

引用本文:金晓辉,孟庆强,孙冬胜,等. 万米钻探工程的石油地质理论依据与勘探方向[J]. 石油实验地质, 2023, 45(5): 973-981. DOI: 10.11781/sydz202305973.

JIN Xiaohui, MENG Qingqiang, SUN Dongsheng, et al. Basis of petroleum geological theory and exploration direction for ultra-deep exploration of 10 000-meter depth[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(5): 973-981. DOI: 10.11781/sydz202305973.

万米钻探工程的石油地质理论依据与勘探方向

金晓辉¹, 孟庆强^{1,2}, 孙冬胜¹, 田金强³, 梁世友⁴, 李 强²

1. 中国石化 石油勘探开发研究院, 北京 102206;

2. 山东科技大学, 山东 青岛 266590;

3. 中国石油大学(华东), 山东 青岛 266555;

4. 中国石化 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214126

摘要:油气资源是关系着我国经济发展的重要战略资源。我国陆上主力油田经过 50 余年开采, 油田含水率已超 90%。我国石油和天然气对外依存度已分别由 2013 年的 58.9% 和 29.2% 提高到 2022 年的 71.2% 和 40.2%, 已进入石油安全警戒线, 影响国家安全。为了寻找更多接替储量, 油气勘探向“更深、更复杂”超深层的万米勘探新领域推进, 近期国内油公司相继实施了“深海一号”、“深地一号”油气勘探计划, 探索实践了智能钻井新技术, 推动了万米勘探计划的实施, 9 000 m 以深的井也发现了油气藏。通过近期的勘探实践, 从超深层成烃、成储与成藏机理等方面, 论证了万米钻探的石油地质理论依据, 指出超深层具有多途径生烃, 已经突破 120~160 °C 的生烃门限; “三元控储”理论指出, 大于 4 500 m 的深层、超深层仍发育有效的储集体; 多期成藏与保持是超深层规模油气藏发育的有利条件。四川盆地海相深层资源总量约为 15.22×10^{12} m³, 其绵长裂陷槽周缘震旦系、川中古隆起周缘龙王庙组、城口海槽南侧米仓山—大巴山地区龙王庙组、川西上古生界深层等具有千亿立方米的资源规模。塔里木海相深层总资源量约为 152.62×10^8 t 油当量, 其中塔北隆起、塔中隆起、麦盖提斜坡的中下奥陶统岩溶以及满加尔西缘中下寒武统台缘带、阿瓦提—顺托果勒中下寒武统台内滩等是具有亿吨级规模的勘探领域。鄂尔多斯盆地西南缘的中新元古界近期也有重要的油气发现。准噶尔盆地准中深洼带、塔里木盆地库车坳陷深层等碎屑岩领域也是万米勘探的重要领域。

关键词:多途径生烃; 深层成储机理; 早成藏持续深埋; 万米勘探领域; 油气勘探

中图分类号: TE122

文献标识码: A

DOI: 10.11781/sydz202305973

Basis of petroleum geological theory and exploration direction for ultra-deep exploration of 10 000-meter depth

JIN Xiaohui¹, MENG Qingqiang^{1,2}, SUN Dongsheng¹, TIAN Jinqiang³, LIANG Shiyu⁴, LI Qiang²

1. SINOPEC Petroleum Exploration and Product Research Institute, Beijing 102206, China;

2. Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China;

3. China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266555, China;

4. Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214126, China

Abstract: Oil and gas resources are of important strategic importance for China's economic development. After more than 50 years of mining in main oil fields, the water cut of oil fields in China has exceeded 90%. China's external dependence on oil and natural gas has increased from 58.9% and 29.2% in 2013 to 71.2% and 40.2% in 2022 respectively, reaching the oil security warning line and impeding national security. In order to find more replacement reserves, oil and gas exploration has been promoted to the “deeper and more complicated” ultra-deep exploration area of 10 000-meter depth. Recently, domestic oil companies have successively implemented the “Deep Sea No. 1” and “Deep Earth No. 1” oil and gas exploration plans, which have explored and practiced new technologies of intelligent drilling and promoted the implementation of the 10 000-meter exploration plans, and reservoirs have been encountered by wells over 9 000 m deep. Based on recent exploration practice, this paper

收稿日期 (Received): 2023-07-20; 修订日期 (Revised): 2023-08-28; 出版日期 (Published): 2023-09-28.

作者简介: 金晓辉 (1964—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事油气成藏机理与区带评价研究。E-mail: jinxh.syky@sinopec.com.

通信作者: 孟庆强 (1978—), 男, 博士, 高级工程师, 本刊青年编委, 从事成藏机理及油气地球化学研究。E-mail: mengqq.syky@sinopec.com.

基金项目: 中国科学院战略性先导研究“A”类项目(XDA14010406)和国家自然科学基金项目(42172168)联合资助。

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

demonstrates the basis of petroleum geological theory for exploration of 10 000-meter depth from the aspects of ultra-deep hydrocarbon generation, storage and accumulation mechanisms, and it suggests that multi-source hydrocarbon generation can be identified in ultra-deep strata and the hydrocarbon generation threshold has exceeded 120–160 °C. The “three-element controlling reservoir” theory points out that deep and ultra-deep reservoirs can be developed at depths greater than 4 500 meters and multi-phase hydrocarbon accumulation and preservation constitute a favorable condition for the development of ultra-deep large-scale oil and gas reservoirs. The Sichuan Basin has the total resources of about $15.22 \times 10^{12} \text{ m}^3$ in deep marine strata, wherein the Sinian system on the margin of Mianyang–Changning taphrogenic trough, the Longwangmiao Formation on the margin of central Sichuan palaeo-uplift, the Longwangmiao Formation in Micang Mountain–Daba Mountain areas to the east of Chengkou oceanic trough, and the Upper Paleozoic in western Sichuan have a resource potential of more than hundreds of billions of cubic meters. The Tarim Basin has about 15.262×10^9 tons of equivalent oil in deep marine strata, wherein the Middle–Lower Ordovician karst area in the Tabei uplift, Tazhong uplift and Maigaiti slope, the Middle–Lower Cambrian platform marginal zone on the western margin of Manjiaer Sag, and the Middle and Lower Cambrian intraplatform shoal of Awat–Shuntuoguole are all oil potential areas of hundreds of millions of tons. There are important oil and gas discovery in the Middle Neoproterozoic in the southwest edge of Ordos Basin. Additionally, the field of clastic rocks such as the deep strata in the central deep depression zone in Junggar Basin and the Kuqa Depression in Tarim Basin are also important areas of exploration of 10 000-meter depth.

