

超深层油气成藏关键要素及成藏过程研究

——以川北元坝地区灯影组为例

张雷^{1,2*}, 李毕松^{1,2}, 朱祥^{1,2}, 杨毅^{1,2}, 徐祖新^{1,2}, 代林呈^{1,2}, 张文睿^{1,2}, 徐云强^{1,2}, 胡力文^{1,2}

1 深层油气全国重点实验室, 成都 610041

2 中国石化勘探分公司, 成都 610041

* 通信作者, 530286149@qq.com

收稿日期: 2024-10-30; 修回日期: 2025-04-03

深层油气全国重点实验室开放课题(编号: SKLDOG2024-KFYB-04)和中国石油化工股份有限公司科技部项目(编号: P24246)联合资助

摘要 深层—超深层油气资源潜力大但探明率低, 是我国油气现今勘探发展的重点领域。然而, 针对深层—超深层领域的资源潜力评价仍面临烃源岩热演化程度高、储层成岩改造强、油气藏多期调整改造与有效保存等一系列科学技术难题。近期, 元坝地区超深层油气勘探获得新突破, 在埋深近 9000 m 的灯影组四段发现了天然气藏, 揭示了四川盆地北部超深层良好的勘探前景。本文以最新钻井 YS1 井的资料为主, 结合周缘钻井、露头及其分析测试等数据, 对研究区灯四段气藏的烃源岩、储集层等成藏关键要素及油气成藏过程开展系统研究, 以期对超深层油气藏勘探评价提供借鉴。结果表明: (1)YS1 井灯四段气藏烃源岩来自寒武系筇竹寺组, 烃源岩在志留纪进入低成熟阶段, 至晚二叠世—三叠纪达到中—高成熟阶段, 在中侏罗世—早白垩世达到高—过成熟阶段, 目前处于过成熟阶段。(2)灯四段气藏储层主要为台缘丘滩相白云岩储层, 其经历了长期压实、压溶和深埋胶结, 现今表现为低孔、低渗的特征。(3)川北地区台缘丘滩储层紧邻筇竹寺组深水相优质烃源岩, 具有“棚生缘储, 上生下储”的有利源储配置条件, 是古油藏形成的物质基础。(4)灯四段气藏经历了多期调整改造。古油藏期, 研究区处于川中古隆斜坡区, 受滩间致密层封挡形成规模岩性古油藏; 油气转换期和气藏期, 受北部盆缘米仓山隆升影响, 研究区处于米仓隆起斜坡区的局部微幅隆起构造, 形成受构造—岩性共同控制的古气藏; 晚期受喜山运动影响, 盆缘隆升挤压, 元坝地区处于九龙山背斜南西翼, 灯影组古气藏局部调整形成现今气藏, YS1 井处于古气藏、现今气藏叠合有利区。四川盆地北部超深层油气藏勘探应以寻找大型规模古油藏为基础, 进而落实成藏关键期的有利古构造特征; 持续有效的保存条件和古、今构造高部位叠合区是油气运聚调整的有利富集区。

关键词 超深层油气; 碳酸盐岩; 油气成藏过程; 灯影组; 四川盆地北部

中图分类号 P618.13; TP18

引用格式: 张雷, 李毕松, 朱祥, 杨毅, 徐祖新, 代林呈, 张文睿, 徐云强, 胡力文. 超深层油气成藏关键要素及成藏过程研究——以川北元坝地区灯影组为例. 石油科学通报, 2025, 10(03): 415–429

ZHANG Lei, LI Bisong, ZHU Xiang, YANG Yi, XU Zuxin, DAI Lincheng, ZHANG Wenrui, XU Yunqiang, HU Liwen. Key controls and accumulation processes of ultra-deep hydrocarbon reservoirs: A case study of the Dengying Formation in the Yuanba Area, northern Sichuan Basin. Petroleum Science Bulletin, 2025, 10(03): 415–429. DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.015

Key controls and accumulation processes of ultra-deep hydrocarbon reservoirs: A case study of the Dengying Formation in the Yuanba Area, northern Sichuan Basin

ZHANG Lei^{1,2}, LI Bisong^{1,2}, ZHU Xiang^{1,2}, YANG Yi^{1,2}, XU Zuxin^{1,2}, DAI Lincheng^{1,2}, ZHANG Wenrui^{1,2}, XU Yunqiang^{1,2}, HU Liwen^{1,2}

1 State Key Laboratory of Deep Oil and Gas, Chengdu 610041, China

2 Sinopec Exploration Company, Chengdu 610041, China

Received: 2024-10-30; Revised: 2025-04-03

Abstract Deep and ultra-deep oil and gas resources, characterized by vast potential but low proven rates, become a key target of exploration and development in China presently. However, evaluating their resource potential still faces a series of scientific and technological challenges, such as high thermal evolution degree of source rocks, strong diagenetic modification of reservoirs, multi-stage adjustment, transformation and effective preservation of oil and gas reservoirs. Recently, new breakthroughs have been made in ultra-deep exploration in the Yuanba Area, with the discovery of natural gas reservoirs in the fourth section of the Dengying Formation at a depth of nearly 9000 meters, revealing promising exploration prospects for ultra-deep layers in the northern Sichuan Basin. Based primarily on the latest drilling data of YS1 well, combined with peripheral drilling, outcrop and analysis testing data, this study systematically investigates the key control elements of source rocks, reservoirs and oil and gas accumulation processes in the Dengying gas reservoir in the study area, aiming to provide reference for the exploration and evaluation of ultra-deep oil and gas reservoirs. The results show that: (1) The YS1 gas reservoirs of the fourth member of the Dengying Formation were derived from the Cambrian Qiongzhusi Formation source rocks. These source rocks entered a low maturity stage during the Silurian, then reached a medium high maturity stage for the main oil generation and early cracking during the Late Permian-Triassic, and reached a high over maturity stage for main cracking gas generation during the Middle Jurassic-Early Cretaceous. (2) The YS1 gas reservoirs are consist of the microbial dolomites deposited on the platform margin, which have undergone long-term compaction, pressure solution, and deep burial cementation, resulting in currently low porosity and low permeability characteristics. (3) In northern Sichuan Basin, the platform marginal mound-shoal reservoirs are adjacent to the high-quality deep-water facies source rocks of the Qiongzhusi Formation, and has favorable source and reservoir configuration conditions of “source generation in slope facies with reservoir accumulation in margin facies” and “upper source feeding lower reservoir”, which provides the material basis for paleo-oil reservoir formation. (4) The gas reservoir in Member 4 of the Dengying Formation underwent multistage modifications. During the paleo-oil stage, located on the central Sichuan paleo-uplift slope, it formed large-scale lithologic paleo-oil reservoirs sealed by tight inter-shoal layers. During oil-gas conversion and gas reservoir stages, influenced by the Micang Mountain uplift, subtle structural highs developed on the Micang uplift slope, forming structure-lithology composite paleo-gas reservoirs. In the late stage, the Himalayan compression caused basin-margin uplift, adjusting the paleo-gas reservoir to form current reservoirs, with YS1 well in the favorable overlap zone. Exploration should target large paleo-oil reservoirs, identify key-period paleo-structures, and focus on areas combining effective preservation with paleo-present structural overlap as preferential enrichment zones.

