

四川盆地川西坳陷三叠系盐下超深层油气成藏条件与勘探方向

李双建^{1,2}, 李智^{1,2}, 张磊¹, 李英强^{1,2}, 孟宪武³, 王海军³

(1. 中国石化石油勘探开发研究院, 北京 102206; 2. 中国石化深部地质与资源重点实验室, 北京 102206;
3. 中国石化西南油气分公司, 四川 成都 610041)

摘要:四川盆地川西坳陷三叠系盐下海相层系埋深普遍超过7 000 m, 油气勘探程度低, 但是油气基本成藏条件优越, 具有良好的勘探前景。依据最新的钻探成果和地震资料, 系统分析了川西坳陷超深层烃源岩、储层、构造变形样式和油气动态成藏匹配关系, 指出了有利勘探方向。研究认为: 川西坳陷超深层发育下寒武统筇竹寺组、中二叠统茅口组 and 上二叠统龙潭组3套区域烃源岩, 生烃强度均超过 $20 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$, 具有形成大、中型油气田的资源潜力。坳陷内发育震旦系灯影组台缘丘滩和二叠系栖霞组、茅口组颗粒滩白云岩储层, 受高能相带和多期岩溶作用控制, 具有规模性储集体成储基础。山前带推覆体下盘发育盐下准原地背斜构造, 山前坳陷带发育高陡断裂和走滑压扭构造, 形成了良好的油气圈闭。山前隐伏构造与坳陷内构造-岩性复合圈闭均形成于印支期, 与寒武系烃源岩主生烃期及基底断裂活动期具有良好的匹配关系, 具备油气早期成藏条件。综合评价认为坳陷内震旦系灯影组台缘带、与基底高陡断裂沟通的二叠系高能相带和山前带推覆体下盘原位构造是下一步勘探有利目标。

关键词: 筇竹寺组; 龙潭组; 灯影组; 栖霞组; 茅口组; 盐下深层; 成藏条件; 川西坳陷; 四川盆地

中图分类号: TE122.3

文献标识码: A

Hydrocarbon accumulation conditions and exploration targets of the Triassic subsalt ultra-deep sequences in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin

LI Shuangjian^{1,2}, LI Zhi^{1,2}, ZHANG Lei¹, LI Yingqiang^{1,2}, MENG Xianwu³, WANG Haijun³

(1. Petroleum Exploration and Production Research Institute, SINOPEC, Beijing 102206, China; 2. Key Laboratory of Geology and Resources in Deep Stratum, SINOPEC, Beijing 102206, China; 3. Southwest Oil and Gas Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The Triassic subsalt marine sequences in the western Sichuan Depression, with burial depths generally exceeding 7 000 m, have been subjected to limited oil and gas exploration. Nonetheless, these sequences boast superior conditions for hydrocarbon accumulation, showing great exploration potential. Based on the latest drilling and seismic data, we conduct a comprehensive analysis of the ultra-deep source rocks, reservoirs, and structural deformation styles, as well as their effect on dynamic hydrocarbon accumulation in the western Sichuan Depression. Accordingly, we delineate favorable exploration targets in the depression. The key findings of this study are as follows: (1) Three suites of regional source rocks, namely the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation, the Middle Permian Maokou Formation and the Upper Permian Longtan Formation, are developed in the ultra-deep layers of the western Sichuan Depression. Three suites exhibit hydrocarbon-generating intensities exceeding $2.0 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{km}^2$, enabling the western Sichuan Depression to have the resource potential to form large- or medium-sized oil and gas fields; (2) The depression hosts the platform-margin mound shoals of the Sinian Dengying Formation and the grain shoal dolomite reservoirs of the Permian Qixia and Maokou formations, which are influenced by high-energy facies tracts and multi-stage karstification. All these lay the foundation for the formation of large-scale reservoirs; (3) Subsalt, parautochthonous anticline structures are developed in the footwall of nappes in the piedmont zone. Meanwhile, highly-

收稿日期: 2023-07-20; 修回日期: 2023-10-20。

第一作者简介: 李双建(1978—), 男, 博士、研究员, 构造地质与盆地分析。E-mail: lishuangjian_syky@sinopec.com。

基金项目: 国家自然科学基金企业重点联合基金项目(U20B6001); 国家自然科学基金重点基金项目(92255302); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金项目(U19B6003)。

steep faults and strike-slip transpressional structures are found in the piedmont depressed zone. All these structures act as favorable traps for hydrocarbon accumulation; (4) The piedmont buried structures and the tectono-lithologic composite traps within the depression were both formed during the Indosinian, matching well with the main hydrocarbon-generating period of the Cambrian source rocks and the basement fault activity, suggesting favorable conditions for early hydrocarbon accumulation. As revealed by a comprehensive assessment, favorable targets for future oil and gas exploration in the western Sichuan Depression include the platform-margin zone of the Sinian Dengying Formation and the Permian high-energy facies tracts connected to highly-steep basement faults in the depression, as well as the autochthonous structures in the footwall of nappes in the piedmont zone.

Key words: Qiongzhusi Formation, Longtan Formation, Dengying Formation, Qixia Formation, Maokou Formation, subsalt deep sequence, accumulation condition, western Sichuan Depression, Sichuan Basin

引用格式:李双建,李智,张磊,等. 四川盆地川西坳陷三叠系盐下超深层油气成藏条件与勘探方向[J]. 石油与天然气地质, 2023, 44(6): 1555–1567.

DOI: 10. 11743/ogg20230617.

LI Shuangjian, LI Zhi, ZHANG Lei, et al. Hydrocarbon accumulation conditions and exploration targets of the Triassic subsalt ultra-deep sequences in the western Sichuan Depression, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2023, 44(6): 1555–1567. DOI: 10. 11743/ogg20230617.

随着中-浅层勘探开发程度不断提高,全球油气勘探向深层-超深层发展的趋势越来越明显^[1]。从钻井数量和油气勘探发现储量来看,中国是全球深层-超深层勘探最活跃的国家^[2]。中国深层-超深层油气勘探主战场在中西部盆地,其中四川盆地作为天然气最为富集的叠合盆地,勘探取得了大量成果,先后发现了普光、元坝、川西、安岳和蓬莱等一批深层-超深层海相大型碳酸盐岩气藏,探明储量达 $2.5 \times 10^{12} \text{ m}^3$ 。四川盆地 7 000 m 以深的超深层勘探领域主要分布在川西和川北山前坳陷带,这些地区油气藏历经多期次构造运动叠加,地质条件复杂,勘探成本高且难度大,明确规模优质烃源岩与储层的分布规律及油气藏动态保存过程是亟待解决的关键科学难题。

2010 年以前,川西坳陷三叠系盐下超深层油气勘探活动较少,仅于 1978 年在梓潼向斜老关庙构造钻探 GJ 井,完钻井深 7 175 m,茅口组获得 $4.88 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 工业气流^[3],此后该区的超深层勘探几乎处于停滞状态。直到 2014 年中国石油天然气集团有限公司在川西北双鱼石构造部署的 ST1 井,在二叠系栖霞组和茅口组获得工业突破,测试分别获气 $87.6 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $126.77 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ ^[4],迄今为止,获得天然气探明储量 $600 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。另外,川中蓬莱地区震旦系灯影组和茅口组也取得了勘探突破,获得了超千亿方的探明储量,显示该区发育多套有效的成藏组合,具有较大的勘探潜力。但是受山前带构造变形复杂和坳陷带埋藏深的影响,川西坳陷中部三叠系盐下的勘探至今仍处于摸索阶段,尚没有钻井针对盐下碳酸盐岩储层进行勘探,其主要原因是对该区资源潜力、规模性储层展布规律和油气圈闭类型认识不清。本文依据最新的钻井和地震资料,进

一步刻画川西坳陷超深层寒武系筇竹寺组、二叠系茅口组和龙潭组 3 套烃源岩的展布,并计算其生烃潜力;明确了震旦系灯影组、二叠系栖霞组和茅口组优质储层的成因与分布;分析了山前隐伏构造和坳陷基底断裂的构造样式和变形过程;在此基础上,通过烃源岩生烃、断裂输导、圈闭形成的匹配关系研究,指出了有利勘探方向,以期能为推动川西超深层油气勘探提供参考。

1 区域地质概况

川西坳陷位于四川盆地西部,呈 NE-SW 向展布,西以安县-都江堰断裂为界,东以龙泉山断裂为界,南以峨眉-荣经断裂为界,分别与龙门山冲断带、川中隆起和川滇构造带相接,北至米仓山前缘,面积约 $4 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。沿走向上龙门山冲断带和川西坳陷大致以卧龙-怀远、北川-安县一线为界划分为南、中、北 3 段(图 1a),本文重点讨论中段超深层油气地质特征与勘探潜力。

川西地区沉积了巨厚的震旦系-中三叠统海相沉积建造(图 1b),晚三叠世以来,受古特提斯洋和新特提斯洋闭合引起的一系列造山运动影响,该区由前期被动陆缘海相沉积进入前陆盆地陆相沉积,堆积了厚逾 5 000 m 的陆相碎屑岩^[5],经喜马拉雅运动后全面褶皱形成现今的构造挤压盆地格局。坳陷内沉积盖层总厚在 5 000 ~ 10 000 m,震旦系-中三叠统是海相碳酸盐岩沉积,厚度 4 000 ~ 7 000 m,其中下古生界发育不完整,缺少中、上寒武统一志留系沉积;上古生界泥盆系-石炭系在西北部残留,大部分地区缺失;二叠系发育完整。中生界中、下三叠统为连续的海相沉积,且发育厚层的膏盐岩,厚度 200 ~ 500 m,构成了