Key words: multi-source hydrocarbon generation; deep hydrocarbon storage mechanism; early-stage accumulation continuously deeply buried; field of exploration of 10 000-meter depth; oil and gas exploration

油气资源是事关国民经济和社会发展的关键战略性矿产资源,为保证我国油气能源安全,必须开辟新领域。我国石油和天然气对外依存度逐年攀升,从 2013 年的 58.9% 和 29.2% 攀升至 2022 年的 71.2% 和 40.2%,油气能源安全形势面临新挑战。经过 50 余年的开采,我国陆上油田含水率已超过 90%,增储上产挖潜难度较大,但深层—超深层蕴含着新的发展机会。新一轮资源评价结果,中国油气资源总量为 $1 257 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量,深层油气资源约占总量的 40%,其中超过 2/3 分布在四川、塔里木、鄂尔多斯盆地,待探明天然气主要分布在大于 4 500 m 的深层领域,其已成为我国油气工业持续发展、保障国家能源安全最现实和最重要的战略接替领域。1984 年 9 月,原地质矿产部西北石油局部署在塔克拉玛干沙漠北缘的沙参 2 井获高产油气流,实现了我国古生界海相碳酸盐岩油气的首次重大突破;1997 年沙 48 井喜获高产油气流,日产原油 500 t,发现了我国第一个古生界特大油田——塔河油田(探明储量 $14 \times 10^8 \text{ t}$),创建了碳酸盐岩油藏勘探开发理论及配套技术;2016 年发现了我国第一个超深层(7 500 m)碳酸盐岩断控储集体——顺北油田。塔深 5 井 9 017 m 首次于震旦系白云岩储层试获稳定的天然气流,最大产量为 $4.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$;顺北 56X 井保持亚洲第一深井纪录,最深钻井 9 300 m。2003 年普光 1 井喜获日产 $42 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产气流,实现了南方海相碳酸盐岩油气勘探战略性突破。2007 年 10 月,元坝 1 井喜获

日产 $50.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产气流,发现了全球首个超深层生物礁大气田——元坝气田。截至 2022 年 6 月,中国石化完成了 71 口超 8 000 m 的超深井钻井,创造了 5 次亚洲钻井垂深纪录、8 次超深水平井世界纪录,钻井深度迈入 9 000 m 大关(表 1),实现了由深井超深井到特深井的跨越,使我国超深井钻井技术走在了世界前列。

1 古老烃源岩特征及多元生烃机理

古生界—中新元古界地层是我国三大克拉通盆地深层油气勘探的主要目标层系之一。岩相古地理重建表明,深层优质烃源岩层均发育在三大克拉通盆地跨纪转折期,具多板块等时性,新元古代冰期/间冰期大量营养物质注入导致海洋初级生产勃发,深冰后期气候带和海底氧化环境以及洋流活动促进水体交换和营养物循环,早期的原核细菌可以作为古老烃源岩重要生烃母质(生烃时限略晚),由此奠定了深层油气资源的物质基础,基于旋回地层学和地球化学证据可计算中新元古代—寒武纪有机碳堆积的速率和堆积量^[1]。

传统的油气成因理论认为,温度和时间的累积作用控制着油气的形成^[2],油气以干酪根热降解/裂解为主,当地层温度超过 250 °C 时,干酪根绝大多数可以裂解的侧链或基团消失,几乎不产生任何烃类物质,从而进入生烃“死亡线”。但生烃动力学模拟结果表明,深层高温条件下存在多元多途径生烃过程。

表 1 我国典型深井钻井情况简表

Table 1 Brief situation of typical deep drilling wells in China

盆地	井号	构造位置	完钻井深/m	完钻层位
四川盆地	NJ1	龙女寺构造	6 011.6	前震旦系
	WT1	檀木场潜伏构造	8 060	南沱组
	SHY001-H6	龙门山构造带	9 010	二叠系栖霞组
	PT6	川中平缓断褶带	9 026	灯影组
	YB121H	九龙山背斜构造带	7 786	长兴组
	PSH6	川中古隆起北斜坡	9 040	灯影组二段
	YB13	九龙山背斜	7 192	茅口组
	YB28	元坝低缓构造带	7 065	吴家坪组
塔里木盆地	SHB3	顺托果勒低隆起	7 520~7 870	一间房组、鹰山组
	SHB 501	顺托果勒低隆起	8 360	一间房组、鹰山组
	SHB 5-5H	顺托果勒低隆起	8 520	一间房组、鹰山组
	SHB 55X	顺托果勒低隆起	8 725	一间房组、鹰山组
	SHB 53-2H	顺托果勒低隆起	8 662.96	一间房组、鹰山组
	TSH5	阿克库勒凸起	9 017	奇格布拉克组
	SHB56X	顺托果勒低隆起	9 300	一间房组、鹰山组
	LT1	阿克库勒凸起	8 882	肖尔布拉克组和沙依里克组组
	TSH1	阿克库勒凸起	8 048	蓬莱坝组
	SHB84X	顺托果勒低隆起	9 195	齐格布拉克组
	ZHSH1	塔中隆起	6 835	沙依里克组
CT1	古城隆起	7 280	上寒武统	

超深层深埋环境、高温和复杂流体条件导致油气成因复杂多样。除有机质热演化生烃外,早期生成的原油还存在二次裂解以及烃源岩二次生烃过程^[3]。同时,高温条件下油气藏中广泛的有机-无机相互作用对生烃母质具有“增烃”效果^[4]。