Keywords ultra-deep hydrocarbon reservoirs; carbonate rocks; petroleum accumulation process; Dengying Formation; northern Sichuan Basin

DOI: 10.3969/j.issn.2096-1693.2025.01.015

0 引言

我国深层—超深层油气资源占比大、探明率低，深层—超深层中，石油技术可采资源约 59.15 亿 t，占石油资源总量的 19.7%；天然气技术可采资源量为 28.09 万亿 m³，占天然气资源总量的 56.1%。因此，深层—超深层油气资源潜力巨大，向深层油气进军是推

动我国油气勘探发展的必由之路^[1-3]。然而，深层—超深层的油气资源勘探评价仍面临一系列科学技术难题：烃源岩热演化程度高，现今大量烃源岩处于无有效生烃能力的过成熟状态；储层经历长期压实、压溶和深埋胶结等成岩作用改造，孔隙有效性和连通性变差，非均质性增强；超深层油气藏受到多期构造运动的调整 and 改造，现今气藏的分布及有效性评价难度大^[4-12]。

四川盆地北部元坝地区灯影组的油气勘探, 早期主要集中于盆地边缘埋深较浅的米仓山前缘冲断带, 灯四段埋深 2000 m 左右, 此后, 在盆地内部钻探了 MS1 井和 RT1 井, 灯四段埋深 8000 m 左右^[13], 均未获显著突破。2023 年完钻的 YS1 井, 在灯四段台缘丘滩相带钻遇 8800 m 超深天然气层, 并测试获气, 实现了研究区灯影组勘探的新突破(图 1a)。尽管研究区灯影组经历了数十年的勘探, 但是钻井资料总体较少; 前人有关成藏机理的研究主要集中于威远、高石梯—磨溪和蓬萊等^[14-16]钻井资料丰富的地区, 针对研究区灯影组的研究主要聚焦储层特征和主控因素的分析^[17-19], 对油气成藏关键要素及成藏过程的研究尚未见公开报道。

本文在综合前人有关四川盆地全盆灯影组油气成藏研究的基础上, 重点利用新钻井的测录井、岩心和分析测试等数据, 结合工区三维地震资料, 开展元坝地区超深层灯影组气藏的储层、烃源岩及油气成藏过程研究, 落实灯四段储层特征、源储配置关系以及烃源岩埋藏生烃史, 通过恢复关键成藏期古构造特征,

明确超深层油气成藏及调整演化过程, 以期为超深层油气勘探评价提供借鉴。

1 区域地质概况

元坝地区位于四川盆地北部(图 1a), 构造上位于川北低缓构造带, 向南与川中平缓构造带相连, 向西与川西低陡构造带相邻, 向东连接川东高陡构造带。研究区在前寒武基地之上发育了厚达万米的震旦系至侏罗系沉积盖层。上震旦统灯影组自下至上划分为一段、二段、三段和四段, 其中灯四段为本文研究的主要目的层。灯四段与上覆寒武系筇竹寺组泥页岩呈平行不整合接触, 与下伏灯三段为整合接触。灯四段沉积期, 受绵阳—长宁裂陷槽的影响, 研究区西部发育台地边缘丘滩相沉积为主, 向东演化为台内丘滩和滩间沉积为主。灯四段沉积后先后经历了桐湾运动、加里东运动、海西运动、东吴运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅运动 7 次构造运动^[20]。研究区灯四段整体具有