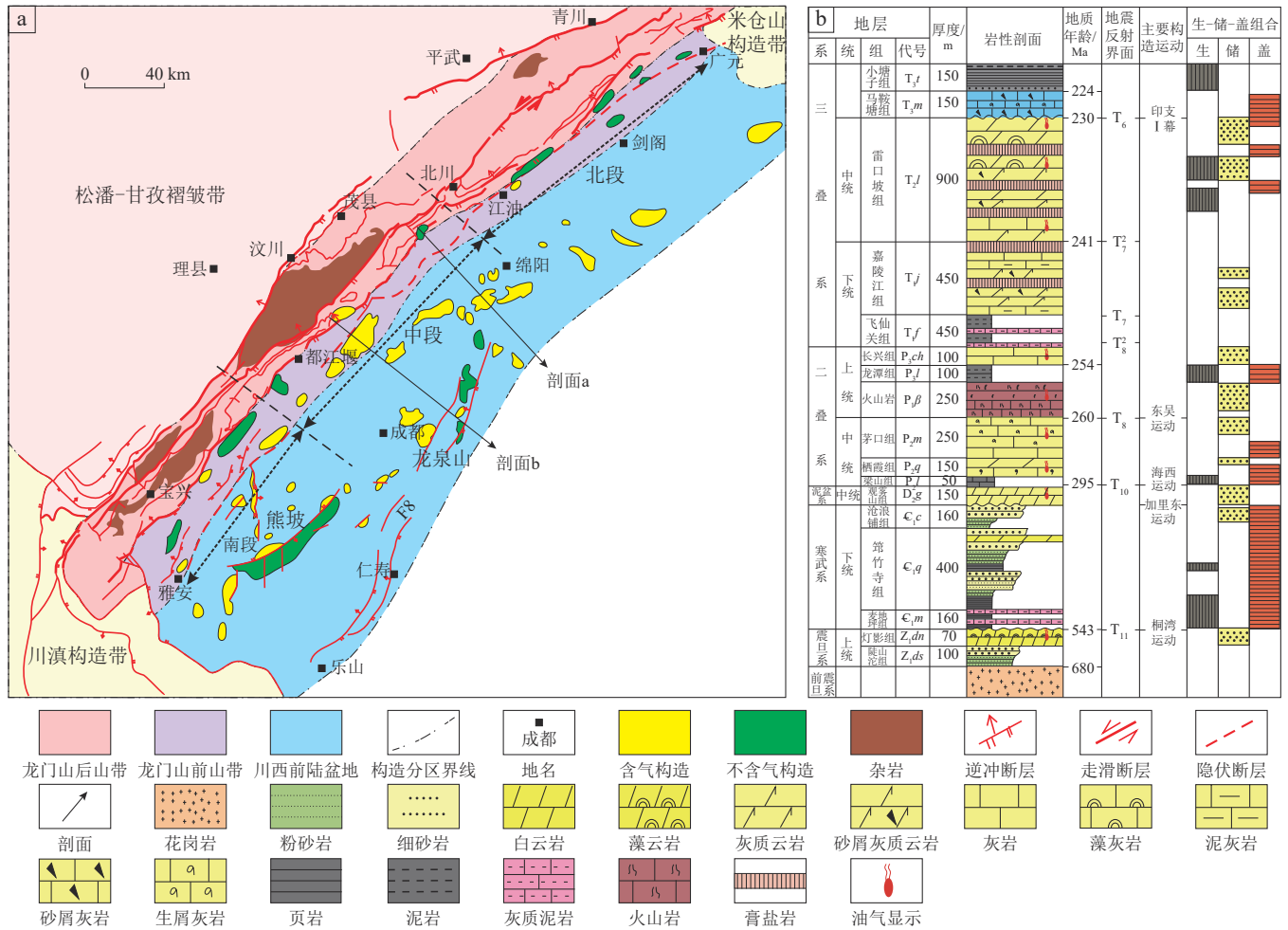


图1 川西坳陷龙门山前带造单元划分(a)与海相地层综合柱状图(b)

Fig. 1 Map showing the structural unit division (a) of the Longmen Mountains' piedmont zone, western Sichuan Depression, and the composite marine stratigraphic column (b)

优质的区域盖层;上三叠统须家河组是一套由海相过渡到陆相的沉积建造,以碎屑岩为主,厚度 250 ~ 3 000 m。侏罗系到新近系为陆相碎屑岩地层,厚度 2 000 ~ 4 000 m。

川西三叠系盐下超深层发育下寒武统筇竹寺组、中二叠统茅口组 and 上二叠统龙潭组 3 套烃源岩;发育震旦系灯影组、二叠系栖霞组和茅口组 3 套潜在优质储层。除了烃源岩层本身可以作为油气藏盖层以外,该区发育厚层的中、下三叠统膏盐岩盖层,形成优越的封盖条件。

2 烃源岩发育条件

2.1 寒武系

在绵阳-长宁拉张槽被发现之前,一度认为川西地区不发育寒武系烃源岩,这也是阻碍该区超深层勘

探的原因之一。随着绵阳-长宁拉张槽的发现及其范围的精细刻画,现今已经基本明确,川西坳陷超深层发育厚层深水陆棚相寒武系筇竹寺组页岩烃源岩^[6-9]。川西地区紧邻绵阳-长宁拉张槽,槽内下寒武统麦地坪组、筇竹寺组烃源岩极其发育,主要发育在寒武系筇竹寺组,干酪根类型为 I 型,烃源岩厚度在 0 ~ 200 m,由东向西逐渐减薄;有机碳含量(TOC)在 0.5 % ~ 4.0 %,向两侧逐渐降低(表 1)。野外露头江油平武剖面下寒武统泥质烃源岩镜质体反射率(R_o)为 2.68 %,什邡金河剖面下寒武统泥质烃源岩 R_o 为 1.18 % ~ 1.67 %,处于过成熟演化阶段。初步估算寒武系烃源岩生烃强度在 $20 \times 10^8 \sim 140 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$ (图 2a),具有较大的生烃潜力,是三叠系盐下海相层系主力烃源岩。

2.2 二叠系

川西地区在中二叠统茅口组和上二叠统龙潭组均发育碳酸盐岩和泥岩烃源岩。由于区内尚无钻井揭

表1 川西地区超深层烃源岩特征及地球化学参数

Table 1 Characteristics and geochemical parameters of ultra-deep source rocks in the western Sichuan Basin

层位	沉积环境	岩性	厚度/m	TOC/%	R_o /%	有机质类型	生烃强度/($10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$)
筇竹寺组	陆棚相	泥页岩	200~350	0.5~4.0	2.50~5.00	I型	60~140
茅口组	缓坡相	泥岩、石灰岩、泥灰岩	>50	0.6~2.0	2.00~4.75	I-II型	5~10
龙潭组	斜坡-陆棚相	泥岩	50~150	0.6~3.5	2.00~4.20	II ₁ 型	15~20

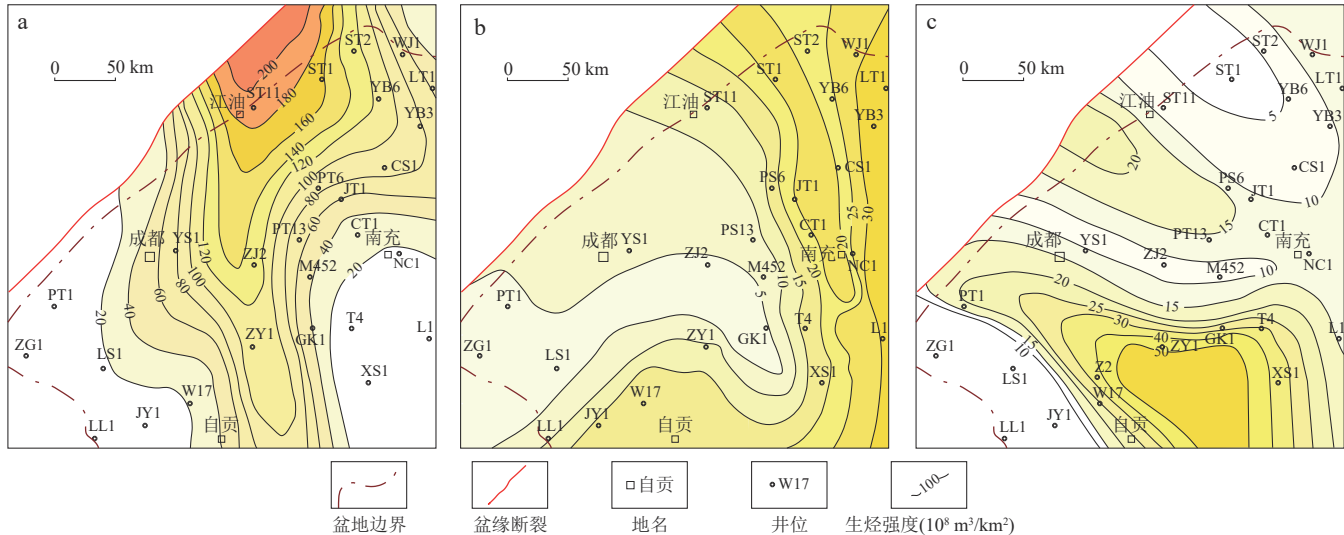


图2 川西地区烃源岩重点发育层系生烃强度等值线

Fig. 2 Contour maps depicting the hydrocarbon-generating intensities of major source rock intervals in the western Sichuan Basin

