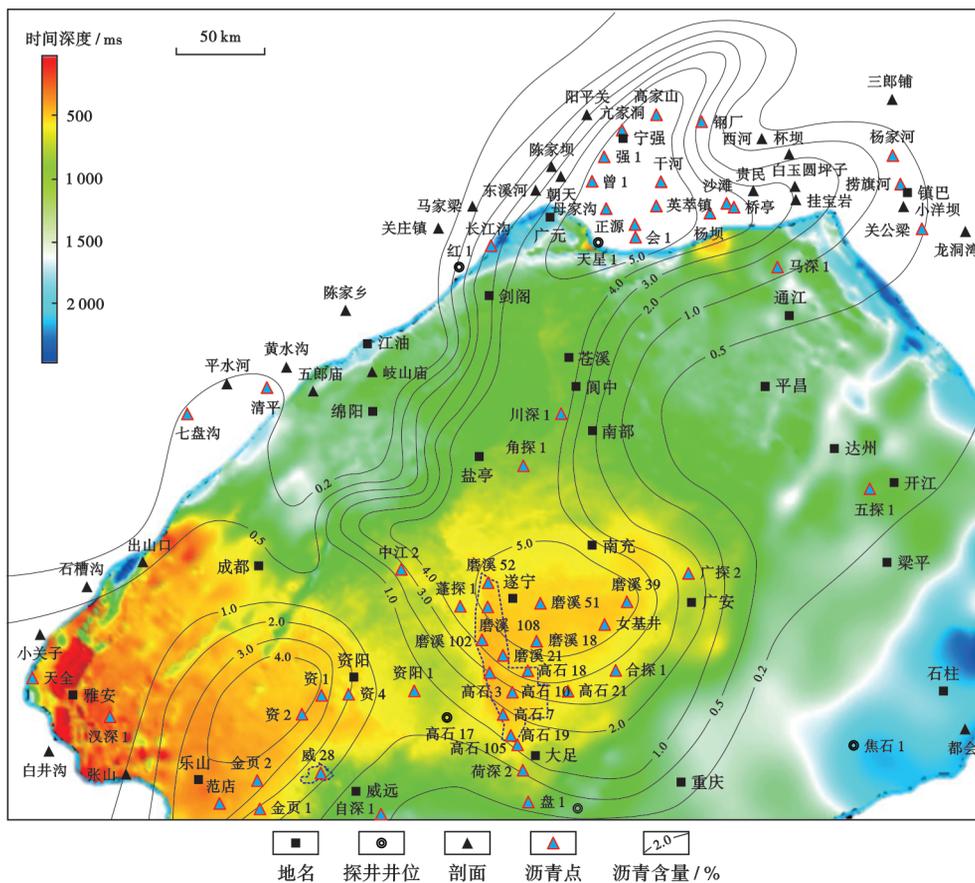


图1 四川盆地德阳—安岳裂陷及周缘灯影组二叠纪末期古埋深与沥青分布

Fig. 1 Ancient burial depth during the Late Permian and asphalt distribution of Dengying Formation in Deyang-Anyue rift and its periphery, Sichuan Basin

化,而且天然气聚集速率大,有利于大气田形成和保存<sup>[27]</sup>。5 Ma 以来,库车坳陷侏罗系烃源岩快速深埋, $R_o$  值从 1.0% 增至 2.1%,烃源岩熟化速率( $\Delta R_o/t$ )可达 0.05%/Ma,天然气聚集速率高达 $(300\sim 1180)\times 10^6\text{ m}^3/(\text{km}^2\cdot\text{Ma})$ <sup>[28]</sup>。成藏过程研究认为,库车坳陷克拉苏构造带的气源岩为拜城凹陷高成熟—过成熟烃源岩,天然气主成藏期为 2~5 Ma 以来;准噶尔盆地天然气主要来自侏罗系八道湾组煤系烃源岩,主成藏期为 10 Ma 至今;柴达木盆地煤成气主要分布于柴北缘的东坪、冷湖、马北等地区,主要为来自于侏罗系煤系烃源岩的成熟—过成熟天然气,主成藏期为 12 Ma 以来<sup>[26]</sup>;渤海湾盆地发育石炭系—二叠系煤系烃源岩,经历了侏罗纪—早白垩世、古近纪—新近纪的多次生烃演化,现今深层烃源岩以生气为主。

上述研究成果反映,超深层规模有效烃源灶分布具有局域性,克拉通裂陷区及前陆坳陷区的烃源岩经历了长期浅埋、晚期深埋以及早期古隆起背景等特定

地质条件均有利于形成规模有效烃源灶。

## 2.2 规模分布的储集层

超深层发育海相碳酸盐岩、碎屑岩、基岩及火山岩等储集层类型。机械压实和高温高压环境导致成岩作用强、岩石颗粒塑性增强,不利于储层孔隙的保存。整体上,超深层储层具有以下特征:(1)储层致密,非均质性强,孔隙度多在 2%~10%(图 2)。(2)储集空间类型多样,以孔隙-孔洞型、孔隙(洞)-裂缝型及裂缝型占主导的低孔、特低渗储层为主。(3)埋深为 6 000~9 000 m 的储层孔隙度随深度变化不明显。(4)储层空间分布主要有两种型式:①层状或准层状分布,如台缘带礁滩体及台内颗粒滩体、碎屑岩(水下)河道砂体、碳酸盐岩及基岩(火山岩)风化壳储层;②纵向跨层系分布,如沿断裂分布的断溶体、沿火山通道分布的火山岩。不同岩石类型的储集层的成储机制存在较大差异,深入研究超深层成储机制,有助于储层评价与优选,并指导勘探部署。