干酪根形成的液态烃或原油可作为深层生气的重要母质来源。源内液态烃和古油藏中原油的热裂解是深层气藏的主要生气途径。原油的热稳定性很大程度上决定了深层-超深层油气相态和资源类型。早期基于中浅层油气勘探建立的生烃模式认为,当 $R_o > 1.3\%$ 时进入湿气阶段, $R_o > 2.0\%$ 或温度大于 190 °C 时液态烃基本完全裂解,古油藏消失。但近年来超深层的油气勘探发现了越来越多的高温油藏或凝析油藏^[5-7], 预示液态烃保存的温度可能高于传统认知。这主要是由于原油的热稳定性和热裂解动力学特征很大程度上受控于其组成特征^[8-13]。超深层古油藏在经历长期高温深埋作用下,重组分不断向轻组分转化,经历凝析油气藏到湿气藏,再到干气藏的演化过程。基于模拟实验的原油热裂解动力学研究,揭示液态烃大量裂解的温度可达 190~220 °C^[12]。表明深层存在多途径复合生气模式^[4,14], 这为超深层古油藏稳定保存和原油裂解气规模生成的深度下限提供了重要的理论依据(图 1)。

受深部岩石圈结构和热导率影响,不同盆地的

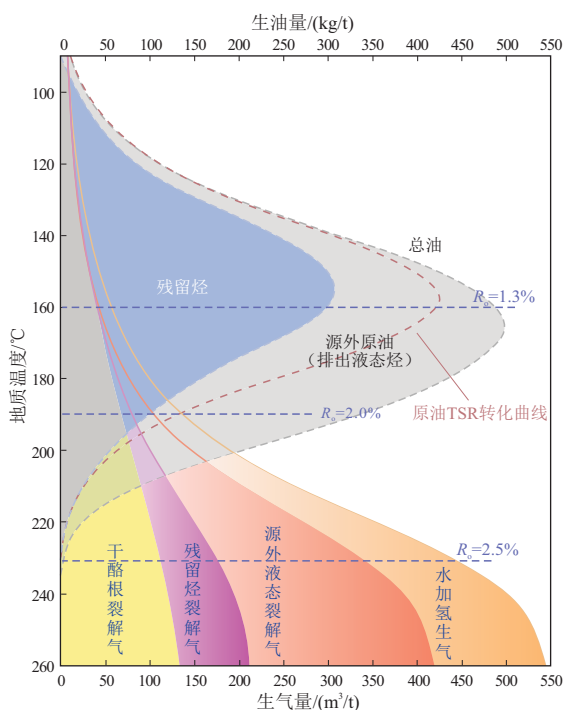


图 1 多途径复合生气模式

据参考文献[11]修改。

Fig.1 Multi-pathway gas generation mode

地温梯度存在明显差异,进而导致超深层油气类型截然不同(图 2)。部分古生代盆地(如塔里木盆地、南里海盆地)的地温梯度仅 12~22 °C/km, 6 000 m 以下埋深可能还处于“生油窗”温度范围

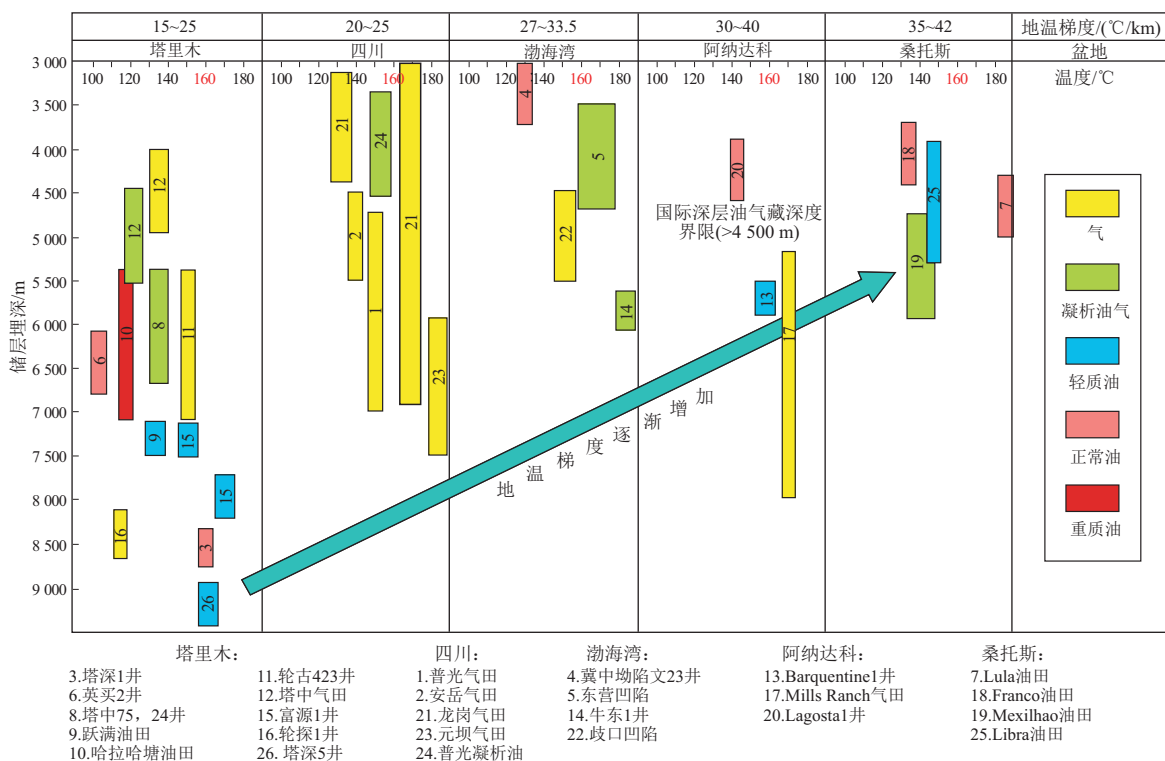


图 2 不同地区油气藏的地温梯度

Fig.2 Geothermal gradient of hydrocarbon reservoirs in different areas

(80~150 °C)内^[15]。塔里木盆地由于天山快速隆升和库车前陆盆地发育,上覆地层的重力负荷剧增,寒武系快速沉降深埋可超过千米。但独特的“低温高压”特征,使得千米埋深的地层温度甚至不超过190 °C,低于液态烃大量裂解的温度(190~220 °C),这造成塔里木盆地8000 m以深仍能保存大量液态烃(包括黑油、正常原油和凝析油气)。同时,盆地超深层的超压环境对液态烃的热裂解也能起到一定的抑制作用^[16],有利于深部油藏保存。塔里木盆地古油藏完全转化为气藏的深度可达10000 m,预示该深度以下的超深层仍具有潜在的规模原油裂解气资源。