a. 下寒武统筇竹寺组; b. 中二叠统茅口组; c. 上二叠统龙潭组

示,利用地震资料又难以预测,因此对这两套烃源岩的评价主要依据野外露头 and 川中、川西北的钻井资料。

中二叠世茅口组沉积期,川西坳陷主体为碳酸盐缓坡沉积相区,碳酸盐岩烃源岩全区均有分布,平面上连片发育,分布稳定,厚度大,一般沉积厚度均超过50 m^[10]。受古地貌控制,有效烃源岩由南西向东北方向逐渐增厚,TOC呈现出同样的趋势,川西坳陷中部绵竹汉旺剖面TOC为0.43%~2.55%,10个样品平均值为1.83%,估算该套烃源岩的生烃强度为 $5\times 10^8\sim 30\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ (表1)(图2b),在川西坳陷中部主要为 $5\times 10^8\sim 10\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ ^[11]。

晚二叠世龙潭组沉积期,研究区沉积相带有所改变,东北部为盆地-台缘相区,在绵竹-南充一线为开阔台地相区,在大邑-资阳一线为混积潮坪-局限台地相区。碳酸盐岩烃源岩连片分布,沉积中心主体在川西的什邡金河及川中的武胜-渠县地区,分布范围大,一般沉积厚度均超过50 m,沉积中心的什邡-金河一线,有效烃源岩厚度超过150 m;武胜-渠县一带,有效烃源岩厚度超过150 m,均是烃源岩的重要分布地区。泥质烃源岩全区分布,烃源岩厚度一般在

10~20 m,厚度发育分布区在什邡-绵阳,有效烃源岩厚度大于20 m^[12]。干酪根类型为II₁型,估算该套烃源岩的生烃强度为 $5\times 10^8\sim 50\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$,在川西坳陷中部主要为 $10\times 10^8\sim 20\times 10^8\text{ m}^3/\text{km}^2$ (表1;图2c)。

3 储层发育条件

3.1 震旦系灯影组

四川盆地灯影组分布广泛,总体为一套碳酸盐岩沉积,是盆地范围内最古老的碳酸盐岩储集层,属于藻屑白云岩沉积,自下而上可以分4段,盆地内残余厚度300~1 200 m,灯影组储层分布在灯四段和灯二段。在绵阳-长宁拉张槽发现之前,整个四川盆地灯影组被认为是局限台地沉积^[13]。在绵阳-长宁拉张槽发现并确定之后,越来越多的学者认为,灯影组发育两期台缘丘滩^[14-17]。微生物岩丘滩和多期多级岩溶控制了灯影组优质储层的发育^[18-23]。

通过最新的三维地震资料,发现川西超深层发育拉张槽两侧灯二段台缘,东侧为知新场-中江-蓬莱台

缘,为近东西向断控台缘,东西向延伸远、南北向展布窄(图3a,c)。该台缘带PT1井在灯二段测试获得高产气流,揭示古隆起斜坡区灯二段具有岩性气藏独立成藏的特征。灯二段储层岩性主要为藻白云岩、颗粒白云岩,储集空间以溶蚀孔洞和粒间孔、粒间溶孔为主,通过周边钻井岩心68组测试数据的统计(图4),储层基质孔隙度为0.07%~4.99%(平均2.13%),基质渗透率为 $0.002 \times 10^{-3} \sim 1.98 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ (平均 $0.12 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$),属于典型的非均质、低孔-低渗型储

层^[24-25]。拉张槽西侧台缘的台缘带位于成都一大邑一带(图3b),与威远—资阳台缘带相连,自东向西台缘带由缓变陡,大邑地区表现为明显的陡坡台缘带,沿该台缘带钻探的Z1井和ZT1井也均揭示了藻丘滩叠加岩溶储层较为发育,属于孔洞-孔隙型储层^[26-27]。

3.2 二叠系栖霞组

栖霞组储层受川西龙门山古裂陷和加里东期古隆起联合控制,具有“一缘一带”分布特征(图5a),台

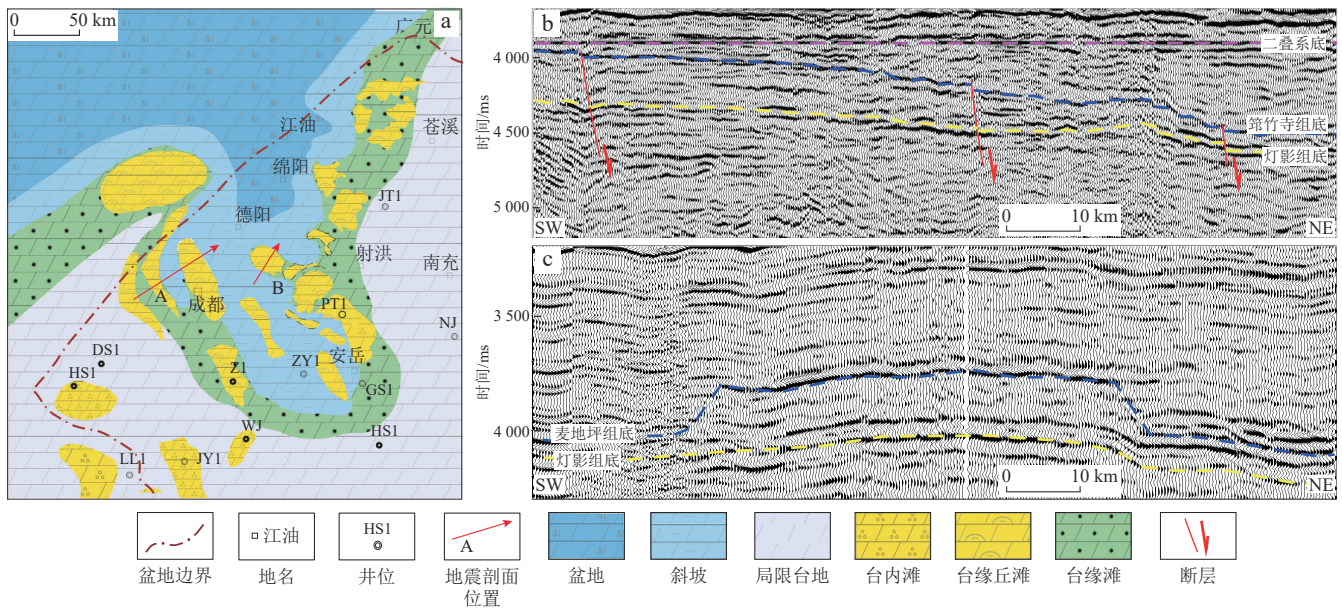


图3 川西地区震旦系灯影组二段岩相古地理与台缘带地震响应特征

Fig. 3 Lithofacies paleogeography and platform-margin zones' seismic response characteristics of the 2nd member of the Sinian Dengying Formation, western Sichuan Basin

a. 岩相古地理图; b. 剖面A台缘带地震响应; c. 剖面B台缘带地震响应

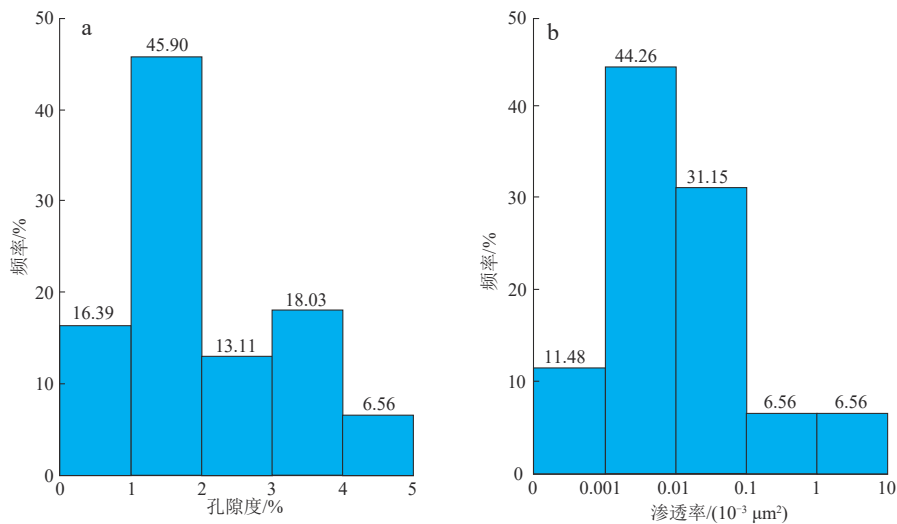


图4 川西地区震旦系灯影组二段储层孔隙度(a)和渗透率(b)分布频率直方图(68个样品)

Fig. 4 Frequency histograms of the porosity (a) and permeability (b) of reservoirs in the 2nd member of the Sinian Dengying Formation, western Sichuan Basin (68 samples)