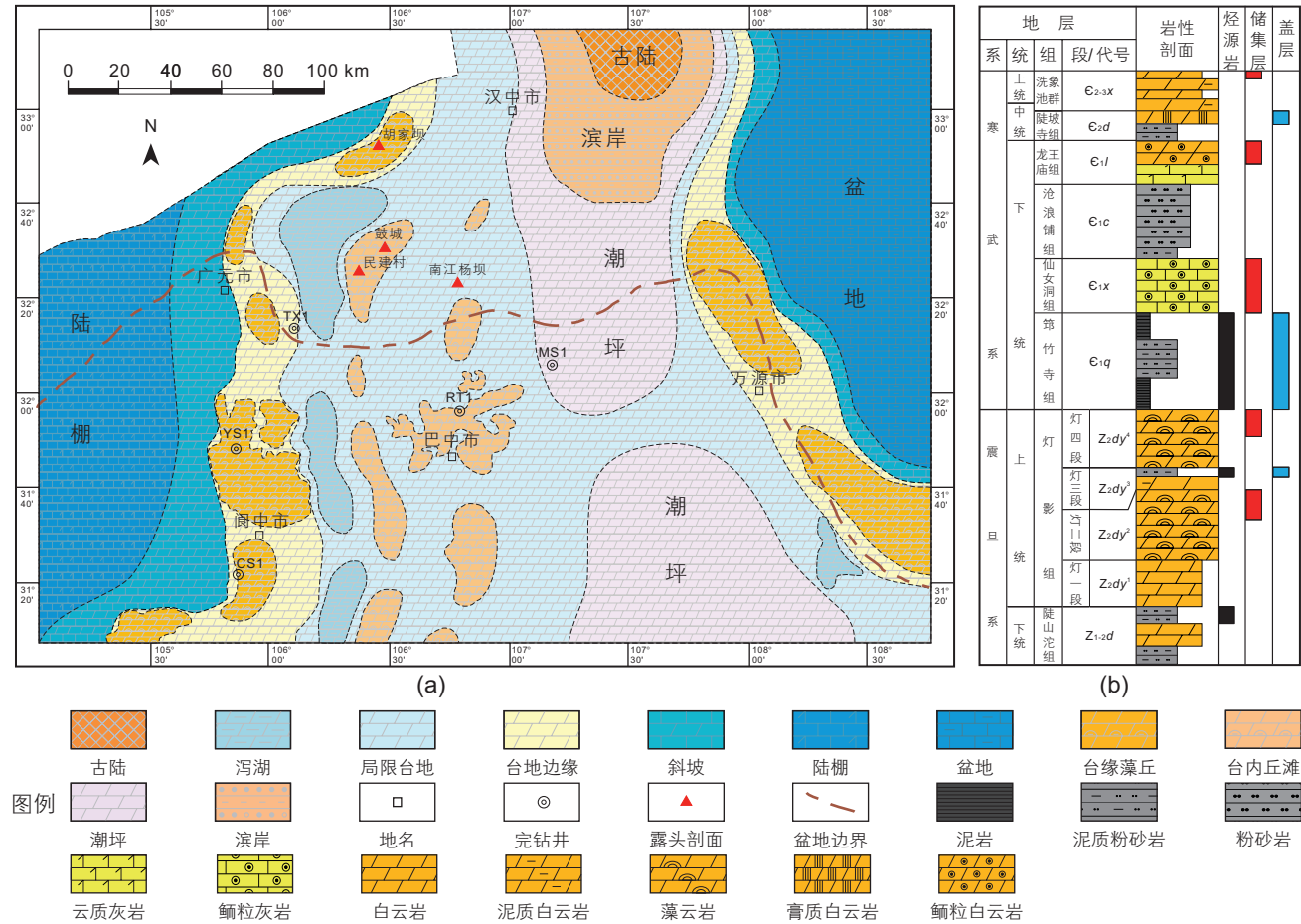


图 1 四川盆地北部元坝地区灯四段 (a) 沉积相与 (b) 地层综合柱状图

Fig. 1 Sedimentary facies of the fourth member of the Dengying Formation (a) and stratigraphic comprehensive column; (b) in the northern Sichuan Basin

北部埋深浅、南部埋深大的特征，北部靠近盆地边缘位置，灯影组埋深较浅，向南埋深逐渐超过 8000 m。

元坝及周源地区上震旦统一寒武统发育良好的生储盖组合(图 1b)，主力烃源岩为下寒武统筇竹寺组泥页岩，其次为上震旦统灯影组三段泥岩，储层为灯四段丘滩相白云岩^[18-19]，盖层为上覆筇竹寺组泥岩，存在旁生侧储、上生下储、下生上储等多种成藏组合。

2 样品采集与实验方法

为了明确研究区灯影组的沉积环境和储层特征，对YS1井灯四段两回次共 10 m 的岩心进行了系统的观察和描述，采集样品 62 块，其中柱状塞 15 个。所有样品均磨制了蓝色铸体薄片，并用茜素红进行一半颜色。铸体薄片用于岩石的矿物组成、岩石结构、孔隙类型和成岩作用的研究。柱状塞样品用于孔隙度和渗透率的测量。

为落实研究区烃源岩热演化程度，采集YS1井、RT1井、MS1井等 8 口井岩心岩屑样品和南江杨坝、宁强胡家坝等 4 条野外露头的筇竹寺组岩石样品，共得到井上侏罗统—寒武系 98 个有效反射率数据以及野外剖面筇竹寺组烃源岩 6 个有效反射率数据。将采集岩样制成全岩光片在显微镜下观察其光性特征并测定其反射率，最大反射率与最小反射率的测试方法参照 Kilby(1988)，仪器型号为 DM4500P 偏光显微镜、显微

光度计，双标样为钇铝石榴子石和钇镓石榴子石。四川盆地陆相地层镜质体丰富，可以直接测得 R_0 值，对于缺乏镜质体的地层，本文通过测得沥青反射率 R_b ，并利用徐学敏(2019)^[20]建立的等效公式换算成等效镜质体反射率(VR_0)。

为了确定油气充注期次，选取YS1井岩心样品磨制包裹体薄片 10 块，用于流体包裹体的观察与测温。包裹体显微测温仪器为 ZEISS 双通道荧光—透射光显微镜联用 Linkam-THMS600G 冷热台，采用循环测温的方法，将均一温度误差控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，冰点温度误差控制在 $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，升温速率控制在 $0.2\sim 5.0\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ，并在包裹体相变附近时速率降至 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 。薄片鉴定、包裹体测温 and 全岩反射率测定均在中国石化油气成藏重点实验室(无锡)和深层油气国家重点实验室完成。

3 川北筇竹寺组烃源岩基本特征

3.1 烃源岩分布特征

受早寒武世兴凯地裂运动控制，川北筇竹寺组为继承性裂陷区，沉积一套厚层深水陆棚相烃源岩，主要由缺氧、强还原环境下沉积的灰黑色泥岩、页岩和灰色粉砂质泥岩组成。平面上，烃源岩沿古裂陷中心分布，呈盆地中间薄、周边厚的沉积格局(图 2)，最厚区域位于裂陷槽北部广元—绵阳一带，可达 350 m 以上。川北元坝—通江一带存在次级裂陷，厚度也较大，