四川盆地超深层温—压场表现为“高温高压”特征,地温梯度平均可达约26 °C/km^[15]。扬子板块与印度板块在晚三叠世开始汇聚碰撞,导致盆地地下古生界—震旦系在侏罗纪—白垩纪快速深埋达到7000~10000 m,对应地层温度达220~300 °C,远高于原油完全裂解温度,早期古油藏发生大规模原位裂解,形成干气藏。该时期的快速升温,使得超深层原油裂解持续时间短、生气速率高,从而形成超压聚集的古油藏裂解气,比如川中安岳气田龙王庙组天然气。此外,硫酸盐还原作用(TSR)也是四川盆地超深层原油大规模裂解生气并高效聚集(如普光气田)的重要途径之一。TSR作用可降低

原油裂解温度20~30 °C,促进高含H₂S的油型裂解气快速生成^[17]。

模拟实验证明,富氢流体在高温条件下可作为有机质生烃的重要外部氢源^[18],在超深层高温条件下,水或水源H₂可通过与有机质的加氢反应,快速参与有机质或烃类的裂解生气,提高天然气产率^[19]。模拟实验和同位素分馏模型计算发现,富氢流体—有机质相互作用的加氢生气作用对超深层天然气的贡献量可达20%~30%^[20~21]。这种外部氢源参与的加氢作用,使得有机成因天然气生气下限可延伸至R₀=3.5%。在更深部的超基性岩体中,蛇纹石化来源或幔源的H₂在250~300 °C时,可与无机碳发生费托反应生成无机气,从而作为超深层一种潜在的生气途径^[22~23]。

因此,超深层的构造埋深过程、温压场和特殊化学作用决定了油气赋存深度和资源类型。机理研究揭示,超深层存在多途径生气特征(图1)。原油较高的热稳定性和深部富氢流体参与的加氢生气作用,导致天然气生成的温度和成熟度下限明显下延,预示我国克拉通盆地超深层具有大规模油气资源。

2 深埋藏过程中储集空间保持机理

早期国外学者研究认为随埋藏深度增加和时代变老,储层孔隙度逐渐降低,对深层是否存在具有

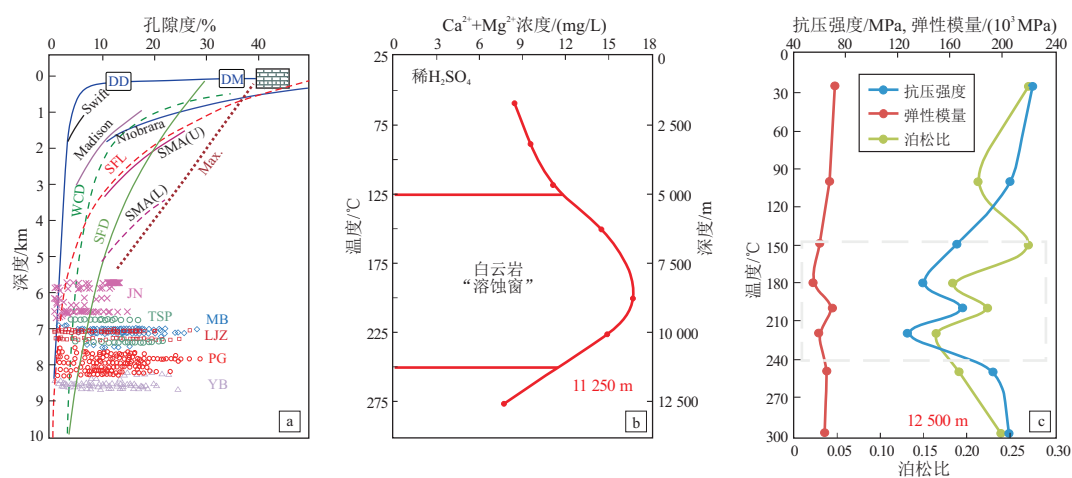


图3 深层碳酸盐岩储层物性及岩石物性变化示意

a.不同储层孔隙度随埋深变化,数据据文献[26],MB为毛坝,LJZ为罗家寨,PG为普光,YB为元坝,JN为建南,TSP为铁山坪;b.白云岩溶蚀实验离子浓度变化示意,数据据文献[27];c.岩石力学性质随深度变化示意,数据据文献[28]。

Fig.3 Sketch map of reservoir physical property and rock physical property changes for deep carbonate reservoirs

商业价值的储层持怀疑态度^[24-25]。近年来在塔里木盆地的塔深1、轮探1、塔深5、顺北10X、顺北84X、博孜9井以及四川盆地的元坝1、川科1、川深1、元深1、角探1等超过7000m的探井中,分别钻遇了有利储层发育段,并获得油气发现,突破了国外学者6000m埋深难以发育商业性储层的认识(图3a)。

“十二五”期间,基于普光气田上二叠统长兴组和下三叠统飞仙关组优质碳酸盐岩储层的勘探开发实践,提出沉积—成岩环境控制早期孔隙发育,构造—压力耦合控制裂缝形成,流体—岩石相互作用控制深部溶蚀与孔隙保存的认识,形成了“三元控储”碳酸盐岩储层成因模式^[26],揭示超深层生物礁优质储层发育机理。认识到元坝地区埋深7000m发育台缘礁滩有利储层,2006年以长兴组大型生物礁滩为勘探对象,部署实施元坝1井,2007年10月,元坝1井喜获日产 $50.3 \times 10^4 \text{ m}^3$ 高产气流,发现了全球首个超深层生物礁大气田——元坝气田。