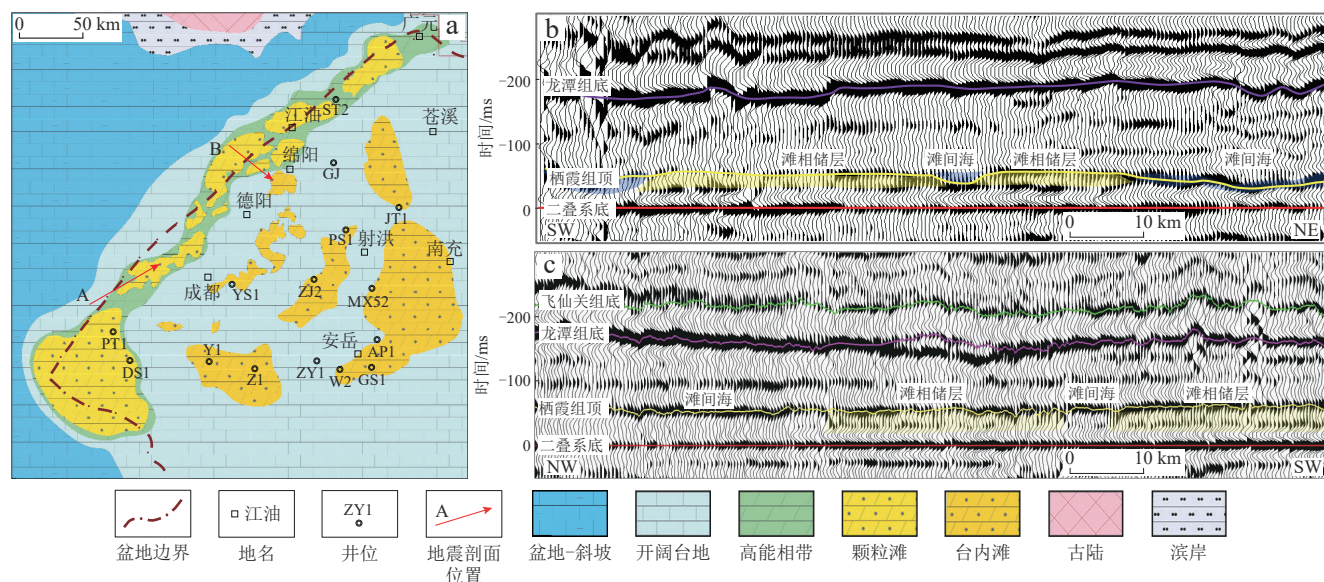


图5 川西地区二叠系栖霞组二段岩相古地理与储层地震响应特征

Fig. 5 Lithofacies paleogeography and reservoirs' seismic response characteristics of the 2nd member of the Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin

a. 岩相古地图; b. 剖面A颗粒滩地震响应; c. 剖面B颗粒滩地震响应
(透明颜色是剖面上滩相储层和滩间海的范围)

缘带颗粒滩白云岩主要发育在龙门山前缘带、广元西北乡-矿山梁及峨眉-瓦山前缘一带的生物滩区,厚度5~70 m;广元西北乡白云岩累计厚度达69 m,宝兴西大河厚度也达68 m,预测川西探区白云岩累计厚度大多在20~40 m^[28-30]。栖霞组储层岩性主要为藻屑、生屑灰岩、豹斑状白云质灰岩、豹斑状灰质白云岩以及结晶白云岩,川西坳陷中段的都江堰高川乡天池剖面栖霞组中上部主要为灰-浅灰色微晶白云岩与浅灰色灰质白云岩互层沉积,白云化作用较强。综合野外剖面 and ST1、PT1 等钻井实际资料分析,栖霞组发育层状孔隙型储层,主要储集空间类型为晶间(溶)孔、粒

间(溶)孔,还发育溶蚀缝洞、水力破裂扩溶缝洞和少量构造缝,55个样品统计,孔隙度范围0.86%~15.73%,平均为4.51%;渗透率范围 $0.04 \times 10^{-3} \sim 30.20 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,平均为 $3.43 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,总体为低孔-低渗型储层(图6)。

通过三维地震资料,在川西坳陷北部和南部都识别出了栖霞组颗粒滩储层(图5b,c)。与邻区PT1井、PR1井和双鱼石气田优质储层地震响应特征相似,为典型“两谷夹一峰、中部弱波峰”地震响应特征^[31],由此可见,栖霞组储层在川西超深层具有广泛发育的特征。

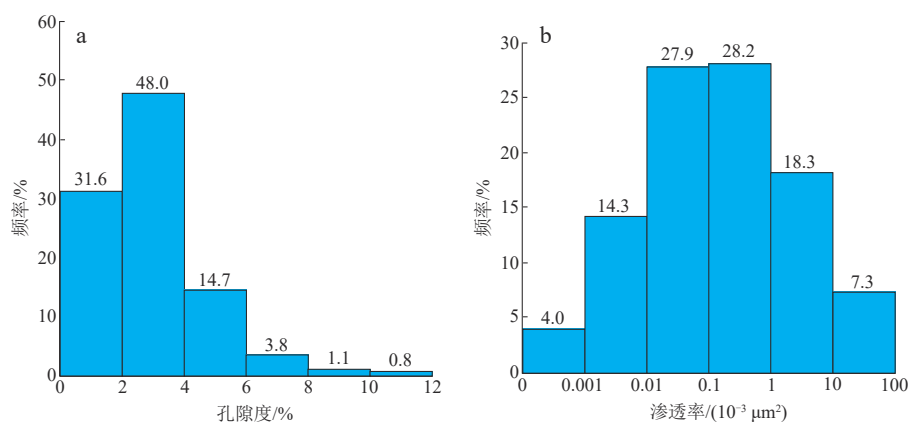


图6 川西地区二叠系栖霞组储层孔隙度(a)和渗透率(b)分布频率直方图(55个样品)

Fig. 6 Frequency histograms of the porosity (a) and permeability (b) of reservoirs in the Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin (55 samples)

3.3 二叠系茅口组

长期以来,二叠系茅口组勘探主要集中在背斜带岩溶缝洞储层领域,在蜀南探明储量超过 $812 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。近年来,茅口组在川东北和川中等地区连续获得勘探突破,展现良好的勘探前景。除了传统的岩溶缝洞型储层以外,还发现了新的储层类型,包括热液白云岩、茅三段台缘浅滩和茅二段台内滩等^[32-33],越来越多的高产井呈现出相带控储的特征,大大提升了对茅口组勘探的信心。川西坳陷邻区JT1井钻遇了茅二段滩相孔隙型白云岩储层,并获得 $112.8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,实现了茅口组储层类型的新发现,储集空间以粒间溶孔、晶间溶孔和晶间孔为主^[34]。结合CS1和NC2等钻井岩心观察与地震相分析,发现茅二段储层受古地貌控制,局部高古地貌部位发育颗粒滩白云岩叠加准同生期岩溶,形成孔隙-孔洞型储层,平均孔隙度为4.9%。

通过地震沉积相对比发现,川西坳陷北部茅口组发育与JT1井地区类似的沉积结构与地震响应(图7b)。茅口组上部表现为隆-洼相间的特征,依据已钻井的成果分析,丘状隆起部位为边缘滩相,表现为茅顶同相轴反射减弱,茅口组内部反射相对杂乱,而隆

起之间的低部位为台洼相,厚度相对较薄,茅顶为强轴,内部为空白反射(图7c),依据多条地震剖面分析,川西坳陷北部发育NW-SE向的隆-洼沉积格局,具备形成相控储层的条件。

4 构造变形样式与演化

4.1 山前构造变形样式

龙门山中段—川西中部自造山带向盆地方向可依次划分为基底冲断带、准原地冲褶带和原地隐伏断隆带。基底冲断带位于北川—映秀断裂以西,彭灌杂岩体冲断至地表。准原地冲褶带介于北川—映秀断裂与安县—灌县断裂之间,构造样式以叠瓦式逆冲断裂为主,断裂突破地表,收敛于二叠系底界,局部发育“y”字形断裂控制的断褶。原地隐伏断隆带,介于安县—灌县断裂与彭县断裂之间,以中-下三叠统含膏盐层为滑脱层形成双重变形结构,盐上层系以断背斜、背冲背斜为主,构造相对宽缓,盐下层系以基底为滑脱层,构造样式与北段类似,在二叠系形成背冲背斜、断背斜以及断块构造。这些隐伏构造单个规模较小,但数量多、并且相对完整,是潜在的勘探目标(图8a,b)。