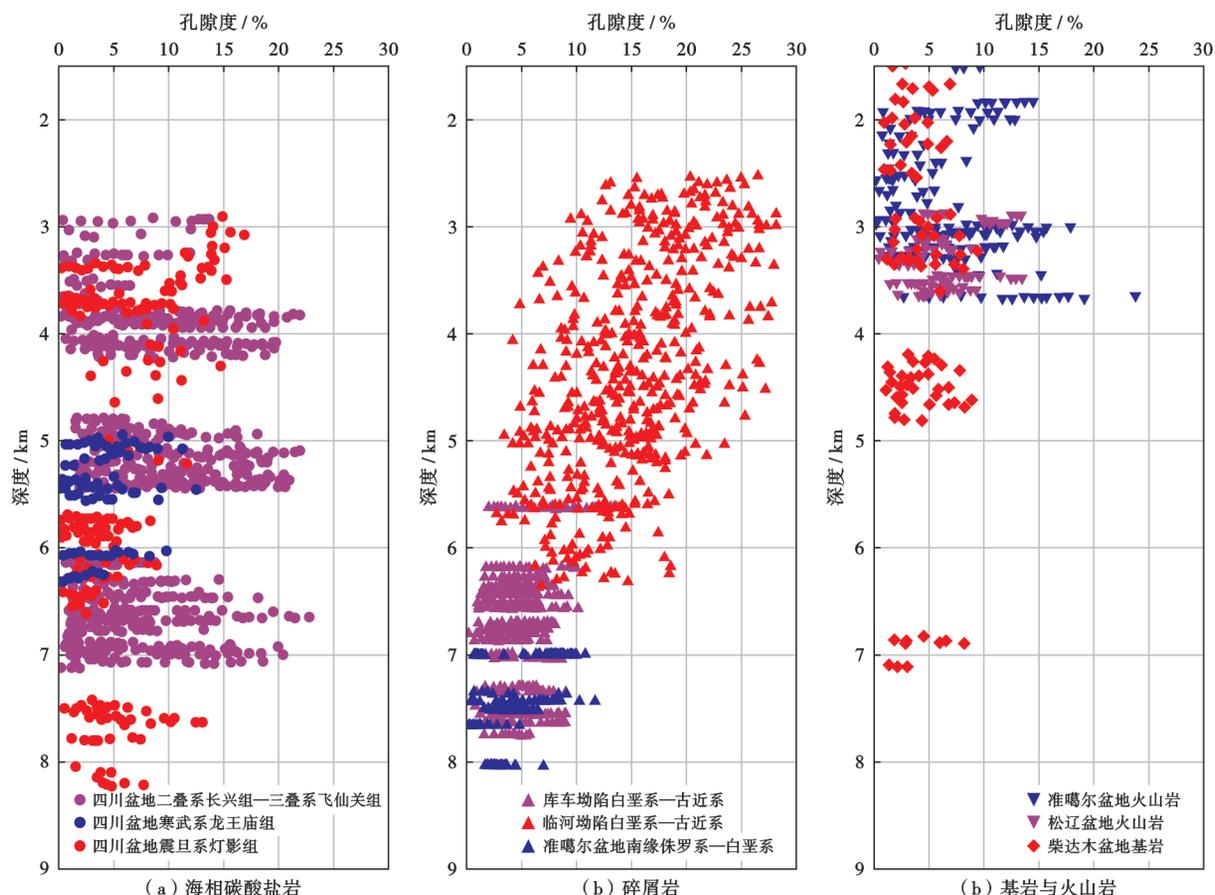


图 2 中国不同盆地不同岩石类型储层孔隙度随深度变化

Fig. 2 Porosity variation with depth of different types reservoir in different basins of China

### 2.2.1 超深层海相碳酸盐岩储集层

超深层海相碳酸盐岩储层成因是地质学家关注的重点,普遍认为高能相带叠加建设性成岩作用是其规模成储的关键<sup>[29-31]</sup>。近年来的研究表明,中国小型克

拉通构造分异作用强烈,对规模储层的形成与分布具有明显的控制作用<sup>[32-33]</sup>:①同沉积期构造分异作用控制了沉积古地貌,进而控制沉积相带的展布与高能(丘)滩体的发育规模,为层状或准层状储集层分布奠定了物

质基础,这也是基于“相控”预测储层分布的重要依据;②后沉积期的构造分异作用对储层发育的控制主要表现在表生期岩溶作用及深部岩溶、热液白云岩沿断裂分布等(图3)。基于构造分异对沉积与成储的控制作

用研究,笔者提出超深层发育4类规模储集体:同沉积断层控制的台缘带礁(丘)滩体、环同沉积隆起分布的颗粒滩体、环台凹/盐凹分布的颗粒滩体以及走滑断裂相关的断溶体。



图3 克拉通构造分异对海相碳酸盐岩储层形成与分布的控制作用示意

Fig. 3 Control of craton tectonic differentiation on the formation and distribution of marine carbonate reservoirs

同沉积断层控制的台缘带礁(丘)滩体发育于克拉通大陆边缘或克拉通裂陷边缘同沉积断裂背景下,断块掀斜作用导致断块高部位水体能量强,有利于生物礁生长及颗粒滩叠置生长,因而出现沿断裂分布多排礁滩复合体。台缘带礁滩复合体受同生—准同生岩溶作用改造,具有溶蚀孔洞发育、储层厚度大、物性条件好等特征。四川盆地德阳—安岳裂陷北段灯影组发育多排微生物丘滩体,其中,灯影组二段台缘沉积厚度为600~1000 m,灯四段台缘沉积厚度为300~450 m,台缘宽度介于40~120 km,台缘丘滩体的面积超过 $1.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

环同沉积隆起分布的颗粒滩体是指受同沉积隆起控制的环带状展布的高能相带颗粒滩体,其规模成储机制为同生—准同生岩溶作用。同沉积隆起的持续隆升可导致不同层系颗粒滩呈迁移性分布。四川盆地川中地区同沉积隆起在早寒武世晚期—早奥陶世持续发育,隆起区发育寒武系龙王庙组、洗象池组及下奥陶统桐梓组颗粒滩,滩体分布具有向斜坡区不断迁移的特征,多层系滩体叠合面积超过 $3.0 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。塔里木盆地温宿低隆、乌恰隆起、塔南隆起区的震旦系奇格布拉克组白云岩丘滩体分布面积约为 $5 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,下寒武统肖尔布拉克组—吾松格组丘滩体分布面积约为 $12 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

环台凹/盐凹分布的颗粒滩体是指台凹(盐凹)周缘沉积古地貌相对较高,有利于颗粒滩沉积,发育的生屑滩、内碎屑滩、球粒滩、藻粒滩和鲕粒滩等颗粒滩类

型。受海平面升降变化控制明显,颗粒滩体的单层厚度较薄、层数多、累积厚度大、分布面积广。四川盆地环绕万州—宜宾台凹发育的上寒武统洗象池组颗粒滩体受同生—准同生期高频次暴露影响,形成溶蚀孔洞发育的储集层,孔隙度多在3%~6%,局部可达12%,分布面积超过 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