碳酸盐岩溶蚀实验发现,白云岩在埋深5000~11000m的流体中 $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ 浓度有增大现象,存在“溶蚀窗效应”(图3b),稀硫酸溶蚀白云岩溶蚀窗的下线可超过10km^[27]。岩石力学和温度的变化关系(图3c)研究也表明,在这一深度段岩石抗压强度、泊松比、弹性模量也发生反转,表明储层物性变好^[28]。

深埋藏过程优势相带和后期改造(表生岩溶、生烃溶蚀、断裂—热液改造等)是超深层储集空间保持的关键要素。深埋藏过程中油/沥青、天然气充注,抑制次生矿物胶结,高 H_2S 和 CO_2 使地层水

处于酸性环境,碳酸盐胶结矿物难以沉淀,两者共同作用促使储集空间长期保持。

在塔里木探区,勘探领域从早期的风化壳岩溶储层到层间岩溶、断溶体岩溶新类型的发现,推动了勘探领域不断向万米接近。断溶体岩溶是受走滑断裂控制的一种特殊储层(图4),塔河油田位于塔里木盆地北部阿克库勒凸起的南部斜坡区,奥陶系先后经历了加里东中期、海西期、印支期—燕山期及喜马拉雅期等多期构造运动,形成了一系列不同级别、多期叠加、规模不等的断裂系统,其中加里东中晚期—海西早期及海西晚期构造运动对断裂的发育影响最大^[29]。数十年的开发实践证明,塔河油田深大断裂带不仅对油气聚集成藏具有明显的控制作用,而且深断裂体系及伴生的挤压褶皱、冲断和扭动变形等地质体,在经历加里东期—海西早期长期岩溶作用的叠加改造后,形成了形态多样的岩溶缝洞体系,表现为大规模的地下古洞穴和古喀斯特溶蚀地貌。不同尺度的断裂体系除了与常规砂岩油藏的断裂控储控藏作用具有异曲同工之外,更为特殊的意义在于,塔河油田覆盖区中一下奥陶统碳酸盐岩中的深大断裂体系,经加里东期和海西期等多期岩溶作用改造后,沿这些深大断裂带溶蚀形成形态各异、尺度差异明显的柱状溶蚀孔缝及大型洞穴等储集空间,构成缝洞型油藏重要的一类油气储集空间。顺北油藏解剖表明,走滑断裂控储,主要储集空间为洞穴、孔洞、裂缝,裂缝横向宽度可达200~800m,纵深300~600m(图4)。

3 超深层油气具有独特的成藏模式

深层储层的定义不尽相同,有的学者认为埋深

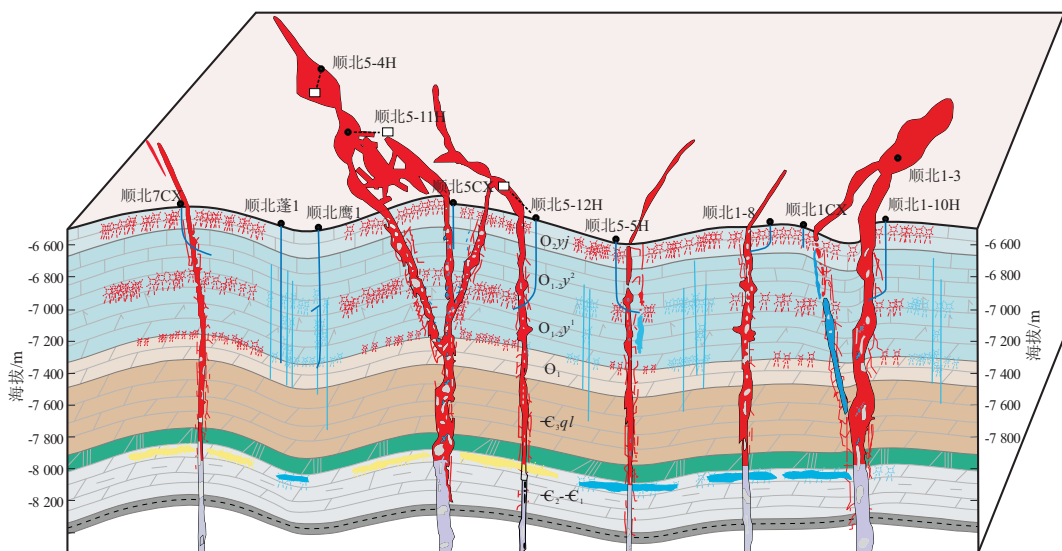


图 4 塔里木盆地顺北走滑断裂与储层成因模式
修改自文献[27]。

Fig.4 Mechanism of strike-slip faults and reservoir formation in northern Shuntuoguole area, Tarim Basin

介于 3 500~4 000 m 的储层为深层储层;美国地质调查局及中华人民共和国国土资源部等机构认为埋深超过 4 500 m 为深层储层,埋深超 6 000 m 为超深层储层^[30]。

现今深埋在 6 000 m 以深的油气藏的油气成藏模式关系到勘探评价和部署研究方向。统计分析的国内外 11 个盆地、18 个典型油气藏的生烃史(表 2)表明:除塔里木盆地 S74 井、二叠盆地 War-Wink 井、坎波斯盆地 RJS-117 井等 5 口井外,13 个典型油气藏(或者井)主生烃期的埋深均小于 4 500 m,但现今这些井的埋深均大于 6 000 m,这表明,这些油气藏是烃源岩早期生烃之后,随后构造运动调整至现今成藏位置。其中,阿纳达科盆地西部前渊区上泥盆统 Woodford 烃源岩主生烃期埋深 2 500 m,其气藏现今埋深 11 500 m,调整埋深高达 9 000 m;与之类似,塔河油田 TS5 井寒武系玉尔吐斯组主生烃期埋深 4 000 m,其气藏现今埋深 9 107 m,调整埋深 5 000 余 m。前人研究也表明,国内外典型深层油气藏的成藏期埋深均小于 5 000 m,但部分干气藏的成藏埋深分布在 5 000~6 000 m 之间(图 5)。这充分证明,深层油藏是烃源岩在埋深相对较浅的早期生烃、随后调整至深层成藏;而深层气藏,由于原油及干酪根裂解生气的温度要求较高,其形成埋深一般较油藏深。因此,“早期成藏、后期调整改造”的成藏模式,应是指导深层油气勘探、降低深层油气发现风险的主要勘探策略。