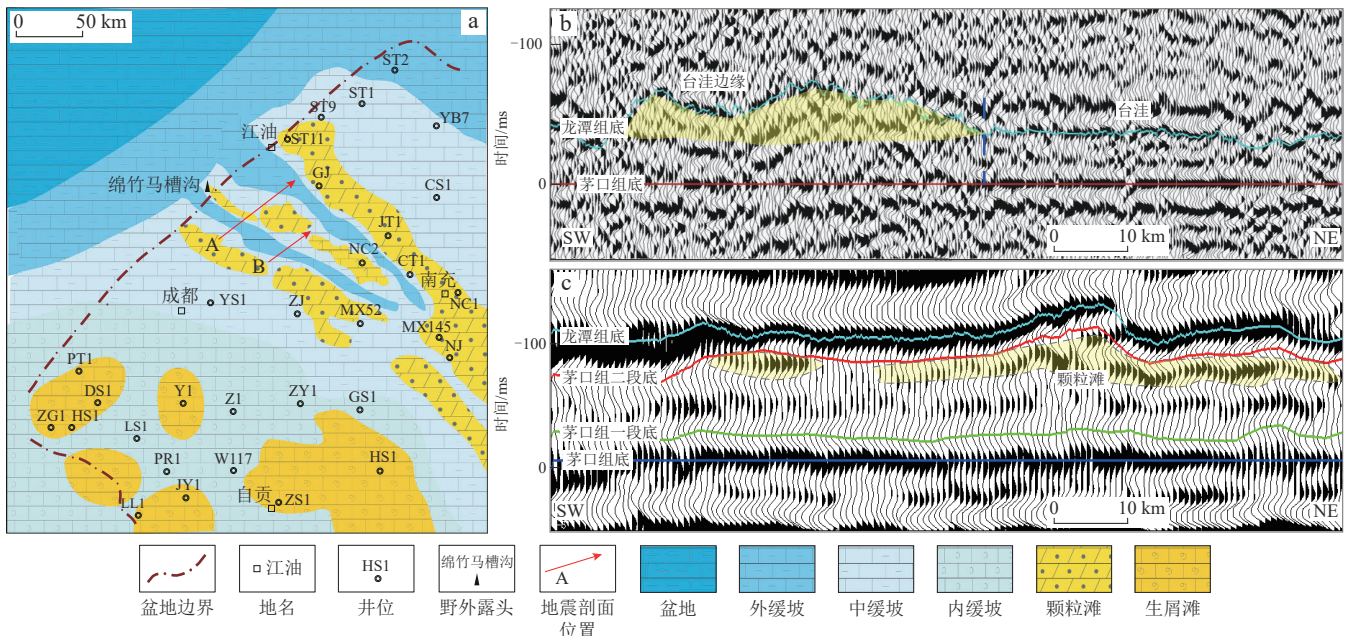


图7 川西地区二叠系茅口组二段岩相古地理与储层地震响应特征

Fig. 7 Lithofacies paleogeography and reservoirs' seismic response characteristics of the 2nd member of the Permian Maokou Formation, western Sichuan Basin

a. 岩相古地理图;b. 剖面A台洼边缘地震响应;c. 剖面B颗粒滩地震响应
(透明颜色是刻画剖面上台洼边缘、颗粒滩的范围。)

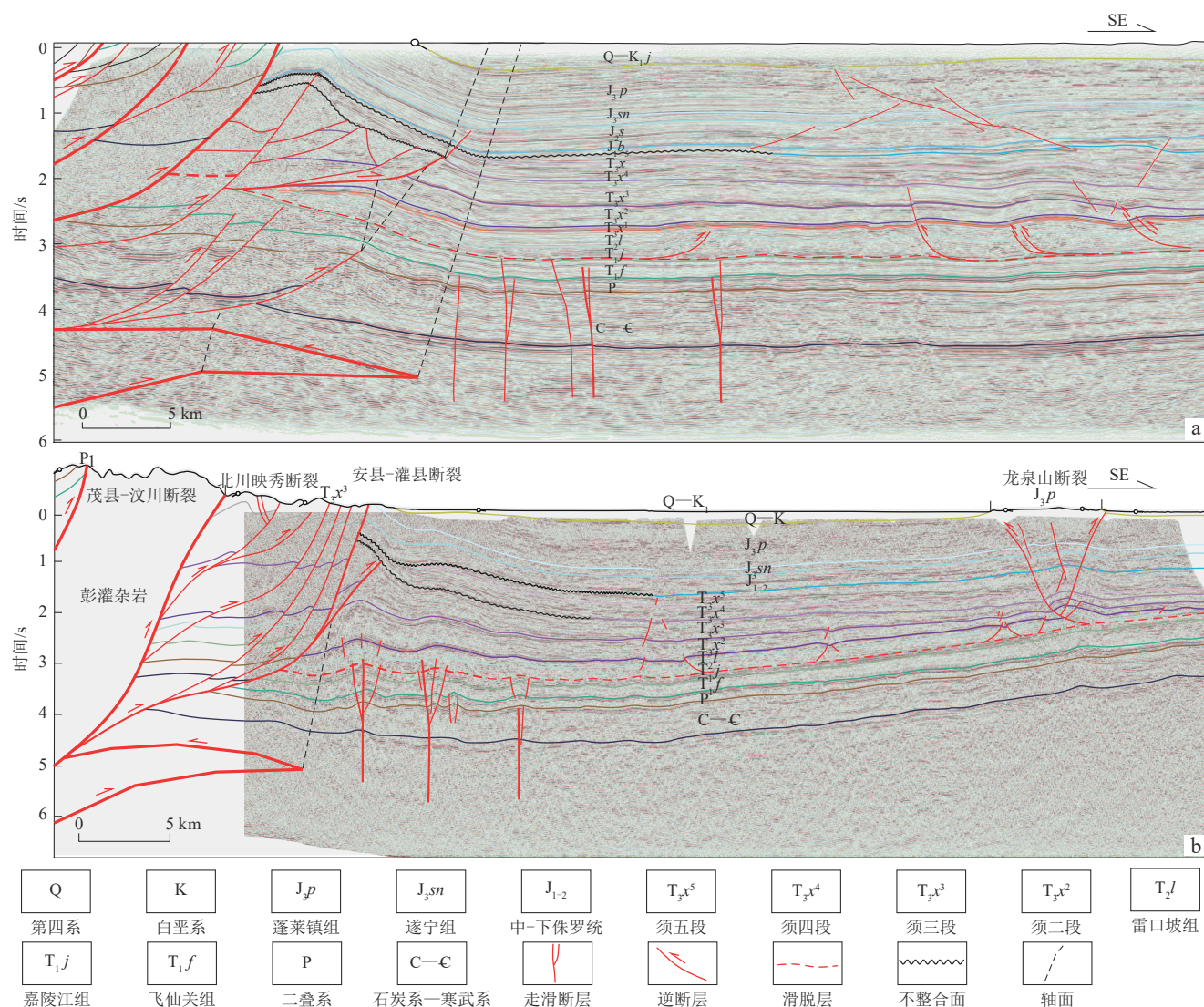


图8 川西坳陷典型剖面构造变形样式(剖面位置见图1)

Fig. 8 Diagrams showing the structural deformation styles of typical sections in the western Sichuan Depression (see Fig. 1 for the section location)

4.2 坳陷带构造变形样式

前期认为川西坳陷深坳区主要为单斜构造,缺少必要的油气输导和圈闭条件,本次研究根据三维地震资料识别出深坳区三叠系盐下发育基底高陡断裂,局部具有走滑特征(图8b)。剖面上,走滑断层断面高陡直立,多数断层向下断切至基底,向上断止于中、下三叠统,并且具有向上变缓的特征,不同于正断层与逆断层上陡下缓的断面特征。川西坳陷北部膏盐岩滑脱层上下呈现分层变形特征,走滑断层大都未影响膏岩层之上的地层变形,揭示走滑断层主要形成于印支期^[35]。川西坳陷南部,受走滑断层的控制,海、陆相地层及滑脱面统一卷入变形,表明其形成较晚,为喜马

雅期构造。构造样式上,部分断裂发育正花状构造和半花状构造,走滑断裂由深部向浅层传播过程中多在二叠系—下三叠统撒开,形成花状构造(图8a,b),正花状构造的广泛发育反映了区内走滑断裂主要发育于压扭性构造环境。

5 油气成藏条件与有利勘探方向

5.1 生-储-盖组合

川西三叠系盐下发育统一的膏盐岩盖层,不同构造部位发育不同的源-储组合,山前带发育寒武系筇竹寺组烃源岩与栖霞组颗粒滩储层的源-储组合,主

要为下生上储、断层输导式成藏模式;坳陷带发育寒武系筇竹寺组与震旦系灯影组台缘丘滩、茅口组台洼边缘高能滩两组源-储组合;前者为源-储侧接式成藏模式,后者为下生上储、断层输导式成藏模式(图9)。不同的成藏组合,成藏过程和主控因素略有不同,与烃源岩生烃、断裂发育和构造变形的匹配关系密切相关。

5.2 构造变形与烃源岩生烃及断裂发育的匹配关系

从须家河组四段以上的陆相地层超覆在山前隐伏构造之上,可以说明该构造形成较早,受印支期安县运动控制,喜马拉雅期构造变形对先前构造具有改造作用,但是受三叠系厚层膏盐岩滑脱层保护作用影响,盐下构造保存完整。坳陷内高陡断裂主要切割三叠系盐下地层,局部地区压扭构造影响到须家河组变形,但是侏罗系基本不受影响。平面上走滑断裂具有左行雁列式排列特征,与印支期勉略洋剪刀式闭合形成的区域构造应力场相吻合,这些证据都说明走滑断裂初始形成期为印支期。

根据YS1井和地震剖面揭示的地层沉积厚度、二叠系烃源岩的热演化程度,结合区域热流史演化特征^[36],恢复了川西坳陷主要烃源岩热演化史特征(图9)。寒武系烃源岩志留纪末开始生油,早三叠世达到生油高峰期,主要生气期在早-中侏罗世,原油裂解期在中侏罗世。二叠系烃源岩中三叠世末开始生油,晚三叠世须家河组三段沉积末期达到生油高峰期,中侏罗世为主要生气期,原油裂解期在侏罗纪末。