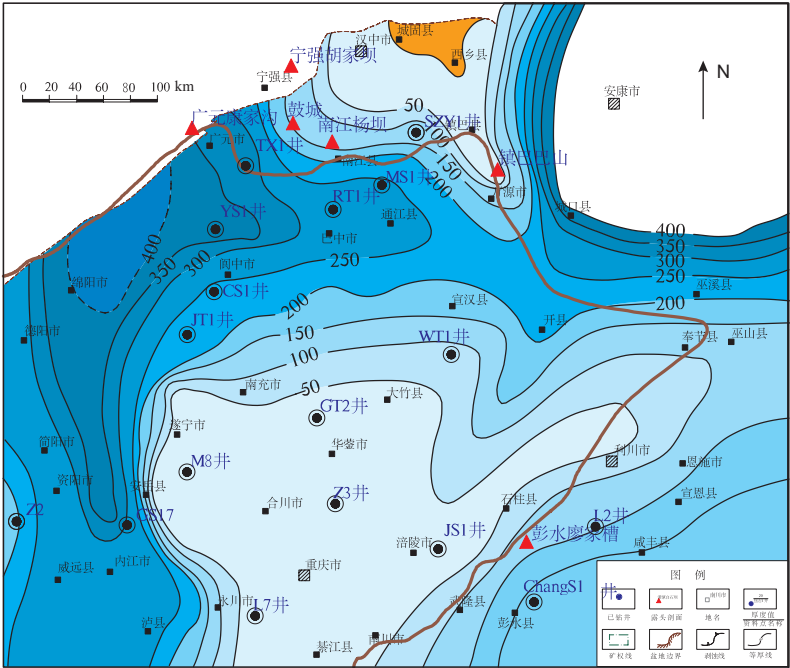


图 2 川北地区筇竹寺组烃源岩厚度图

Fig. 2 Thickness map of source rocks of the Qiongzhusi Formation in North Sichuan Basin

总体介于 200~300 m；川东北镇巴—城口一带同样形成厚度中心，厚约 250~400 m。同时，厚度中心也形成了生烃中心，生烃强度大(50 亿~100 亿 m^3/km^2)。

筇竹寺组烃源岩有机质类型主要为I型干酪根，烃源岩有机碳TOC含量高，YS1 井TOC含量在 0.54%~8.65%，平均 2.48%，TOC>0.5%厚度 368 m，TOC>2%厚度 129 m，川北筇竹寺组烃源岩厚度大、分布广，品质优，为川北大气田的形成奠定了良好物质基础。

3.2 烃源岩热演化特征

烃源岩热演化与地层埋深、盆地热流以及火山活动造成的异常热事件密切相关^[21~23]。对于四川盆地而言，早二叠世末—晚二叠世初的峨眉山地块柱活动对四川盆地西南部影响强度大，而对川北地区影响程度小^[24]。

川北地区筇竹寺组烃源岩具有埋深大、热演化程度高的特征。研究区 3 口钻井烃源岩平均埋深均超过 8000 m，其中YS1 井最大埋深近 8600 m，为四川盆地钻获埋深最大的烃源岩。3 口井的实测烃源岩等效镜质体反射率 VR_o 介于 4.13%~4.85%(表 1)。深度— VR_o 剖面可用于地层热演化史研究，确定烃源岩热演化的主控因素^[25~26]。由浅层至超深层烃源岩样品的 VR_o 热演化剖面显示(图 3)，侏罗系—寒武系 R_o 值呈一阶连续型的线性递增：地层埋深在 3120~4542 m时 VR_o 值介于 1.21%~1.98%，埋深 4577~6972 m时介于 2.08%~3.14%，埋深 7045~7714 m时介于 3.16%~3.99%，埋深 7775~8332 m时介于 4.04%~4.37%，未出现 VR_o 值的突变与错断，说明沉积有机质热演化是连续的，热演化受控于地层埋深增热，基本未受到峨眉山地块柱活动影响。

川北山前带钻井及露头烃源岩热演化程度相对较低，烃源岩等效镜质体反射率为 1.26%~3.11%，北部露头区地层受山前古陆隆升影响，抬升较早，整体热演化程度低。

针对研究区 4 口单井的盆地模拟分析，明确了筇竹寺组烃源岩的生排烃演化过程(图 4)。结果表明，YS1 井、RT1 井、MS1 井的烃源岩热演化过程基本一

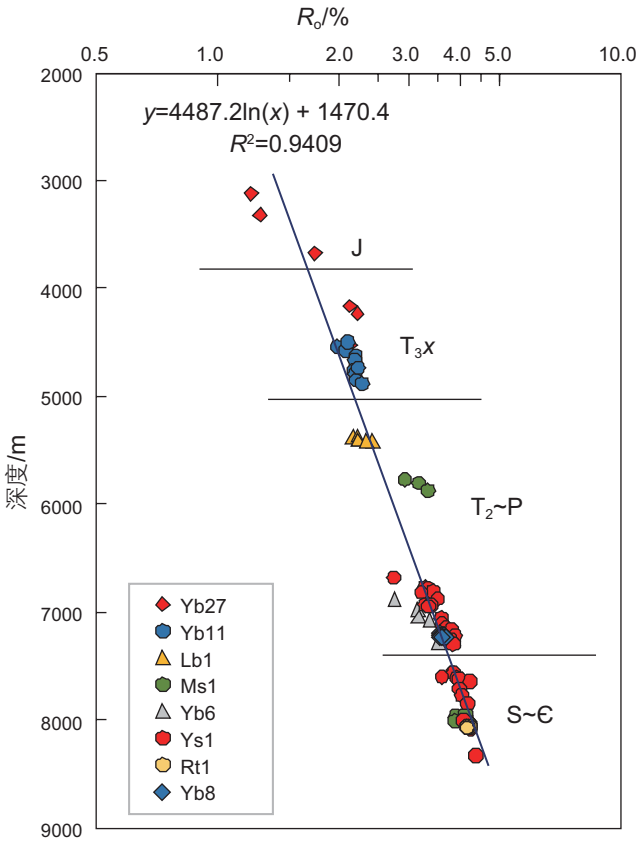


图 3 川北地区钻井实测反射率(VR_o)与深度关系图
Fig. 3 Relationship between measured reflectance (VR_o) and depth in the northern Sichuan Basin