走滑断裂相关的断溶体是指沿断裂分布的岩溶储层(也称为断溶体),表现为沿高角度断裂(以走滑断裂为主)分布、纵向上多层系缝洞体叠置发育、平面上呈狭长条状或线性分布。如塔里木盆地塔中—塔北过渡带的奥陶系断溶体<sup>[34]</sup>,克拉通内部发育滑距小但规模巨大的走滑断裂系,深部流体沿断裂垂向运移、进行多层系岩溶改造,控制了断溶体储层发育。从储集层发育规律看,走滑断裂错断、破碎、溶蚀可形成巨大储集空间,在钻井中普遍发生放空、漏失。断控储层呈纵向树状、平面带状分布,断裂破碎带的宽度为100~2000 m,最大发育深度可达7000 m以上。

### 2.2.2 超深层碎屑岩储层

中西部地区超深层碎屑岩储层发育时代跨度从古生代到新生代,以中生代侏罗纪—白垩纪为主,储层类型以三角洲(扇三角洲、辫状河三角洲等)前缘亚相砂体和河流相砂体为主,尽管储层埋藏深度较大,但孔隙度仍可达8%~15%<sup>[35]</sup>。超深层碎屑岩储层岩石类型主要为长石岩屑砂(砾)岩、岩屑砂(砾)岩,储集空间包括剩余粒间孔、粒内溶孔、粒间溶孔和微裂缝,根据储集空间类型可划分为孔隙型、裂缝-孔隙型、裂缝型3

类。由于超深层碎屑岩埋藏深度大、地层温度和压力高、成岩时间久,储层受高温-高压成岩作用的漫长改造,表现为成岩强度大、储层非均质性强等特点。

研究表明,温度场、应力场、流体场“三场”耦合作用控制了超深层碎屑岩储层的规模发育,成储机制主要表现为“低地温场弱成岩—强超压抗压实—多种流体溶蚀增孔”。①低地温梯度背景下,碎屑岩储集层在晚期快速深埋之前长期处于早期成岩阶段的浅埋藏环境,成岩强度较弱,有利于原生孔隙的保存。河套盆地河探 1 井古近系 6 037 m 深度的储层孔隙度为 18.2%,渗透率为 4.58 mD,为以原生孔为主的中孔、低渗型储层<sup>[36]</sup>。②晚期快速深埋导致砂泥岩互层中欠压实及流体超压现象明显,一方面可降低储层所受的有效应力,延缓机械压实作用对原生孔隙的破坏,另一方面可延缓烃源岩生烃排酸,有利于超深层次生孔隙的形成。准噶尔盆地南缘 GHW001 井的白垩系清水河组储层具有强超压特征(压力系数达 2.0),近 6 000 m 埋深的储层仍大量发育原生孔和裂缝,孔隙度超过 15%。③构造桥托举作用可较少压实减孔,有利于超深层储层孔隙保持。前陆盆地在构造挤压过程中,断层面产状变化及相互叠置可在局部造成构造脱空现象,使得下伏超深层储层免受强挤压而保持好的物性<sup>[37-38]</sup>。王招明等<sup>[39]</sup>指出,库车山前带的脆性、塑性地层在挤压变形过程中发生分层收缩变形,巨厚塑性盐岩之上的刚性地层发生褶皱冲断并大幅抬升,形成类似“屋脊状”的顶蓬构造,即成排分布的构造桥。巨厚塑性盐岩层的塑性流动作用可以抵消其上部碎屑岩地层产生的垂向重力,有效减缓垂向压实作用。位于克拉苏构造带深层区断背斜构造的博孜 9 井,在 7 600 m 以下的白垩统巴什基奇克组储层孔隙度可达 4%~13%,储集空间以原生粒间孔为主,次为粒间溶孔<sup>[40]</sup>,这充分证实了构造桥托举作用对超深层储层的控制作用。

### 2.2.3 深层基岩及火山岩储层

目前全球已发现的基岩及火山岩油气藏的分布层系涉及太古界至古近系,储集层岩石类型多样,其中,基岩储集层岩石类型以变质岩和花岗岩为主<sup>[41-45]</sup>,火山岩储集层岩石类型以中酸性—中基性火山岩为主。储层类型以孔隙-裂缝型及裂缝型双孔介质占主导的低孔、特低渗储层为主。从分布位置看,紧邻基岩及火山岩顶部以风化壳型储层为主,基质孔隙较发育;远离风化壳则发育内幕裂缝型储集层,基质孔不发育。与“相控”、“(准)层状分布”的沉积岩储集层相比,基岩储集层的非均质性强烈。

目前,基岩油气藏勘探集中在中—浅层,发现的油气田埋深普遍小于 4 500 m。但从基岩储层发育机制

看,深层—超深层仍发育有效储层。①岩石类型及其组合特征是基岩储集层非均质性的物质基础。无论是变质岩还是火山岩,长石、石英等浅色矿物的含量越高、溶蚀作用越强、岩石脆性强度越大,越有利于岩石破裂及物理风化,越易于产生裂缝和溶蚀孔洞<sup>[41,43]</sup>。②基岩风化壳储层发育程度取决于风化体的保存状态与后期改造。保存较好的基岩顶部风化层及半风化层溶蚀孔洞发育,对形成储层最为有利。后期改造如河流冲刷、褶皱剥蚀、断层错断等对基岩储层的分布起主导作用<sup>[46]</sup>。后期断层作用是基岩储层由风化壳型向内幕型纵向延伸的关键,尤其在大型走滑断裂带及其邻近区,内幕裂缝型储集层纵向延伸可达千米<sup>[43]</sup>。③基岩储集层具有成储时机早、裂缝-孔洞为主、非均质性强、抗压实能力强等特点,使得基岩储集层物性受埋深影响较小,深层—超深层基岩仍可发育规模有效储集层。柴达木盆地昆特依基岩气藏的埋深为 6 800~7 200 m,昆 2 井等井的试采资料表明,该基岩气藏具有长期稳产、高产、效益好的特征,证实了深层基岩储集层具备油气成藏的有利条件<sup>[47]</sup>,是值得高度重视的领域。

综上所述,中国叠合盆地超深层发育多类型的有效储层,但必须清楚地认识到机械压实和高温高压环境导致超深层成岩作用强,且岩石颗粒的塑性增强,不利于储层孔隙的保存;同时,受资料偏少及研究程度较低的影响,对超深层储层强非均质性成因机制认识不清,客观预测有效储层的技术尚不成熟,对超深层储层分布规律的准确把控有待深化。