通过上述主要烃源岩演化过程、构造演化阶段及储层演化的综合分析,认为研究区主要存在3期油气成藏过程(图10)。

①早期油气运聚阶段:印支中、晚期,在盆地内形成宽缓背斜和圈闭雏型,是油气运移的指向带。印支晚期-燕山早期,区内寒武系、二叠系烃源岩已成熟生成液态烃,此阶段龙门山前地区进入持续山前挤压冲断,形成宽缓冲断背、向斜构造带,油气的排烃期与圈闭的形成期一致。液态烃生成过程中排出的富有机酸流体在有利位置的滩相白云岩内发生溶解作用形成埋

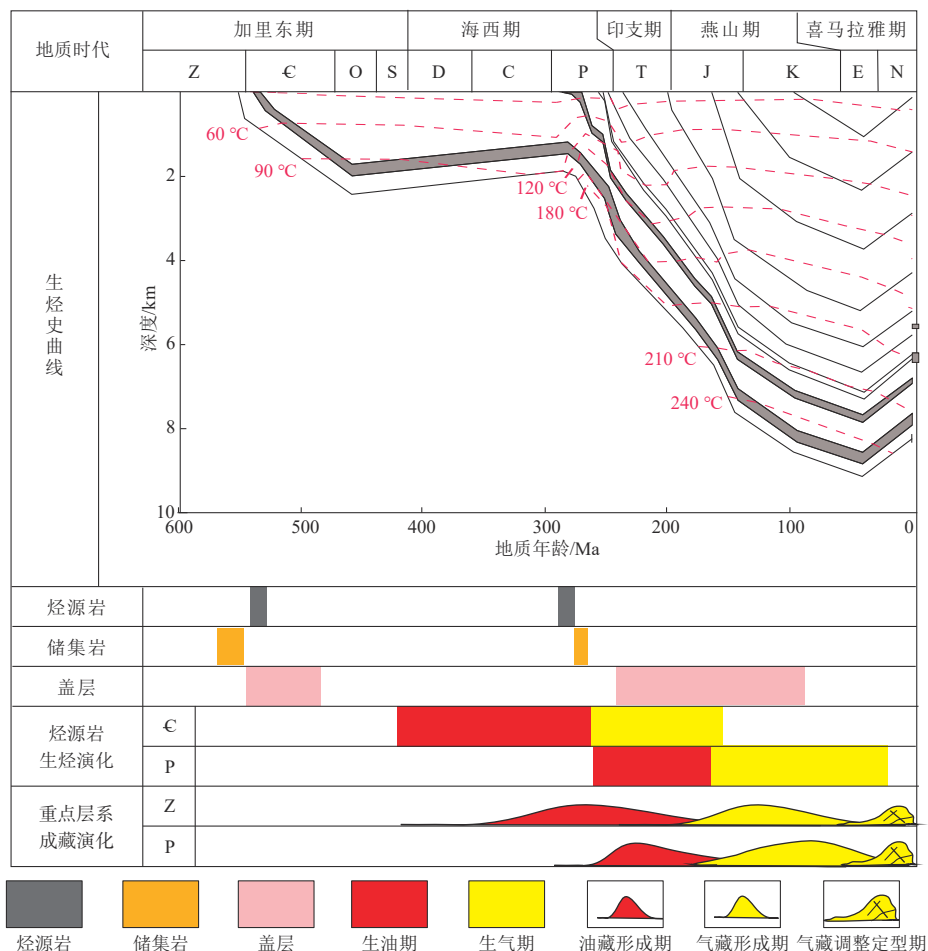


图9 川西坳陷超深层海相含油气系统演化模式

Fig. 9 Evolutionary pattern of the petroleum system in ultra-deep marine sequences in the western Sichuan Depression

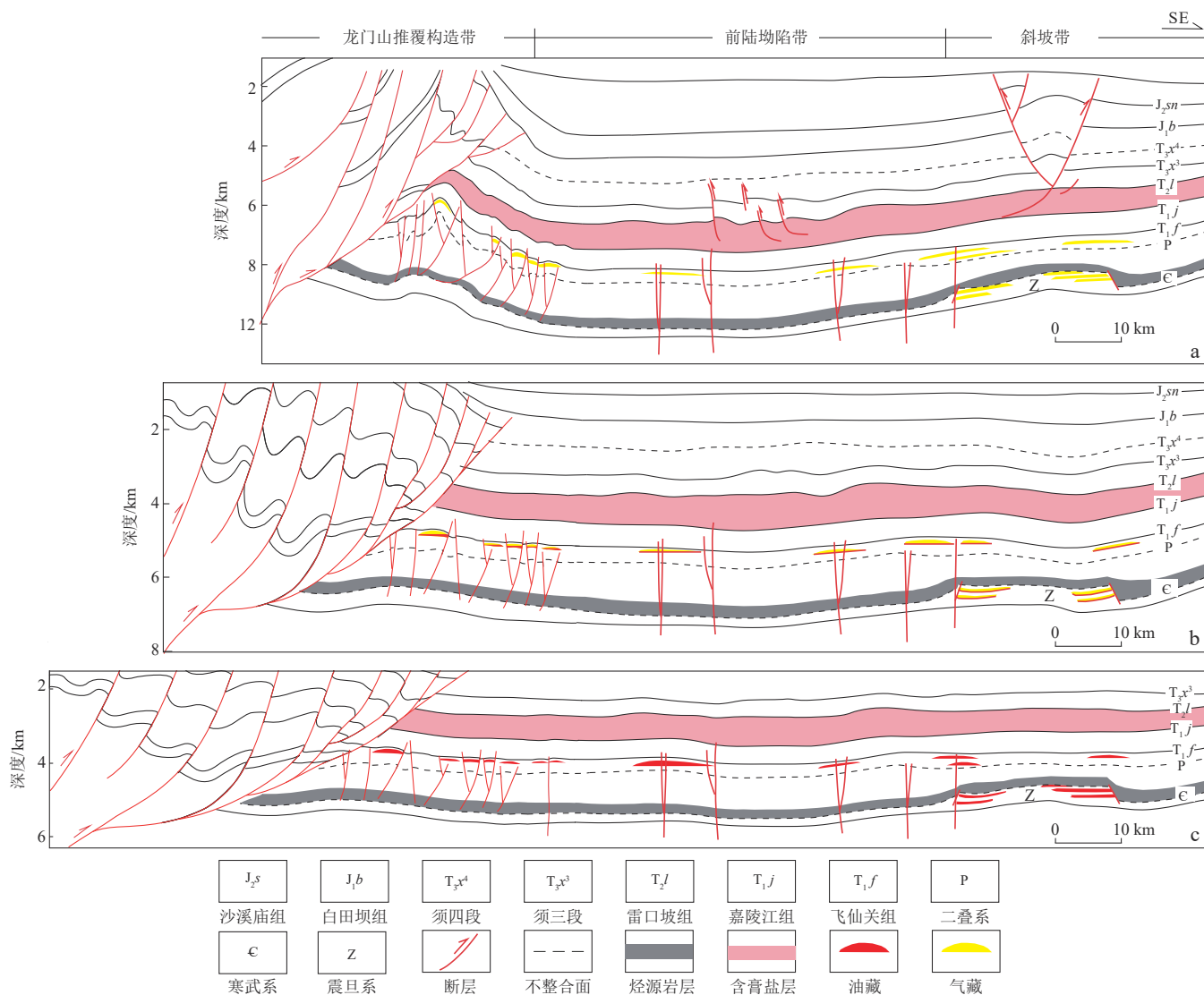


图10 川西坳陷超深层海相油气成藏模式
Fig. 10 Hydrocarbon accumulation pattern of ultra-deep marine sequences in the western Sichuan Depression

a. 现今油气藏剖面; b. 燕山中-晚期油气藏剖面; c. 印支中-晚期油气藏剖面

藏溶解孔,使滩相白云岩成为孔隙性储层^[37]。这些储层与背斜构造配套形成构造-地层复合圈闭,液态烃运移至圈闭中形成油藏。

②天然气成藏阶段:燕山运动中、晚期,持续的沉降使烃源岩进入气态窗,同时使前期形成的油藏因高温裂解转变为气藏并在储层中形成焦沥青,地层水中CO₂含量增高,在储层中发生溶解形成晚期埋藏溶解孔,改变储层分布状况和复合圈闭的形态,原油裂解气和干酪根热解气共同聚集形成早期气藏,此时寒武系和二叠系烃源岩生成的天然气通过断裂、裂缝和不整合面等输导层向隆起高部位运移聚集,气藏形态逐渐定型。

③最终定型阶段:强烈的喜马拉雅运动对早期气藏有明显的改造。抬升、剥蚀作用使气藏埋藏变浅、温

度降低,同时岩层经受构造作用,使构造轴部的白云岩层产生较多的构造裂隙。这些裂隙和微裂隙起输导作用,致使天然气再次向构造高点运移富集;喜马拉雅运动还使气藏圈闭形态改变、高点迁移,从而造成气藏的调整、改造,最终定型为现今的气藏。