表 1 川北筇竹寺组烃源岩实测固体沥青反射率与等效镜质体反射率

Table 1 Measured values for solid bitumen reflectance (R_b) and equivalent of vitrinite reflectance (VR_o) of the Qiongzhusi source rocks in the northern Sichuan Basin

构造位置	井名/剖面	深度/m	平均实测固体沥青 反射率 R_b /%	平均等效镜质体 反射率 VR_o /%	有效测点数
盆内	RT1 井	8064.92~8071.75	4.62	4.18	11
盆内	MS1 井	7970.00~8030.00	4.56	4.13	3
盆内	YS1 井	8492.44~8598.83	5.07	4.58	4
盆缘	TX1 井	2014.19~2020.35	2.55	2.35	5
盆缘	南江杨坝	/	3.11	2.85	2
盆缘	南江贾郭山	/	2.46	2.28	1
盆缘	旺苍民建村	/	1.7	1.61	1
盆缘	宁强胡家坝	/	1.26	1.22	2

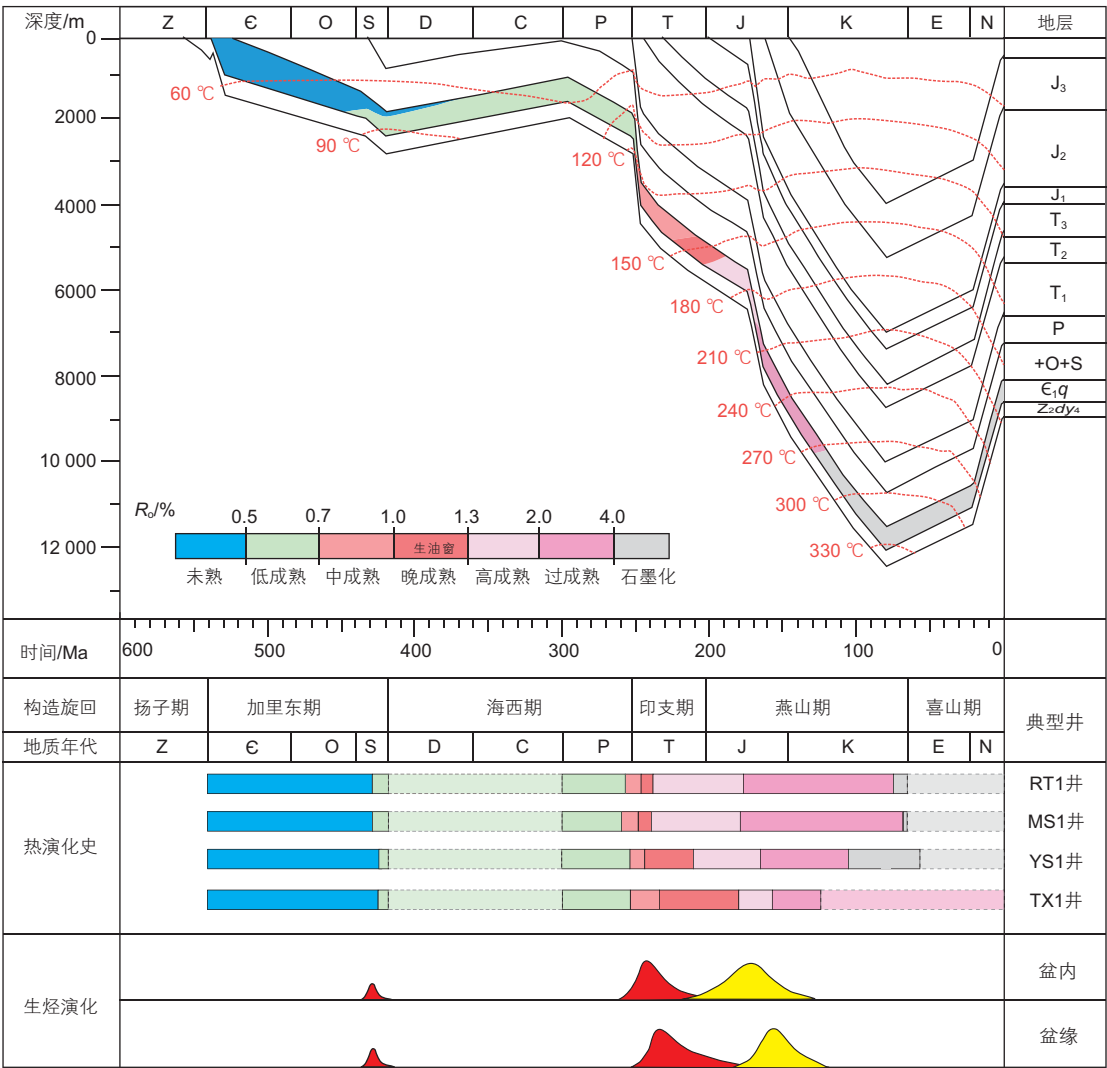


图 4 川北地区埋藏史、筇竹寺组热演化史与生烃演化图

Fig. 4 Burial history, thermal evolution history and hydrocarbon generation evolution of the Qiongzhusi Formation in the northern Sichuan Basin

致，烃源岩低成熟阶段在志留纪—早二叠世，中—晚成熟阶段在晚二叠世—中三叠世，高成熟阶段在中三叠世—中侏罗世，过成熟阶段在中侏罗世—晚白垩世，石墨化在晚白垩世之后。基于烃源岩热演化阶段确定烃源灶生排烃史：第一期低熟油生成在志留纪；第二期主生油期发生在晚二叠—三叠纪；第三期主裂解气期发生在中—晚侏罗世。