### 2.3 规模成藏组合

叠合盆地超深层通常都经历了多旋回构造运动、多期构造-沉积演化,生-储-盖成藏要素规模分布、成藏要素空间组合有效且至今保存是超深层油气富集的关键。

克拉通海相碳酸盐岩发育 3 类规模有效成藏组合。①裂陷—台缘近源成藏组合。克拉通裂陷发育优质规模烃源岩,台缘带发育丘滩体储集层,断裂、不整合面为输导体,油气近源聚集,成藏条件十分优越。该组合发育构造-岩性、丘滩体岩性、地层-岩性等多种圈闭类型,沿台缘带集群式分布,目前在四川盆地德阳—安岳裂陷东翼台缘带、开江—梁平裂陷两侧台缘带和塔里木盆地塔中奥陶系台缘带均发现了大油气田。②烃源岩-断裂-台内滩成藏组合。碳酸盐台地内部往往发育大面积颗粒滩储层,沿古隆起斜坡带呈准层状分布,或沿台凹周缘环状展布,纵向上多层系叠置。相比裂陷,台内烃源条件较差,储层距离主力烃源岩较远,断裂输导是成藏的关键因素。川中古隆起斜坡带灯影组、沧浪铺组、龙王庙组、栖霞组、茅口组和长兴组等多

层系含气,具有多层系立体成藏、复式聚集的特点。③烃源岩-断裂-缝洞体成藏组合。以塔里木盆地富满地区奥陶系为典型代表,走滑断裂错断、破碎、溶蚀形成的缝洞体系为良好储集空间,超深层( $>8000\text{ m}$ )仍发育良好储层;断裂向下断穿寒武系烃源岩,成为油气纵向运移的“高速公路”。

超深层碎屑岩在前陆盆地及断陷盆地发育良好的规模成藏组合。①前陆冲断带下组合具备形成大油气田的成藏组合条件。中国西部前陆盆地纵向上可划分为上组合、中组合及下组合。下组合现今埋藏深度大,普遍发育中一下侏罗统湖泊-沼泽相泥页岩及煤系烃源岩,烃源岩厚度大、有机质丰度高、 $R_o$ 多小于2.5%,是库车、淮南、柴北缘等西部前陆盆地的主力烃源岩。库车前陆冲断带三叠系-侏罗系烃源岩层被逆冲断层冲断叠置形成“被垛式”堆叠,导致烃源岩厚度和生气强度增加2~3倍,为大气田提供充足气源。受气候变化、湖平面升降、物源供应等因素联合控制,富有机质泥页岩与砂岩频繁互层,构成分布广泛的源-储组合,奠定了油气成藏富集的物质基础。②低地温场背景下的中生代-新生代断陷盆地超深层也具备良好的成藏组合条件。河套盆地是夹持在巴彦乌拉山-狼山构造带-阴山褶皱带与鄂尔多斯盆地之间的中生代-新生

代断陷盆地<sup>[48]</sup>,历经“弱伸展断坳期、强伸展断陷期和走滑改造期”成盆演化<sup>[36]</sup>,发育下白垩统固阳组、渐新统临河组两套主力成化湖相烃源岩<sup>[49]</sup>,与辫状河三角洲砂体互层,构成良好的近源成藏组合,且大面积分布,成藏条件优越。

超深层基岩及火山岩在特定地质条件下可发育规模成藏组合。解剖研究已发现的基岩油气藏,可将源-储组合分为源岩-储集层接触型和源岩-储集层分离型两大类,图4展示了沉积盆地基岩油气藏的分布规律。①源岩-储集层接触型是指烃源岩与储集层接触或毗邻而构成的良好源-储组合,可进一步分为烃源岩上覆型、烃源岩侧接型及烃源岩包裹型3个亚类。该类组合主要分布在沉积盆地的底部或中一下部,是深层基岩、火山岩油气藏勘探的主要对象,渤海湾盆地、柴达木盆地、准噶尔盆地、松辽盆地均发育该组合类型,是未来勘探的重点领域。②源岩-储集层分离型是指烃源岩与储集层未直接接触,而是通过断层或不整合面输导体系来沟通。该类成藏组合多发育在盆地边部、盆内凸起带以及斜坡带中-上部,目的层埋深较浅,是目前深化勘探的主要对象,如渤海海域的沙垒田凸起、渤南低凸起、石臼坨凸起、柴达木盆地西南缘及西北缘、琼东南盆地松南低凸起等区带均发现了油气田。

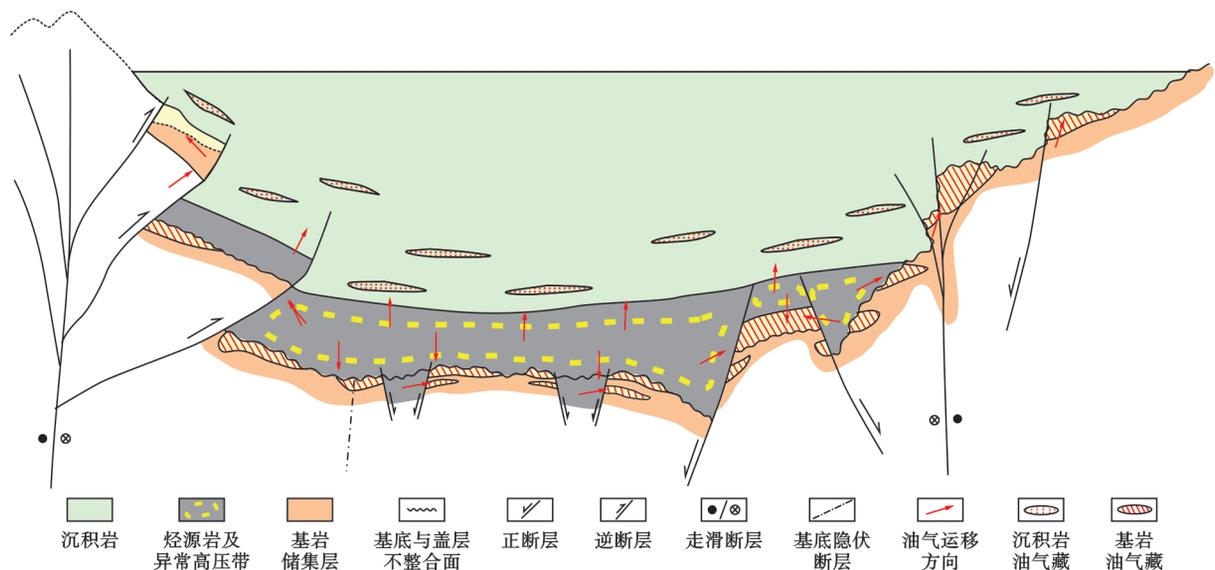


图4 沉积盆地基岩油气藏分布模式

Fig. 4 Distribution model of basement reservoirs in sedimentary basin

#### 2.4 超深层油气成藏的利与弊

基于上述分析,可以发现超深层油气地质条件存在“有利”与“不利”两个方面,其中,有利成藏条件往往是在特定条件下才具备的,分布具区域性;而不利成藏条件则是超深层本身所固有的,具普遍性。因此,超深层油气勘探需要深入分析成藏要素及成藏组合是否有