5.3 油气成藏主控因素与有利勘探方向

本文在对川西坳陷油气成藏条件进行了重新评价和认识的基础上,结合邻区双鱼石气田二叠系栖霞组、蓬莱气田震旦系灯影组、二叠系茅口组近期勘探突破带来的启示^[38-40],认为山前带推覆体下盘准原地构造、坳陷带走滑断裂与高能相带复合体和灯影组断控台缘带是下一步勘探的有利方向(图10)。

山前带推覆体下盘准原地构造形成原生型油气藏,

构造形成于印支期且后期相对稳定,勘探目的层主要为二叠系栖霞组、茅口组,其成藏模式为下生上储、断裂垂向输导、膏盐岩封盖、构造-岩相控藏、原位调整富集,气藏成藏的主控因素为构造-岩性圈闭侧向封闭性。

坳陷带走滑断裂与高能相带复合体,主要形成原生改造型油气藏,主要勘探目的层为二叠系栖霞组、茅口组。高陡断裂具有“沟源、优储、促聚”的作用,断裂形成期与寒武系烃源岩生烃期具有良好的匹配关系,印支期形成原生岩性油藏,燕山期发生油气转化,喜马拉雅期发生调整改造,在局部构造高部位富集。其成藏模式为下生上储、断裂垂向输导、膏盐岩封盖、岩相控藏、原位调整富集,气藏成藏的主控因素为台内滩储层的发育程度。

坳陷带灯影组断控台缘带,主要形成原生型油气藏。灯影组丘滩体被寒武系烃源岩包围,具备优越的源储配置关系,早期为古隆起区,有利于油气运聚,现今为大型单斜构造背景,其成藏模式为侧生旁储、岩性控藏、油藏原位裂解富集。气藏为岩性圈闭,受岩性致密带及上倾方向巨厚泥岩有效遮挡的控制。

6 结论

1) 川西超深层三叠系盐下海相层系发育多套烃源岩,具备形成大中型油气田的物质基础,其中下寒武统筇竹寺组烃源岩厚度大,生烃强度高,是最有利的一套烃源岩。

2) 川西坳陷内发育震旦系灯影组台缘丘滩、二叠系栖霞组-茅口组颗粒滩白云岩等多种类型优质储层,其中二叠系的储层分布面积最广,最具勘探潜力。

3) 川西龙门山山前带推覆体下盘发育盐下准原地背斜构造,坳陷带斜坡区发育高陡断裂和走滑压扭构造,主要形成于印支期,与寒武系烃源岩主生烃期具有良好的匹配关系,具备油气早期成藏条件。

4) 山前带推覆体下盘原位构造、坳陷内与基底高陡断裂沟通的二叠系高能相带和震旦系灯影组台缘带,普遍具有原生古油藏形成条件,晚期原位裂解、局部构造富集的成藏模式,是下一步勘探有利目标。

参 考 文 献

- [1] 郭旭升,胡宗全,李双建,等. 深层-超深层天然气勘探研究进展与展望[J]. 石油科学通报, 2023, 8(4): 461-474.
- [2] GUO Xusheng, HU Zongquan, LI Shuangjian, et al. Progress and prospect of natural gas exploration and research in deep and ultra-deep strata[J]. Petroleum Science Bulletin, 2023, 8(4): 461-474.
- [3] 何治亮,云露,尤东华,等. 塔里木盆地阿-满过渡带超深层碳酸盐岩储层成因与分布预测[J]. 地学前缘, 2019, 26(1): 13-21.
- [4] HE Zhiliang, YUN Lu, YOU Donghua, et al. Genesis and distribution prediction of the ultra-deep carbonate reservoirs in the transitional zone between the Awati and Manjiaer depressions, Tarim Basin[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(1): 13-21.
- [5] 苏树藩. 四川地区深井试油(气)工艺介绍[J]. 石油钻采工艺, 1979, 1(7): 7-18.
- [6] SU Shufan. Introduction to deep testing technology in Sichuan area[J]. Oil Drilling & Production Technology, 1979, 1(7): 7-18.
- [7] 天工. 川西北部地区下二叠统海相天然气勘探再获突破[J]. 天然气工业, 2014, 34(5): 42.
- [8] TIAN Gong. New breakthrough in marine natural gas exploration of the Lower Permian in the northwest Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2014, 34(5): 42.
- [9] 刘树根,李智武,孙玮,等. 四川含油气叠合盆地基本特征[J]. 地质科学, 2011, 46(1): 233-257.
- [10] LIU Shugen, LI Zhiwu, SUN Wei, et al. Basic geological features of superimposed basin and hydrocarbon accumulation in Sichuan Basin, China[J]. Chinese Journal of Geology, 2011, 46(1): 233-257.
- [11] 钟勇,李亚林,张晓斌,等. 川中古隆起构造演化特征及其与早寒武世绵阳-长宁拉张槽的关系[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 703-712.
- [12] ZHONG Yong, LI Yalin, ZHANG Xiaobin, et al. Evolution characteristics of Central Sichuan palaeouplift and its relationship with Early Cambrian Mianyang-Changning intracratonic sag[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2014, 41(6): 703-712.
- [13] 刘树根,王一刚,孙玮,等. 拉张槽对四川盆地海相油气分布的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版), 2016, 43(1): 1-23.
- [14] LIU Shugen, WANG Yigang, SUN Wei, et al. Control of intracratonic sags on the hydrocarbon accumulations in the marine strata across the Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 2016, 43(1): 1-23.
- [15] 李双建,高平,黄博宇,等. 四川盆地绵阳-长宁凹槽构造演化的沉积约束[J]. 石油与天然气地质, 2018, 39(5): 889-898.
- [16] LI Shuangjian, GAO Ping, HUANG Boyu, et al. Sedimentary constraints on the tectonic evolution of Mianyang-Changning trough in the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2018, 39(5): 889-898.
- [17] 马新华,闫海军,陈京元,等. 四川盆地安岳气田震旦系气藏叠合岩溶发育模式与主控因素[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1281-1294.
- [18] MA Xinhua, YAN Haijun, CHEN Jingyuan, et al. Development patterns and constraints of superimposed karst reservoirs in Sinian Dengying Formation, Anyue gas field, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1281-1294.
- [19] 汪泽成,江青春,黄士鹏,等. 四川盆地中二叠统茅口组天然气大面积成藏的地质条件[J]. 天然气工业, 2018, 38(1): 1-10.