4 灯四段储层特征与成因

受震旦纪晚期上扬子北缘拉张裂解控制，四川盆地形成由北部盆缘向南延伸的裂陷槽，控制了灯影组陆棚—台地边缘—开阔台地沉积格局^[27-32]。YS1 井位于台地边缘相带(图 1a)，灯四段钻厚 259 m(未钻穿)，钻遇厚层台缘丘滩相，依据测井相、岩性组合可细分

为两个亚段，其中二亚段厚 215 m，一亚段厚 44 m(图 5)。

基于岩心、薄片识别灯四二亚段岩石类型及厚度显示，YS1 井灯四段发育藻凝块白云岩、藻叠层白云岩、藻砂屑白云岩、藻纹层白云岩、粉—细晶白云岩和泥晶白云岩。其中藻凝块白云岩厚 123 m，藻叠层白云岩厚 27 m，藻砂屑白云岩厚 13 m，藻纹层白云岩厚 7.5 m，藻丘累计厚度为 170.5 m，藻丘滩占比高，丘地比为 62.3%(图 5、图 6)。垂向上丘滩体呈旋回性发育特征，二亚段共划分为 15 个丘滩旋回，单个丘滩体厚度 5~19 m，平均厚度 11.8 m。

4.1 岩石学特征

灯四段储集空间类型发育基质孔隙、溶洞及少量微裂缝。孔隙以丘滩相叠加早期暴露溶蚀作用形成的藻

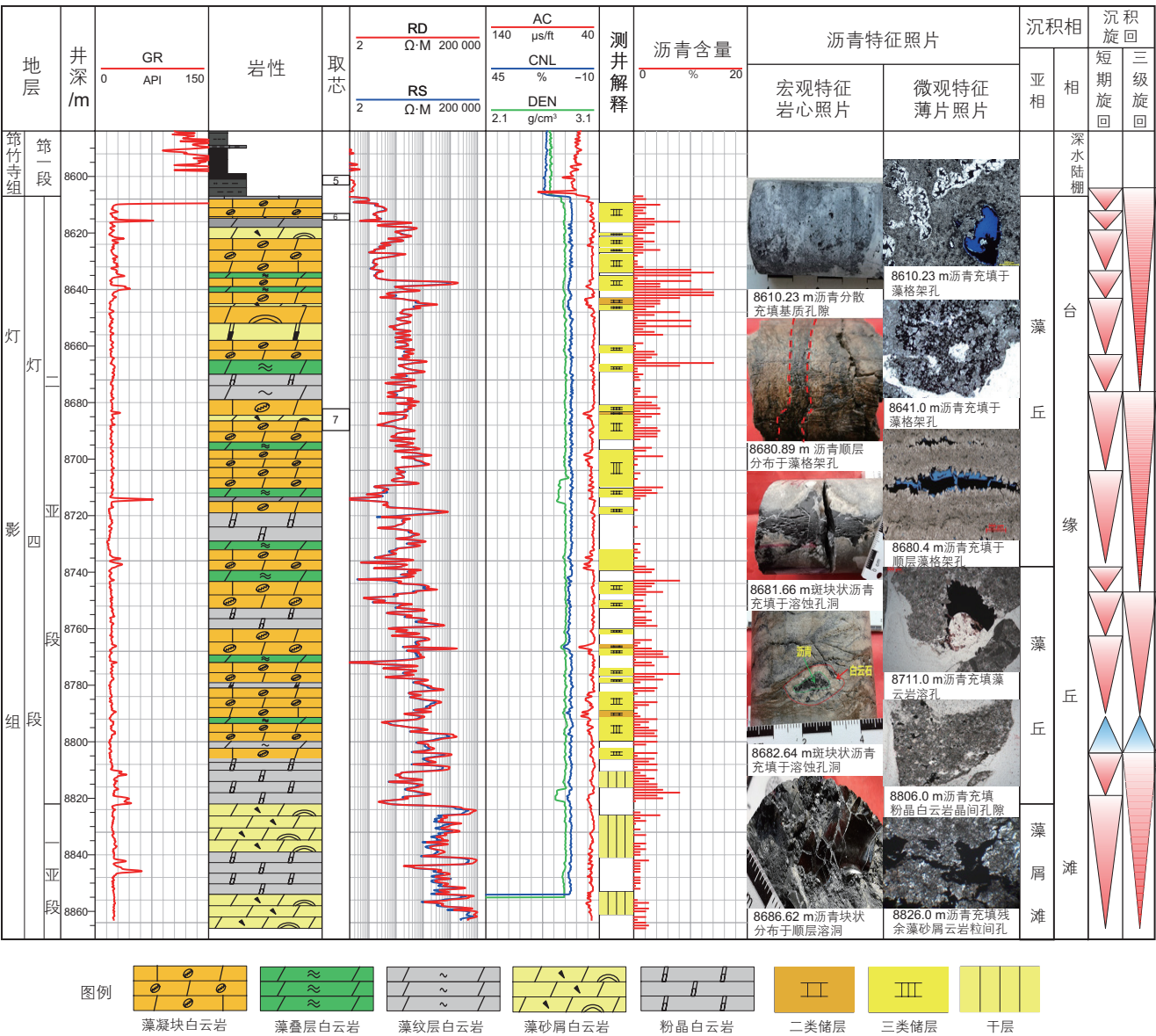


图5 YS1井灯四段岩性与沥青含量综合柱状图
Fig. 5 Comprehensive stratigraphic column and solid-bitumen contents of the fourth member of the Dengying Formation of the YS1 well

格架孔、粒内及粒间溶孔、晶间溶孔为主；溶洞主要表现为小型顺藻类溶洞；裂缝以微裂缝和溶缝为主(图7)，基质孔隙和小型溶蚀孔洞是灯四段主要储集空间。

元坝地区灯四段原生孔隙主要为残余粒间孔和残余格架孔，主要发育于颗粒云岩和藻凝块白云岩中。次生孔隙是指沉积物形成之后，受各种成岩作用(主要为溶蚀作用、重结晶作用等)改造而产生的孔隙，他们或为在原生孔隙的基础上溶蚀扩大，如粒间溶孔、格架间溶孔，或为新生成的孔隙，如粒内溶孔和铸模孔。藻格架溶孔、粒间溶孔、粒内溶孔和晶间溶孔为元深1井灯四段储层最主要的次生孔隙类型。