效且规模发育,以做出客观评价。

超深层油气成藏的有力条件包括:①古老克拉通存在差异沉降演化,且在漫长地质历史中未被深埋;烃源灶发育且至今仍在有效生烃窗口。②发育以碳酸盐岩为主的层系,且存在颗粒型台缘和台内滩并经过建设性成岩作用改造,或者在地质历史中曾经历地下水

溶蚀林滤,使超深层孔隙(含裂缝溶洞)型储层至今依然有效。③碎屑岩储层、基岩或火山岩储层的发育需要满足某种或多种因素组合存在,如长期浅埋后期深埋且深埋时间不长、存在构造桥的托举作用、较少压实减孔、构造作用产生裂缝及地质历史上风化作用对结晶岩类的建设性改造等。④盆地总体呈中一低地温场,或烃源岩沉积环境中无过量放射性物质存在,因此,规模生烃过程不会被速化。

超深层油气成藏不利条件产生的主要原因包括:①机械压实和高温高压环境导致超深层成岩作用强,且岩石颗粒的塑性增强,不利于储层孔隙空间的保存;②超深层因埋藏深、埋藏历史长,多数烃源岩已经失去生烃能力,源灶有效性受限;③超深层形成生-储-盖-圈有效组合的机会偏少,且有经济性的资源成矿几率降低。

### 3 超深层油气勘探面临的挑战与未来勘探地位

#### 3.1 面临挑战与对策

中国叠合盆地超深层油气地质研究与勘探取得了重要进展,但规模勘探和效益开发面临着诸多挑战,主要表现在超深层油气资源的规模性、经济性以及工程技术经济实用性。要提高超深层油气勘探成效,就必须直面挑战、强化基础研究和攻关,为超深层油气资源开发奠定基础。

超深层油气资源规模性的客观评价面临着超高温高压环境下水与烃类流体相态不清,有机-无机成烃作用过程、条件与潜力尚不明确等问题,制约着资源分布的客观评价。要在叠合盆地深部结构、温压场演化与原型盆地恢复基础上,着力研究优质烃源岩分布、有机质成烃过程及生烃“死亡线”、烃类相态保存下限、有机-无机复合成烃的资源贡献等重大基础问题,以及有机-无机复合成烃的资源评价方法,为评价超深层资源分布提供理论依据。

超深层油气资源经济性的客观评价面临着优质储层与成藏富集规律不清、有效预测技术手段不成熟等挑战,制约了对超深层油气富集区的客观评价。要在构造-岩相古地理和埋藏演化史重建的基础上,着力研究地下流体在超深层发生水岩反应的机理、高温高压强应力等地质条件下储层成孔与保孔、成藏过程与运聚动力等机理研究,明确规模有效储层分布与油气富集的主控因素和分布规模,为超深层储层预测提供理论指导。针对超深层地球物理资料信噪比低、分辨率低、成像精度低及保真度低等主要问题,从超深层复杂构造成像与复杂储集层预测两个方面,加强宽频地震采集、复杂储集层岩石物理建模、高精度叠前保幅成

像、复杂储集层综合评价等技术的攻关,为超深层储层预测提供技术手段。

超深层勘探工程技术经济实用性面临着超高温、超高压及超强应力条件下超深井提速和井筒完整性等相关的突出工程技术问题。要加快研发超深层钻井、测井、压裂等技术装备和新型材料等,尤其是抗 240℃ 高温的高密基钻完井工作液和抗 200℃ 以上高温的固井、测试、试油及压裂工具和设备等,开展高温高压条件下岩石破裂机理研究,研发油基泥浆等复杂井筒环境测井处理和储层与流体评价技术,为超深层勘探开发提供工程技术保障。

#### 3.2 超深层油气资源潜力

基于“十三五”(2015—2020年)油气资源评价结果的动态分析,埋深为 6 000~8 000 m 的超深层油气地质资源量分别为  $56.7 \times 10^8 \text{ t}$  和  $13.17 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。其中,超深层石油主要分布在塔里木盆地和准噶尔盆地,资源量分别为  $37.9 \times 10^8 \text{ t}$  和  $11.1 \times 10^8 \text{ t}$ ;天然气主要分布在塔里木、四川和准噶尔 3 大盆地,地质资源量分别为  $6.54 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 、 $2.74 \times 10^{12} \text{ m}^3$  和  $1.32 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。从领域看,海相碳酸盐岩资源占比大,石油和天然气的资源量占比分别为 70.0% 和 59.5%;其次为碎屑岩领域,占比分别为 29.1% 和 30.4%;基岩及火山岩领域石油和天然气资源量占比分别为 0.9% 和 10.1%。

以往油气资源评价对埋深大于 8 000 m 的超深层油气资源重视不够。研究团队近期利用中国石油深层油气资源评价系统,采用成因法为主的 4 种方法初步评估了塔里木、四川、准噶尔、柴达木、鄂尔多斯 5 大盆地 8 000 m 以深的油气地质资源。结果表明,5 个盆地埋深大于 8 000 m 的石油资源量为  $24.3 \times 10^8 \text{ t}$ 、天然气资源量为  $19.0 \times 10^{12} \text{ m}^3$ ,总资源量为  $175.88 \times 10^8 \text{ t}$  油当量。其中,塔里木盆地埋深大于 8 000 m 的油气资源量为  $92.8 \times 10^8 \text{ t}$  油当量,占比为 52.7%;四川盆地为  $52.6 \times 10^8 \text{ t}$  油当量,占比为 29.9%;准噶尔盆地为  $18.4 \times 10^8 \text{ t}$  油当量,占比为 10.5%;柴达木盆地为  $7 \times 10^8 \text{ t}$  油当量,占比为 4.0%;鄂尔多斯盆地为  $5.2 \times 10^8 \text{ t}$  油当量,占比为 2.9%。

#### 3.3 超深层油气勘探方向

基于资源评价结果和勘探实践,中西部叠合盆地的海相碳酸盐岩、碎屑岩、火成岩及基岩 3 大领域是未来超深层油气勘探的主攻方向。

超深层海相碳酸盐岩领域主要包括塔里木盆地塔北隆起带、富满—顺北断溶带、塔中断裂带和麦盖提斜坡区,四川盆地川中隆起北斜坡震旦系—下古生界、二叠系和川东高陡构造带盐下,鄂尔多斯盆地天环坳陷、东部奥陶系盐下和西南缘元古界—寒武系等。