- 30–38.
- WANG Zecheng, JIANG Qingchun, HUANG Shipeng, et al. Geological conditions for massive accumulation of natural gas in the Mid-Permian Maokou Fm of the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2018, 38(1): 30–38.
- [11] 江青春, 汪泽成, 苏旺, 等. 四川盆地中二叠统茅口组一段泥灰岩源内非常规天然气成藏条件及有利勘探方向[J]. *中国石油勘探*, 2021, 26(6): 82–97.
- JIANG Qingchun, WANG Zecheng, SU Wang, et al. Accumulation conditions and favorable exploration orientation of unconventional natural gas in the marl source rock of the first member of the Middle Permian Maokou Formation, Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2021, 26(6): 82–97.
- [12] 赵宗举, 周慧, 陈轩, 等. 四川盆地及邻区二叠纪层序岩相古地理及有利勘探区带[J]. *石油学报*, 2012, 33(S2): 35–51.
- ZHAO Zongju, ZHOU Hui, CHEN Xuan, et al. Sequence lithofacies paleogeography and favorable exploration zones of the Permian in Sichuan Basin and adjacent areas, China [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2012, 33(S2): 35–51.
- [13] 梅冥相, 周鹏, 张海, 等. 上扬子区震旦系层序地层格架及其形成的古地理背景[J]. *古地理学报*, 2006, 8(2): 219–231.
- MEI Mingxiang, ZHOU Peng, ZHANG Hai, et al. Sequence stratigraphic framework and its palaeogeographical background for the Sinian of Upper Yangtze Region [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2006, 8(2): 219–231.
- [14] 周进高, 郝毅, 邓红婴, 等. 四川盆地中西部栖霞组一茅口组孔洞型白云岩储层成因与分布[J]. *海相油气地质*, 2019, 24(4): 67–88.
- ZHOU Jingao, HAO Yi, DENG Hongying, et al. Genesis and distribution of vuggy dolomite reservoirs of the Lower Permian Qixia Formation and Maokou Formation, western-central Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2019, 24(4): 67–88.
- [15] 汪泽成, 姜华, 陈志勇, 等. 中上扬子地区晚震旦世构造古地理及油气地质意义[J]. *石油勘探与开发*, 2020, 47(5): 884–897.
- WANG Zecheng, JIANG Hua, CHEN Zhiyong, et al. Tectonic paleogeography of Late Sinian and its significances for petroleum exploration in the Middle-Upper Yangtze region, South China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(5): 884–897.
- [16] MA Kui, WEN Long, ZHANG Benjian, et al. Segmented evolution of Deyang-Anyue erosion rift trough in Sichuan Basin and its significance for oil and gas exploration, SW China [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2022, 49(2): 313–326.
- [17] 赵文智, 王小芳, 王鑫, 等. 四川盆地震旦系灯影组地层厘定与岩相古地理特征[J]. *古地理学报*, 2022, 24(5): 852–870.
- ZHAO Wenzhi, WANG Xiaofang, WANG Xin, et al. Stratigraphic sequence re-determination and lithofacies palaeogeographical characteristics of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2022, 24(5): 852–870.
- [18] 朱东亚, 张殿伟, 李双建, 等. 四川盆地组合碳酸盐岩多成因岩溶储层发育特征及机制[J]. *海相油气地质*, 2015, 20(1): 33–44.
- ZHU Dongya, ZHANG Dianwei, LI Shuangjian, et al. Development genesis and characteristics of karst reservoirs in lower assemblage in Sichuan Basin [J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2015, 20(1): 33–44.
- [19] SHAN Xiuqin, ZHANG Jing, ZHANG Baomin, et al. Characteristics of dolomite karstic reservoir in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin [J]. *Petroleum Research*, 2017, 2(1): 13–24.
- [20] 郭旭升, 胡东风, 黄仁春, 等. 川东北地区胡家坝震旦系灯影组古油藏特征及其油气勘探意义[J]. *石油与天然气地质*, 2020, 41(4): 673–683.
- GUO Xusheng, HU Dongfeng, HUANG Renchun, et al. Feature of paleo-oil pools in the Sinian Dengying Formation, northeastern Sichuan Basin, and its significance to exploration [J]. *Oil & Gas Geology*, 2020, 41(4): 673–683.
- [21] 马新华, 闫海军, 陈京元, 等. 四川盆地安岳气田震旦系气藏叠合岩溶发育模式与主控因素[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1281–1294, 1333.
- MA Xinhua, YAN Haijun, CHEN Jingyuan, et al. Development patterns and constraints of superimposed karst reservoirs in Sinian Dengying Formation, Anyue Gas Field, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1281–1294, 1333.
- [22] 杨跃明, 王文之, 文龙, 等. 四川盆地大型古隆起斜坡区微生物碳酸盐岩储层沉积演化特征与天然气规模成藏模式[J]. *天然气工业*, 2021, 41(3): 38–47.
- YANG Yueming, WANG Wenzhi, WEN Long, et al. Sedimentary evolution characteristics and large-scale natural gas accumulation pattern of microbial carbonate in the slope area of major paleouplift, the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2021, 41(3): 38–47.
- [23] YAN Ruijing, XU Guosheng, XU Fanghao, et al. The multistage dissolution characteristics and their influence on mound-shoal complex reservoirs from the Sinian Dengying Formation, southeastern Sichuan Basin, China [J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 139: 105596.
- [24] 赵路子, 汪泽成, 杨雨, 等. 四川盆地蓬探1井灯影组灯二段油气勘探重大发现及意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 1–12.
- ZHAO Luzi, WANG Zecheng, YANG Yu, et al. Important discovery in the second member of Dengying Formation in Well Pengtan1 and its significance, Sichuan Basin [J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 1–12.
- [25] 欧家强, 李祖兵, 杨洋, 等. 四川盆地蓬探1井区震旦系灯影组二段储层特征及主控因素[J]. *天然气地球科学*, 2022, 33(12): 1997–2007.
- OU Jiaqiang, LI Zubing, YANG Yang, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the second member of the Dengying Formation in Pengtan 1 Well area, Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2022, 33(12): 1997–2007.
- [26] 崔会英, 张莉, 魏国齐, 等. 四川盆地威远-资阳地区震旦系储层沥青特征及意义[J]. *石油实验地质*, 2008, 30(5): 489–493, 498.

- CUI Huiying, ZHANG Li, WEI Guoqi, et al. Characteristics of the Sinian reservoir bitumen in Weiyuan-Ziyang areas of the Sichuan Basin and its significance [J]. *Petroleum Geology and Experiment*, 2008, 30(5): 489-493, 498.
- [27] 文龙, 王文之, 李林娟, 等. 川西南部灯影组展布特征新认识及油气地质勘探意义[J]. *中国石油勘探*, 2020, 25(3): 56-65.
- WEN Long, WANG Wenzhi, LI Linjuan, et al. New understandings of distribution characteristics of Sinian Dengying Formation in southwestern Sichuan Basin and its significance of oil and gas geological exploration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(3): 56-65.
- [28] 周进高, 张建勇, 邓红婴, 等. 四川盆地震旦系灯影组岩相古地理与沉积模式[J]. *天然气工业*, 2017, 37(1): 24-31.
- ZHOU Jingao, ZHANG Jianyong, DENG Hongying, et al. Lithofacies paleogeography and sedimentary model of Sinian Dengying Fm in the Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2017, 37(1): 24-31.
- [29] 刘诗琦, 陈森然, 刘波, 等. 基于原位溶蚀模拟实验的四川盆地二叠系栖霞组-茅口组白云岩孔隙演化[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(3): 702-716.
- LIU Shiqi, CHEN Senran, LIU Bo, et al. Pore evolution of the Permian Qixia-Maokou Formations dolomite in Sichuan Basin based on in-situ dissolution simulation experiment [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(3): 702-716.
- [30] PEI Senqi, WANG Xingzhi, HU Xin, et al. Characteristics and diagenetic evolution of dolomite reservoirs in the Middle Permian Qixia Formation, southwestern Sichuan Basin, China [J]. *Carbonates and Evaporites*, 2022, 37(1): 17.
- [31] 曾鸣, 陈骁, 韩嵩, 等. 高分辨精细成像技术在川西北双鱼石地区的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(S1): 83-88.
- ZENG Ming, CHEN Xiao, HAN Song, et al. Seismic high-resolution imaging in Shuangyushi, northwest Sichuan [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(S1): 83-88.
- [32] 张宇, 曹清古, 罗开平, 等. 四川盆地二叠系茅口组油气藏勘探发现与启示[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(3): 610-620.
- ZHANG Yu, CAO Qinggu, LUO Kaiping, et al. Reservoir exploration of the Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and enlightenment obtained [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(3): 610-620.
- [33] 范建平, 宋金民, 江青春, 等. 川东地区中二叠统茅口组一段储层特征与形成模式[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(6): 1413-1430.
- FAN Jianping, SONG jinmin, JIANG Qingchun, et al. Reservoir characteristics and development model of the Middle Permian Mao-1 Member in eastern Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(6): 1413-1430.
- [34] 杨雨, 谢继容, 赵路子, 等. 四川盆地茅口组滩相孔隙型白云岩储层天然气勘探的突破及启示——以川中北部地区JT1井天然气立体勘探为例[J]. *天然气工业*, 2021, 41(2): 1-9.
- YANG Yu, XIE Jirong, ZHAO Luzi, et al. Breakthrough of natural gas exploration in the beach facies porous dolomite reservoir of Middle Permian Maokou Formation in the Sichuan Basin and its enlightenment: A case study of the tridimensional exploration of Well JT1 in the central-northern Sichuan Basin [J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(2): 1-9.
- [35] 李英强, 卞昌蓉, 李双建, 等. 川西梓潼地区深层走滑断裂的发现及勘探意义[J]. *地质科学*, 2023, 58(1): 36-50.
- LI Yingqiang, BIAN Changrong, LI Shuangjian, et al. Discovery of deep strike-slip faults and its exploration significance in Zitong area, western Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geology*, 2023, 58(1): 36-50.
- [36] 朱传庆, 田云涛, 徐明, 等. 峨眉山超级地幔柱对四川盆地烃源岩热演化的影响[J]. *地球物理学报*, 2010, 53(1): 119-127.
- ZHU Chuanqing, TIAN Yuntao, XU Ming, et al. The effect of Emeishan supper mantle plume to the thermal evolution of source rocks in the Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2010, 53(1): 119-127.
- [37] 李双建, 杨天博, 韩月卿, 等. 四川盆地中二叠统热液白云岩化作用及其储层改造意义[J]. *石油与天然气地质*, 2021, 42(6): 1265-1280.
- LI Shuangjian, YANG Tianbo, HAN Yueqing, et al. Hydrothermal dolomitization and its role in improving Middle Permian reservoirs for hydrocarbon accumulation, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2021, 42(6): 1265-1280.
- [38] 李纯泉, 陈红汉, 肖雪薇, 等. 四川盆地中部高石梯-磨溪地区震旦系灯影组储层沥青拉曼光谱分析[J]. *石油与天然气地质*, 2022, 43(2): 456-466.
- LI Chunquan, CHEN Honghan, XIAO Xuewei, et al. Raman spectroscopy of bitumen from the Sinian Dengying Formation reservoirs, Gaoshiti-Moxi area, central Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2022, 43(2): 456-466.
- [39] 李剑, 杨春龙, 谢武仁, 等. 四川盆地安岳气田震旦系台缘带和台内地区天然气成藏差异性及其勘探领域[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 34-45.
- LI Jian, YANG Chunlong, XIE Wuren, et al. Differences of natural gas accumulation and play fairways in the marginal zone and interior of Sinian platform in Anyue Gas Field, Sichuan Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 34-45.
- [40] 邹才能, 谢增业, 李剑, 等. 典型碳酸盐岩大气田规模聚集差异性及其主控因素——以四川盆地安岳气田和鄂尔多斯盆地靖边气田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 1-15.
- ZOU Caineng, XIE Zengye, LI Jian, et al. Differences and main controlling factors of large-scale gas accumulations in typical giant carbonate gas fields: A case study on Anyue Gas Field in the Sichuan Basin and Jingbian Gas Field in the Ordos Basin [J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 1-15.

(编辑 张亚雄)