我国四川、塔里木及鄂尔多斯盆地海相深层油气资源潜力巨大。四川盆地海相深层天然气资源总量约为 $15.22 \times 10^{12} \text{ m}^3$,其中深层筳竹寺组贡献

表 2 国内外部分重点地区深层主力烃源岩主生烃期埋深与现今埋深对比

Table 2 Comparison between burial depth of main source rocks in deep formations during main hydrocarbon generation period and current burial depth in some key regions in China and abroad

盆地/油田	井名/地区	烃源岩	主生烃期埋深/m	井深/m
扎格罗斯 Kuh-e-Mond 油田	MD-5	Kazhdumi 组	4 000	5 000
坎波斯盆地 外陆架区	RJS-117	下白垩统	4 500	6 000
南阿曼盐盆 AlNoor 油田		下寒武统 A4 层段	4 200	4 500
二叠盆地 特拉华次盆	War-Wink	中奥陶统 Simpson 群	4 500	6 500
阿纳达科 盆地	西部前渊区	泥盆系 Woodford 页岩	2 500	11 500
滨里海盆地 南部次盆	Tengiz 油田	泥盆系	4 500	6 500
墨西哥湾 南里海一 西土库曼斯坦	Hatters Pond	Smackover 页岩	3 750	4 700
		麦考普群	4 500	12 250
塔河油田	S74	寒武系 玉尔吐斯组	4 500	6 500
塔河油田	SN4	寒武系 玉尔吐斯组	3 500	6 700
塔河油田	艾丁 4	寒武系 玉尔吐斯组	2 500	6 000
顺北气田	SN5	寒武系 玉尔吐斯组	4 100	7 500
塔河油田	T55	寒武系 玉尔吐斯组	4 000	9 017
普光气田	普光 2	吴家坪组	4 000	7 500
元坝气田	元坝 2	吴家坪组	3 000	7 500
安岳气田	磨溪 8	筳竹寺组	2 500	5 800
四川盆地	马深 1	筳竹寺组	4 100	8 500
大牛地气田	大深 1	中奥陶统	3 540	4 300

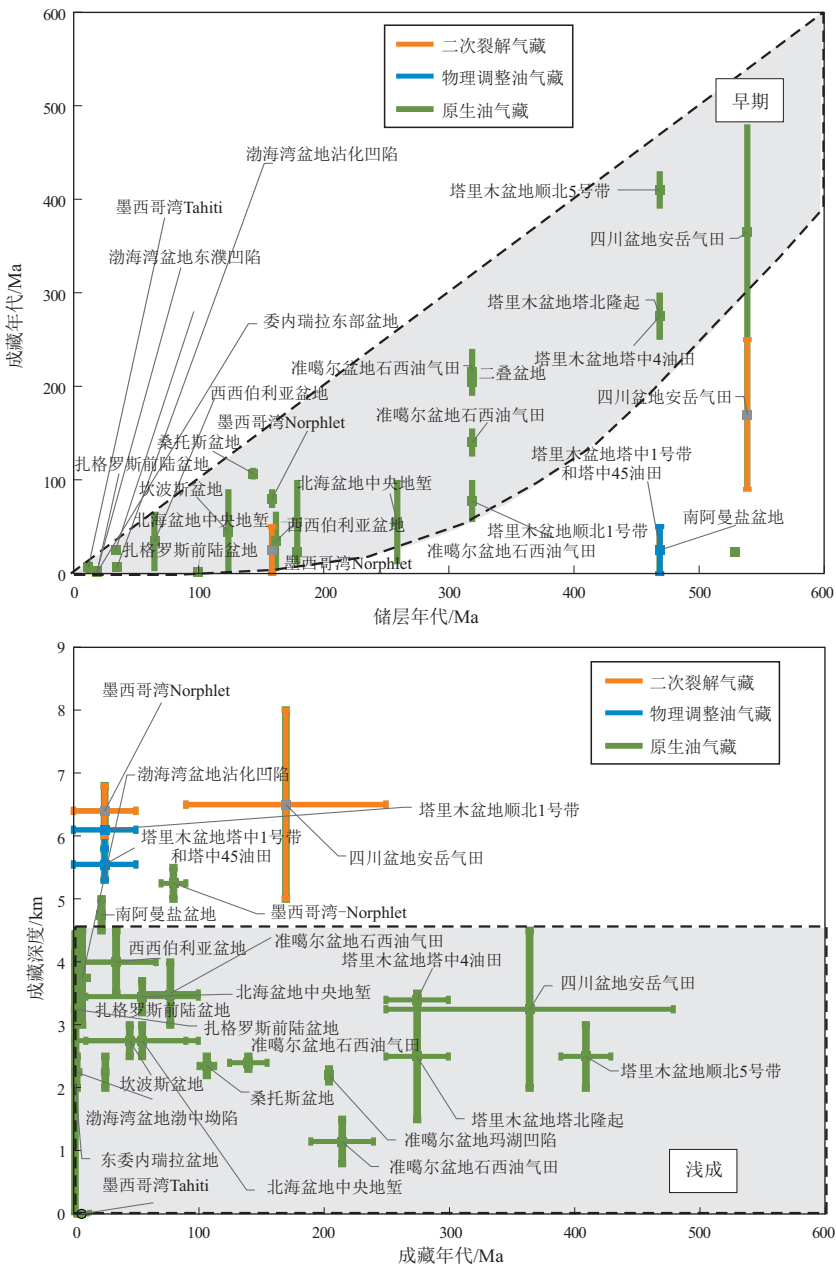


图5 国内外部分油气藏成藏期—埋深示意
修改自文献[31]。

Fig.5 Correlation between accumulation period and burial depth of some oil and gas reservoirs in China and abroad