超深层碎屑岩领域主要包括塔里木盆地库车山前带和塔西南山前带,准噶尔盆地南缘山前带、沙湾凹陷和昌吉凹陷,柴达木盆地柴西坳陷,河套盆地临河坳陷等。

超深层基岩及火山岩领域主要包括准噶尔盆地腹部石炭系火山岩、柴达木盆地阿尔金山前深层基岩发育区、四川盆地川西南二叠系火山岩。

## 4 结论

(1) 中国叠合盆地超深层成藏条件具有两分性,有利成藏条件仅存在于特定的盆地环境,具有地域性;不利成藏条件是超深层固有属性,具有普遍性。要基于“烃源灶有效性及规模性”、“储集层有效性及规模性”、“成藏组合有效性及规模性”3大要素做出客观评价。

(2) 超深层油气成藏的有利条件包括中—低地温场背景、长期浅埋+晚期深埋的沉降演化、规模有效烃源灶、规模有效储集层及生-储-盖组合。古老克拉通超深层海相碳酸盐岩及前陆盆地超深层碎屑岩具有资源总量大、烃源灶规模大、储集层分布广、成藏组合有利等有利条件,是未来超深层油气勘探的主体。

(3) 超深层油气规模勘探面临着成藏理论与工程技术挑战,要从油气资源的规模性、经济性以及工程技术的经济实用性等方面,强化基础研究和关键技术攻关。

## 参 考 文 献

- [1] 张光亚,马锋,梁英波,等.全球深层油气勘探领域及理论技术进步[J].石油学报,2015,36(9):1156-1166.  
ZHANG Guangya, MA Feng, LIANG Yingbo, et al. Domain and theory-technology progress of global deep oil & gas exploration [J]. Acta Petrolei Sinica, 2015, 36(9): 1156-1166.
- [2] 赵文智,王兆云,张水昌,等.有机质“接力成气”模式的提出及其在勘探中的意义[J].石油勘探与开发,2005,32(2):1-7.  
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, ZHANG Shuichang, et al. Successive generation of natural gas from organic materials and its significance in future exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1-7.
- [3] 何登发,马永生,刘波,等.中国含油气盆地深层勘探的主要进展与科学问题[J].地学前缘,2019,26(1):1-12.  
HE Dengfa, MA Yongsheng, LIU Bo, et al. Main advances and key issues for deep-seated exploration in petroliferous basins in China[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 1-12.
- [4] 马永生,蔡勋育,赵培荣,等.深层超深层碳酸盐岩优质储层发育机理和“三元控储”模式——以四川普光气田为例[J].地质学报,2010,84(8):1087-1094.  
MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong, et al. Formation mechanism of deep-buried carbonate reservoir and its model of three-element controlling reservoir: a case study from the Puguang oilfield in Sichuan[J]. Acta Geologica Sinica, 2010, 84(8): 1087-1094.
- [5] 赵文智,汪泽成,张水昌,等.中国叠合盆地深层海相油气成藏条件与富集区带[J].科学通报,2007,52(S1):9-18.  
ZHAO Wenzhi, WANG Zecheng, ZHANG Shuichang, et al. Accumulation conditions and enrichment zones of deep marine oil and gas in superimposed basins of China[J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(S1): 9-18.
- [6] 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.
- [7] 李怀坤,张健,田辉,等.华北克拉通北缘燕辽裂陷槽中—新元古代地层年代学研究进展[J].地质调查与研究,2020,43(2):127-136.  
LI Huaikun, ZHANG Jian, TIAN Hui, et al. Recent advances in the study of the Meso- to Neoproterozoic chronostratigraphy of the Yanliao aulacogen on the northern margin of the North China Craton [J]. Geological Survey and Research, 2020, 43(2): 127-136.
- [8] 张威,闫相宾,刘超英,等.鄂尔多斯盆地北部中元古界潜山圈闭特征与成藏模式[J].地质学报,2023,97(1):168-178.  
ZHANG Wei, YAN Xiangbin, LIU Chaoying, et al. Characteristics and reservoir forming model of Mesoproterozoic buried hill traps in the northern Ordos Basin [J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(1): 168-178.
- [9] 焦方正.塔里木盆地顺北特深碳酸盐岩断溶体油气藏发现意义与前景[J].石油与天然气地质,2018,39(2):207-216.  
JIAO Fangzheng. Significance and prospect of ultra-deep carbonate fault-karst reservoirs in Shunbei area, Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(2): 207-216.
- [10] 杨海军,邓兴梁,张银涛,等.塔里木盆地满深1井奥陶系超深断控碳酸盐岩油气藏勘探重大发现及意义[J].中国石油勘探,2020,25(3):13-23.  
YANG Haijun, DENG Xingliang, ZHANG Yintao, et al. Great discovery and its significance of exploration for Ordovician ultra-deep fault-controlled carbonate reservoirs of Well Manshen 1 in Tarim Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2020, 25(3): 13-23.
- [11] 徐春春,邹伟宏,杨跃明,等.中国陆上深层油气资源勘探开发现状及展望[J].天然气地球科学,2017,28(8):1139-1153.  
XU Chunchun, ZOU Weihong, YANG Yueming, et al. Status and prospects of exploration and exploitation of the deep oil & gas resources onshore China [J]. Natural Gas Geoscience, 2017, 28(8): 1139-1153.
- [12] 马永生,黎茂稳,蔡勋育,等.中国海相深层油气富集机理与勘探开发:研究现状、关键技术瓶颈与基础科学问题[J].石油与天然气地质,2020,41(4):655-672.  
MA Yongsheng, LI Maowen, CAI Xunyu, et al. Mechanisms and exploitation of deep marine petroleum accumulations in China: advances, technological bottlenecks and basic scientific problems [J]. Oil & Gas Geology, 2020, 41(4): 655-672.
- [13] 赵文智,胡素云,刘伟,等.再论中国陆上深层海相碳酸盐岩油气地质特征与勘探前景[J].天然气工业,2014,34(4):1-9.  
ZHAO Wenzhi, HU Suyun, LIU Wei, et al. Petroleum geological features and exploration prospect in deep marine carbonate strata onshore China: a further discussion [J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(4): 1-9.
- [14] 郭旭升,胡东风,黄仁春,等.四川盆地深层—超深层天然气勘探进展与展望[J].天然气工业,2020,40(5):1-14.  
GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Deep and ultra-deep natural gas exploration in the Sichuan Basin: pro-