灯四段另一类重要的储集空间类型是溶洞，常成

顺层性分布(图7a~b)，主要发育于溶蚀作用强烈的藻云岩、颗粒云岩中，以藻格架溶洞和胶结残余溶洞为主，多呈不规则状，直径一般在0.2~3 cm，部分溶洞被细—中晶白云石、石英或沥青半充填。

4.2 物性特征

研究区灯四段储层类型为孔隙—孔洞型，岩心实测孔隙度2.06%~4.47%，平均值为3.23%，渗透率0.002~0.200 mD，平均值为0.11 mD，表现出低孔—低渗特征。储层孔隙度和渗透率呈现正相关的关系(图8)，表明储层主要为基质孔隙型为主。测井解释灯四段储层共计109.0 m/28层，其中二类气层4层7.4 m，

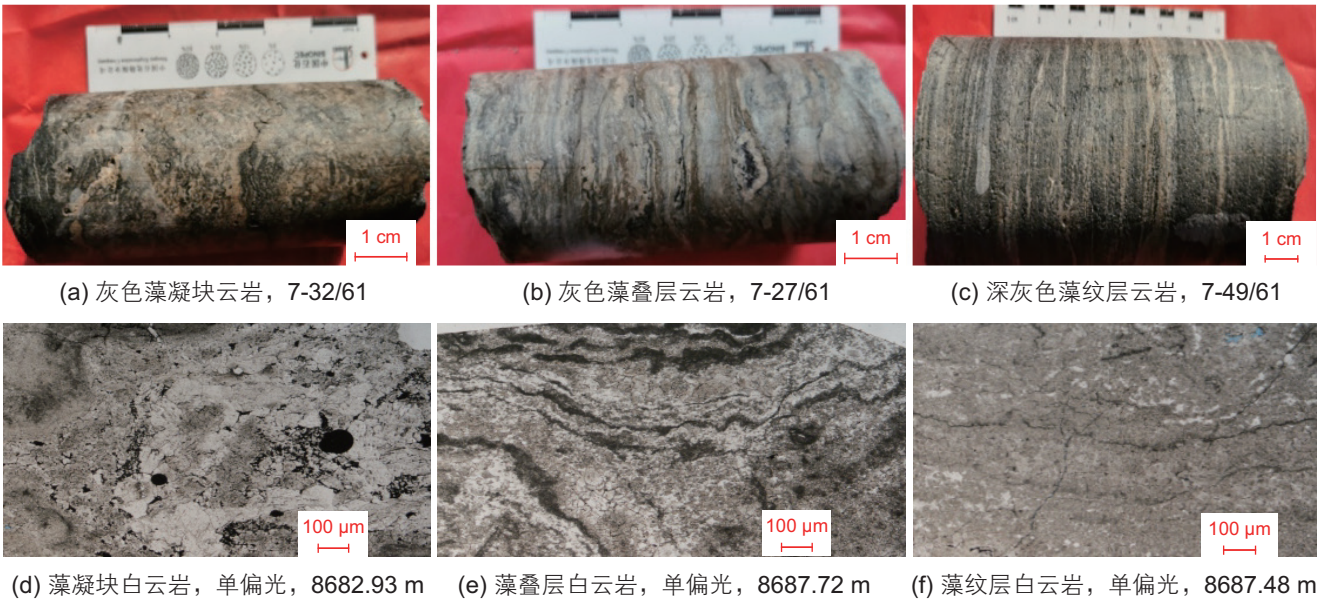


图 6 研究区灯四段主要岩石类型

Fig. 6 Main rock types of the fourth member of the Dengying Formation in the study area