资源量 $6.34 \times 10^{12} \text{ m}^3$, 占总资源量的 42%, 其中绵长裂陷槽周缘震旦系、川中古隆起周缘龙王庙组、城口海槽南侧米仓山—大巴山地区龙王庙组、川西上古生界深层等具有千亿立方米的资源规模; 塔里木盆地海相深层总资源量约为 $152.62 \times 10^8 \text{ t}$ 油当量(石油资源量为 $98.56 \times 10^8 \text{ t}$, 天然气资源量为 $5.41 \times 10^{12} \text{ m}^3$), 其中塔北隆起、塔中隆起、麦盖提斜坡中下奥陶统岩溶以及满加尔西缘中下寒武统台缘带、阿瓦提—顺托果勒中下寒武统台内滩等具有亿吨级规模的勘探领域。鄂尔多斯盆地西南缘的中新元古界近期也有重要的油气发现, 具备较好的

勘探潜力。另外准噶尔盆地准中深注带、塔里木盆地的库车凹陷深层等碎屑岩领域也是万米勘探的重要领域。

4 结论与建议

(1) 中国中西部四大盆地深层—超深层是未来万米油气勘探发现的重要领域, 近年来, 中国石化在塔里木、四川和准噶尔三大盆地超深层海相碳酸盐岩、碎屑岩等领域, 完成了一批超深井, 并取得了顺北、元坝等深层—超深层油气勘探重大突破, 对加快深层—超深层勘探开发具有重要推动作用。

(2)我国四川、塔里木及鄂尔多斯盆地海相深层油气资源潜力巨大,蕴含着超千亿立方米天然气和超百亿吨原油的资源量。四川盆地和鄂尔多斯盆地的中新元古界以及塔里木盆地的寒武系是未来深层-超深层油气资源主要发现阵地,应加强对这些盆地及领域的油气勘探开发力度。“早期成藏、后期调整改造”的成藏模式,应是未来深层油气勘探的主要指导策略。

(3)进一步强化基础研究,是降低海相深层油气勘探风险的关键所在。海相深层油气成藏过程复杂,地层温度压力条件变化大,油气相态变化复杂,因此,需要进一步加强基础研究,深化对深层油气形成及相态变化的认识,加强深部储层有效性动态演化评价,提高深层油气成藏及分布预测准确性,才能降低勘探风险,增强勘探成功率。

致谢:论文研究过程中参考引用了中国科学院战略性先导研究“A”类项目(XDA14010000)的部分研究成果,在此表示衷心感谢!匿名审稿专家给予了中肯、详细的修改建议,使本文增色很多,在此表示感谢!

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献/Authors' Contributions

金晓辉统筹全文,完成初稿;孟庆强完成国内外深层油气案例分析,完成论文修改;孙冬胜参与深层油气成藏机理研究;田金强分析了深层油气成藏要素之间的关系;梁世友计算了深层油气资源量;李强参与论文写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。

JIN Xiaohui coordinated the entire text and completed the first draft. MENG Qingqiang completed a case study of deep oil and gas at home and abroad, and revised the paper. SUN Dongsheng participated in the study of deep oil and gas reservoir formation mechanism. TIAN Jinqiang analyzed the relationship between deep oil and gas accumulation factors. LIANG Shiyu calculated the amount of deep oil and gas resources. LI Qiang participated in paper writing and revision. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

参考文献:

- [1] 张水昌,王建华,王晓梅,等.中元古代海洋生物碳泵:有机质来源、降解与富集[J].科学通报,2022,67(15):1624-1643.
ZHANG Shuichang, WANG Huajian, WANG Xiaomei, et al. Meso-proterozoic marine biological carbon pump: source, degradation, and enrichment of organic matter[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(15): 1624-1643.
- [2] TISSOT B P, WELTE D H. Petroleum formation and occurrence[M]. Berlin: Springer, 1984: 1-272.
- [3] 李慧莉,邵志兵,金之钧,等.多旋回盆地复杂生烃史条件下烃源岩生烃量研究[J].石油实验地质,2007,29(2):162-166.

LI Huili, SHAO Zhibing, JIN Zhijun, et al. Study on the hydrocarbon-generation amount under the complex geological history in the poly-cyclic basin[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2007, 29(2): 162-166.