- gress and prospect[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(5): 1-14.
- [15] 赵文智,王兆云,王红军,等.再论有机质“接力成气”的内涵与意义[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(2): 129-135.  
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, WANG Hongjun, et al. Further discussion on the connotation and significance of the natural gas relaying generation model from organic materials[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(2): 129-135.
- [16] 赵文智,王兆云,王东良,等.分散液态烃的成藏地位与意义[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(4): 401-413.  
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, WANG Dongliang, et al. Contribution and significance of dispersed liquid hydrocarbons to reservoir formation[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(4): 401-413.
- [17] 张水昌,何坤,王晓梅,等.深层多途径复合生气模式及潜在成藏贡献[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(10): 1421-1435.  
ZHANG Shuichang, HE Kun, WANG Xiaomei, et al. The multipath gas generation model and its potential contribution to petroleum accumulation in deep formations[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(10): 1421-1435.
- [18] 张水昌,胡国艺,米敬奎,等.三种成因天然气生成时限与生成量及其对深部油气资源预测的影响[J]. *石油学报*, 2013, 34(S1): 41-50.  
ZHANG Shuichang, HU Guoyi, MI Jingkui, et al. Time-limit and yield of natural gas generation from different origins and their effects on forecast of deep oil and gas resources[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2013, 34(S1): 41-50.
- [19] 金之钧,张刘平,杨雷,等.沉积盆地深部流体的地球化学特征及油气成藏效应初探[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 2002, 27(6): 659-665.  
JIN Zhijun, ZHANG Liuping, YANG Lei, et al. Primary study of geochemical features of deep fluids and their effectiveness on oil/gas reservoir formation in sedimental basins[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 2002, 27(6): 659-665.
- [20] SEEWALD J S. Organic-inorganic interactions in petroleum-producing sedimentary basins[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 327-333.
- [21] 刘全有,朱东亚,孟庆强,等.深部流体及有机-无机相互作用下油气形成的基本内涵[J]. *中国科学:地球科学*, 2019, 49(3): 499-520.  
LIU Quanyou, ZHU Dongya, MENG Qingqiang, et al. The scientific connotation of oil and gas formations under deep fluids and organic-inorganic interaction[J]. *Science China Earth Sciences*, 2019, 49(3): 499-520.
- [22] HOERING T C. Thermal reactions of kerogen with added water, heavy water and pure organic substances[J]. *Organic Geochemistry*, 1984, 5(4): 267-278.
- [23] HE Kun, ZHANG Shuichang, MI Jingkui, et al. Pyrolysis involving n-hexadecane, water and minerals: insight into the mechanisms and isotope fractionation for water-hydrocarbon reaction[J]. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 2018, 130: 198-208.
- [24] 汪泽成,施亦做,文龙,等.用超级盆地思维挖掘四川盆地油气资源潜力的探讨[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(5): 847-858.  
WANG Zecheng, SHI Yizuo, WEN Long, et al. Exploring the potential of oil and gas resources in Sichuan Basin with super basin thinking[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(5): 847-858.
- [25] 杨雨,汪泽成,文龙,等.扬子克拉通西北缘震旦系油气成藏条件及勘探潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2022, 49(2): 238-248.  
YANG Yu, WANG Zecheng, WEN Long, et al. Sinian hydrocarbon accumulation conditions and exploration potential at the northwest margin of the Yangtze region, China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 238-248.
- [26] 李剑,郝爱胜,齐雪宁,等.中国西北地区侏罗系煤成气地球化学特征与勘探潜力[J]. *天然气地球科学*, 2019, 30(6): 866-879.  
LI Jian, HAO Aisheng, QI Xuening, et al. Geochemical characteristics and exploration potential of Jurassic coal-formed gas in Northwest China[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2019, 30(6): 866-879.
- [27] 赵文智,王红军,单家增,等.库车坳陷天然气高效成藏过程分析[J]. *石油与天然气地质*, 2005, 26(6): 703-710.  
ZHAO Wenzhi, WANG Hongjun, SHAN Jiazeng, et al. Analysis of highly efficient gas reservoiring process in Kuqa depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2005, 26(6): 703-710.
- [28] 赵文智,王兆云,汪泽成,等.高效气源灶及其对形成高效气藏的作用[J]. *沉积学报*, 2005, 23(4): 709-718.  
ZHAO Wenzhi, WANG Zhaoyun, WANG Zecheng, et al. Concept, connotation and evaluation index of high effective gas source kitchen and its action to the formation of high effective gas pool[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(4): 709-718.
- [29] 何治亮,张军涛,丁茜,等.深层-超深层优质碳酸盐岩储层形成控制因素[J]. *石油与天然气地质*, 2017, 38(4): 633-644.  
HE Zhiliang, ZHANG Juntao, DING Qian, et al. Factors controlling the formation of high-quality deep to ultra-deep carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2017, 38(4): 633-644.
- [30] 赵文智,沈安江,胡素云,等.中国碳酸盐岩储集层大型化发育的地质条件与分布特征[J]. *石油勘探与开发*, 2012, 39(1): 1-12.  
ZHAO Wenzhi, SHEN Anjiang, HU Suyun, et al. Geological conditions and distributional features of large-scale carbonate reservoirs onshore China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(1): 1-12.
- [31] 沈安江,赵文智,胡安平,等.海相碳酸盐岩储集层发育主控因素[J]. *石油勘探与开发*, 2015, 42(5): 545-554.  
SHEN Anjiang, ZHAO Wenzhi, HU Anping, et al. Major factors controlling the development of marine carbonate reservoirs[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2015, 42(5): 545-554.
- [32] 汪泽成,赵文智,胡素云,等.克拉通盆地构造分异对大油气田形成的控制作用——以四川盆地震旦系—三叠系为例[J]. *天然气工业*, 2017, 37(1): 9-23.  
WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, HU Suyun, et al. Control of tectonic differentiation on the formation of large oil and gas fields in craton basins: a case study of Sinian-Triassic of the Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(1): 9-23.
- [33] 汪泽成,赵文智,黄士鹏,等.中国小克拉通构造分异与古老海相碳酸盐岩油气富集规律[J]. *地质学报*, 2023, 97(9): 2842-2857.  
WANG Zecheng, ZHAO Wenzhi, HUANG Shipeng, et al. Structural differentiation of China's small-craton and hydrocarbon enrichment of ancient marine carbonate reservoirs[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(9): 2842-2857.
- [34] 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.
- [35] 操应长,远光辉,杨海军,等.含油气盆地深层—超深层碎屑岩油气勘探现状与优质储层成因研究进展[J]. *石油学报*, 2022, 43(1):

- 112-140.  
CAO Yingchang, YUAN Guanghui, YANG Haijun, et al. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2022, 43(1): 112-140.
- [36] 张锐锋, 何海清, 陈树光, 等. 河套盆地临河坳陷石油地质新认识与重大发现[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(6): 1-12.  
ZHANG Ruifeng, HE Haiqing, CHEN Shuguang, et al. New understandings of petroleum geology and great discovery in the Linhe depression, Hetao Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(6): 1-12.
- [37] 赵文智, 王红军, 单家增, 等. 克拉2气田高效成藏中构造抽吸作用的地质分析与物理模拟[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(12): 1084-1091.  
ZHAO Wenzhi, WANG Hongjun, SHAN Jiazeng, et al. Geological analysis and physical modeling of structural pumping in high effective formation of Kela 2 gas field[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 49(10): 1070-1078.
- [38] 魏国齐, 王俊鹏, 曾联波, 等. 克拉苏构造带盐下超深层储层的构造改造作用与油气勘探新发现[J]. *天然气工业*, 2020, 40(1): 20-30.  
WEI Guoqi, WANG Junpeng, ZENG Lianbo, et al. Structural reworking effects and new exploration discoveries of subsalt ultra-deep reservoirs in the Kelasu tectonic zone[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(1): 20-30.
- [39] 王招明, 李勇, 谢会文, 等. 库车前陆盆地超深层大油气田形成的地质认识[J]. *中国石油勘探*, 2016, 21(1): 37-43.  
WANG Zhaoming, LI Yong, XIE Huiwen, et al. Geological understanding on the formation of large-scale ultra-deep oil-gas field in Kuqa Foreland Basin[J]. *China Petroleum Exploration*, 2016, 21(1): 37-43.
- [40] 曾庆鲁, 莫涛, 赵继龙, 等. 7000 m 以深优质砂岩储层的特征、成因机制及油气勘探意义——以库车坳陷下白垩统巴什基奇克组为例[J]. *天然气工业*, 2020, 40(1): 38-47.  
ZENG Qinglu, MO Tao, ZHAO Jilong, et al. Characteristics, genetic mechanism and oil & gas exploration significance of high-quality sandstone reservoirs deeper than 7000m: a case study of the Bashijiqike Formation of Lower Cretaceous in the Kuqa depression[J]. *Natural Gas Industry*, 40(1): 38-47.
- [41] 白晓哈, 郝国丽, 单玄龙, 等. 松辽盆地中央隆起带变质岩潜山储层发育模式[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2020, 35(3): 28-38.  
BAI Xiaohan, HAO Guoli, SHAN Xuanlong, et al. Developmental pattern of metamorphic rock burial hill reservoirs in central uplift of Songliao Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyu University (Natural Science Edition)*, 2020, 35(3): 28-38.
- [42] 龚再升. 继续勘探中国近海盆地花岗岩储层油气藏[J]. *中国海上油气*, 2010, 22(4): 213-220.  
GONG Zaisheng. Continued exploration of granitic-reservoir hydrocarbon accumulations in China offshore basins[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2010, 22(4): 213-220.
- [43] 孟卫工, 李晓光, 刘宝鸿. 辽河坳陷变质岩古潜山内幕油藏形成主控因素分析[J]. *石油与天然气地质*, 2007, 28(5): 584-589.  
MENG Weigong, LI Xiaoguang, LIU Baohong. Main factors controlling the formation of interior reservoirs in the metamorphic palaeo-buried hills of the Liaohe depression[J]. *Oil & Gas Geology*, 2007, 28(5): 584-589.
- [44] 罗伟, 蔡俊杰, 万琼华, 等. 惠州凹陷花岗岩潜山储层条件分析及石油地质意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(4): 126-135.  
LUO Wei, CAI Junjie, WAN Qionghua, et al. Reservoir condition analysis of a buried granite hill in the Huizhou depression and its petroleum geological significance[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(4): 126-135.
- [45] 程奇, 刘宗宾, 王建立, 等. 变质岩潜山储层结构及其生产动态响应——以渤海锦州 25-1 南油田为例[J]. *东北石油大学学报*, 2022, 46(1): 26-35.  
CHENG Qi, LIU Zongbin, WANG Jianli, et al. Reservoir structure and production dynamic response of metamorphic buried hill: taking JZ25-1S oilfield in Bohai Sea as an example[J]. *Journal of Northeast Petroleum University*, 2022, 46(1): 26-35.
- [46] 刘震, 朱茂林, 刘惠民, 等. 花岗岩风化壳储层形成机理及分布特征——以东营凹陷北带西段为例[J]. *石油学报*, 2021, 42(2): 163-175.  
LIU Zhen, ZHU Maolin, LIU Huimin, et al. Formation mechanism and distribution characteristics of granitic weathering crust reservoir: a case study of the western segment of the northern belt of Dongying sag[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(2): 163-175.
- [47] 巨银娟, 张小莉, 李亚军, 等. 柴达木盆地昆北地区花岗岩储集性影响因素[J]. *西安科技大学学报*, 2018, 38(6): 982-989.  
JU Yinjuan, ZHANG Xiaoli, LI Yajun, et al. Geological influential factors of bedrock reservoir in the North-Kunlun faults zone, Qaidam Basin[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2018, 38(6): 982-989.
- [48] 陈树光, 朱庆忠, 张锐锋, 等. 河套盆地吉兰泰构造带形成演化及控藏作用[J]. *成都理工大学学报: 自然科学版*, 2022, 49(5): 533-541.  
CHEN Shuguang, ZHU Qingzhong, ZHANG Ruifeng, et al. Formation and evolution of Jilantai structural belt in Hetao Basin and its role in reservoir control[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2022, 49(5): 533-541.
- [49] 王盛亮, 吴晨林, 王标. 河套盆地吉兰泰地区固阳组烃源岩测井评价[J]. *能源与环保*, 2021, 43(5): 119-126.  
WANG Shengliang, WU Chenlin, WANG Biao. Logging evaluation of source rocks of Guyang Formation in Jilantai area, Hetao Basin[J]. *China Energy and Environmental Protection*, 2021, 43(5): 119-126.

(收稿日期 2023-09-21 改回日期 2023-10-19 编辑 肖飞)