- [4] 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.
- [5] 孙龙德,邹才能,朱如凯,等.中国深层油气形成、分布与潜力分析[J].石油勘探与开发,2013,40(6):641-649.
SUN Longde, ZOU Caineng, ZHU Rukai, et al. Formation, distribution and potential of deep hydrocarbon resources in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 641-649.
- [6] 赵贤正,金凤鸣,王权,等.中国东部超深超高温碳酸盐岩潜山油气藏的发现及关键技术:以渤海湾盆地冀中坳陷牛东1潜山油气藏为例[J].海相油气地质,2011,16(4):1-10.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Quan, et al. A super-deep and superhigh temperature carbonate buried-hill reservoir in Eastern China: discovery and the key exploration technology of Nudong-1 buried-hill oil and gas reservoir in Jizhong Depression, Bohaiwan Basin[J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2011, 16(4): 1-10.
- [7] 赵贤正,金凤鸣,王权,等.渤海湾盆地牛东1超深潜山高高温油气藏的发现及其意义[J].石油学报,2011,32(6):915-927.
ZHAO Xianzheng, JIN Fengming, WANG Quan, et al. Niudong 1 ultra-deep and ultra-high temperature subtle buried hill field in Bohai Bay Basin: discovery and significance[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 915-927.
- [8] HILL R J, TANG Yongchun, KAPLAN I R. Insights into oil cracking based on laboratory experiments[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34(12): 1651-1672.
- [9] BEHAR F, LORANT F, MAZEAS L. Elaboration of a new compositional kinetic schema for oil cracking[J]. Organic Geochemistry, 2008, 39(6): 764-782.
- [10] 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.
- [11] 何坤,张水昌,米敬奎.原油裂解的动力学及控制因素研究[J].天然气地球科学,2011,22(2):211-218.
HE Kun, ZHANG Shuichang, MI Jingkui. Research on the kinetics and controlling factors for oil cracking[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(2): 211-218.
- [12] 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.
- [13] 张水昌, 何坤, 王晓梅, 等. 深层多途径复合生气模式及潜在成藏贡献[J]. *天然气地球科学*, 2021, 32(10): 1421-1435. ZHANG Shuichang, HE Kun, WANG Xiaomei, et al. The multi-path gas generation model and its potential contribution to petroleum accumulation in deep formations[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 32(10): 1421-1435.
- [14] 孟庆强, 李京洲, 刘文汇, 等. 膏盐岩含量对成熟阶段页岩生气影响的模拟实验[J]. *特种油气藏*, 2022, 29(5): 113-118. MENG Qingqiang, LI Jingzhou, LIU Wenhui, et al. Simulation study on the effect of gypsum-salt content on hydrocarbon generation in mature stage shale[J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2022, 29(5): 113-118.
- [15] 任战利, 崔军平, 祁凯, 等. 深层、超深层温度及热演化历史对油气相态与生烃历史的控制作用[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 22-30. REN Zhanli, CUI Junping, QI Kai, et al. Control effects of temperature and thermal evolution history of deep and ultra-deep layers on hydrocarbon phase state and hydrocarbon generation history[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(2): 22-30.
- [16] 郝芳, 邹华耀, 倪建华, 等. 沉积盆地超压系统演化与深层油气成藏条件[J]. *地球科学(中国地质大学学报)*, 2002, 27(5): 610-615. HAO Fang, ZOU Huayao, NI Jianhua, et al. Evolution of over-pressured systems in sedimentary basins and conditions for deep oil/gas accumulation[J]. *Earth Science (Journal of China University of Geosciences)*, 2002, 27(5): 610-615.
- [17] LIU Quanyou, PENG Weilong, MENG Qingqiang, et al. Fractionation of carbon and hydrogen isotopes of TSR-altered gas products under closed system pyrolysis[J]. *Scientific Reports*, 2020, 10(1): 12921. doi: 10.1038/s41598-020-69580-0.
- [18] 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, 62(3): 507-528.
- [19] SEEWALD J S. Organic-inorganic interactions in petroleum-producing sedimentary basins[J]. *Nature*, 2003, 426(6964): 327-333.
- [20] ZHANG Shuichang, HE Kun, HU Guoyi, et al. Unique chemical and isotopic characteristics and origins of natural gases in the Paleozoic marine formations in the Sichuan Basin, SW China: isotope fractionation of deep and high mature carbonate reservoir gases[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2018, 89: 68-82.
- [21] 张水昌, 苏劲, 张斌, 等. 塔里木盆地深层海相轻质油/凝析油的成因机制与控制因素[J]. *石油学报*, 2021, 42(12): 1566-1580. ZHANG Shuichang, SU Jin, ZHANG Bin, et al. Genetic mechanism and controlling factors of deep marine light oil and condensate oil in Tarim Basin[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2021, 42(12): 1566-1580.
- [22] ZHANG Shuichang, MI Jingkui, HE Kun. Synthesis of hydrocarbon gases from four different carbon sources and hydrogen gas using a gold-tube system by Fischer-Tropsch method[J]. *Chemical Geology*, 2013, 349-350: 27-35.
- [23] 戴金星, 邹才能, 张水昌, 等. 无机成因和有机成因烷烃气的鉴别[J]. *中国科学(D辑)*, 2008, 38(11): 1329-1341. DAI Jinxing, ZOU Caineng, ZHANG Shuichang, et al. Identification of inorganic and organic alkane gases[J]. *Science in China (Series D)*, 2008, 38(11): 1329-1341.
- [24] EHRENBERG S N, NADEAU P H, STEEN Ø. Petroleum reservoir porosity versus depth: influence of geological age[J]. *AAPG Bulletin*, 2009, 93(10): 1281-1296.
- [25] EHRENBERG S N, WALDERHAUG O, BJØRLYKKE K. Carbonate porosity creation by mesogenetic dissolution: reality or illusion? [J]. *AAPG Bulletin*, 2012, 96(2): 217-233.
- [26] 马永生, 蔡勋育, 赵培荣. 深层、超深层碳酸盐岩油气储层形成机理研究综述[J]. *地学前缘*, 2011, 18(4): 181-192. MA Yongsheng, CAI Xunyu, ZHAO Peirong. The research status and advances in porosity evolution and diagenesis of deep carbonate reservoir[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(4): 181-192.
- [27] 何治亮, 魏修成, 钱一雄, 等. 海相碳酸盐岩优质储层形成机理与分布预测[J]. *石油与天然气地质*, 2011, 32(4): 489-498. HE Zhiliang, WEI Xiucheng, QIAN Yixiong, et al. Forming mechanism and distribution prediction of quality marine carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2011, 32(4): 489-498.
- [28] 陈军海, 王怡, 韩艳浓, 等. 一种利用岩石强度刻划试验确定岩石 PDC 钻头可钻性级值的方法[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2017, 41(2): 94-99. CHEN Junhai, WANG Yi, HAN Yannong, et al. A new method for assessing rock's drillability for PDC bits via a scratch testing[J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2017, 41(2): 94-99.
- [29] 康玉柱, 凌翔, 陈新华. 构造体系控油方式[J]. *新疆石油地质*, 2013, 34(4): 375-377. KANG Yuzhu, LING Xiang, CHEN Xinhua. Petroleum control patterns by structural systems[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2013, 34(4): 375-377.
- [30] 贾承造, 张水昌. 中国海相超深层油气形成[J/OL]. *地质学报*, 2023; 1-27. [2023-08-28]. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023201. JIA Chengzao, ZHANG Shuichang. Formation of marine ultra-deep oil and gas in China[J/OL]. *Acta Geologica Sinica*, 2023; 1-27. [2023-08-28]. DOI: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2023201.
- [31] HAO Fang. Enrichment mechanism and prospects of deep oil and gas[J]. *Acta Geologica Sinica (English Edition)*, 2022, 96(3): 742-756. DOI: 10.1111/1755-6724.14961.