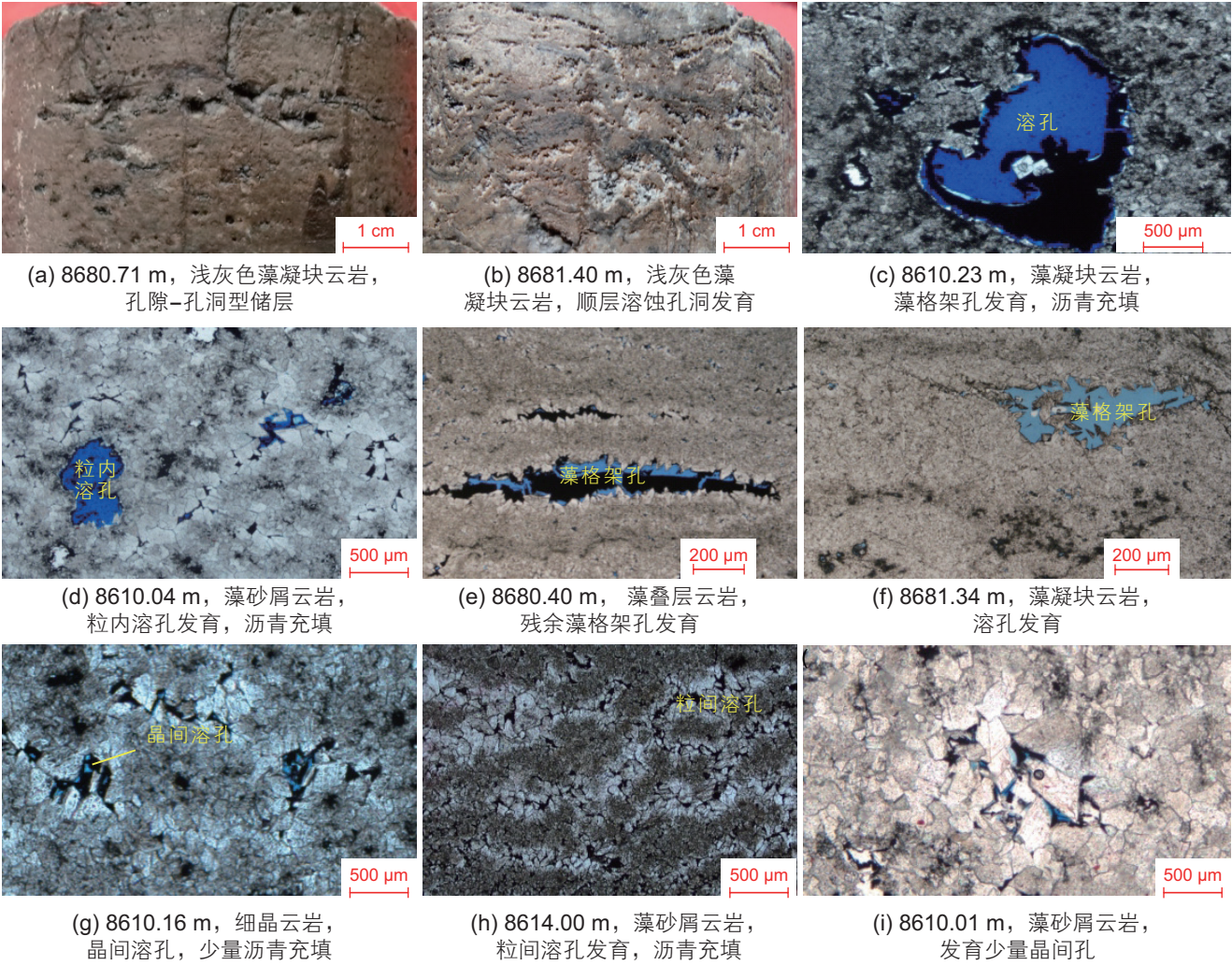


图 7 研究区灯四段储层主要储集空间类型

Fig. 7 Main reservoir space types of the fourth member of the Dengying Formation reservoir in the study area

三类气层 24 层 101.6 m, 单层储层厚度薄, 纵向为多个薄互层分布, 测井解释平均孔隙度 3.56%, 平均渗透率 0.39 mD。总体而言, 灯四段长期的深埋胶结导致储层致密化严重。

4.3 储层发育主控因素

不同地区灯影组储层物性、储集空间类型等方面存在一定差异, 储层的发育一方面受到沉积相、岩石结构的影响, 后期的溶蚀作用也是储层储集空间形成改造的另一关键因素^[33]。

(1) 丘滩相沉积是灯四段储层发育的决定性因素

基于岩性的孔隙度统计结果显示(图 9), 与丘滩体建造相关的藻凝块云岩、藻叠层云岩和藻砂屑云岩孔隙度最高, 其次为藻纹层云岩及细粉晶云岩, 泥晶云岩与泥质云岩孔隙度最低。川北灯影组沉积微相与物性统计表明, 台缘丘滩储集物性最好, 其次是台内丘滩, 云坪—潟湖优质储层不发育^[14]。沉积微相控制的早期孔隙差异性为储层孔隙的后期改造提供了流体

通道, 即高能丘滩相带是优质储层形成的物质基础。

(2) 丘滩相早期暴露组构选择性溶蚀是储集空间形成的关键

灯四段沉积之后, 虽然经历了海底和浅埋藏胶结减孔, 但仍存在大量原生孔洞系统。桐湾运动海平面相对下降, 灯影组大面积暴露, 遭受表生岩溶改造。此时岩溶作用的有利相带是灯影组先期孔渗层, 其结果即是在先存孔隙的基础上进一步溶蚀扩大, 形成花斑状、蜂窝状或顺层状溶蚀孔洞。由于桐湾期早成岩溶作用的物质基础是先期孔渗层, 因而其也明显具有相控的特征, 即原始孔洞系统越发育(丘滩体), 岩溶作用也越强。

总而言之, 灯四段主要为相控型储层, 丘滩相带是储层形成的基础, 准同生期暴露溶蚀和短期的不整合岩溶作用是储集空间形成的关键。

5 灯四段源储配置模式及油气成藏过程

5.1 源储配置模式

盆地的沉积充填演化过程控制了灯四段源储配置特征^[27, 30]。晚震旦世绵阳—长宁裂陷槽形成, 灯影组出现台棚分异沉积格局, 元坝中部地区位于灯四段台地边缘, 发育厚层丘滩相控孔隙型储层, 元坝西部地区为欠补偿深水陆棚相沉积。灯影组末期的桐湾运动以整体海退为主, 地层遭受不整合岩溶作用改造。早寒武世全盆海侵, 裂陷槽继承性发展, 进一步拉张扩大, 在川北元坝—通南巴地区形成次级洼陷, 同时盆地周缘迅速隆升, 沉积相类型由碳酸盐岩台地转变为碎屑陆棚沉积, 裂陷槽及盆内洼陷沉积厚层泥岩、页岩及砂质泥岩, 陆棚中心沉积厚度达 400 m, 形成四川盆地厚度最大、分布最广的烃源岩层, 元坝地区第

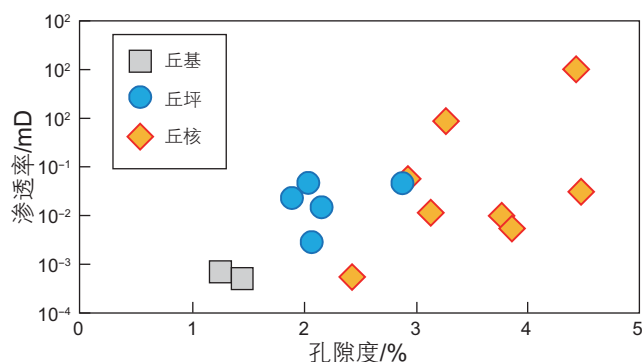


图 8 研究区灯四段储层孔渗关系散点图

Fig. 8 Porosity-permeability relationship of the fourth member of the Dengying Formation in the study area

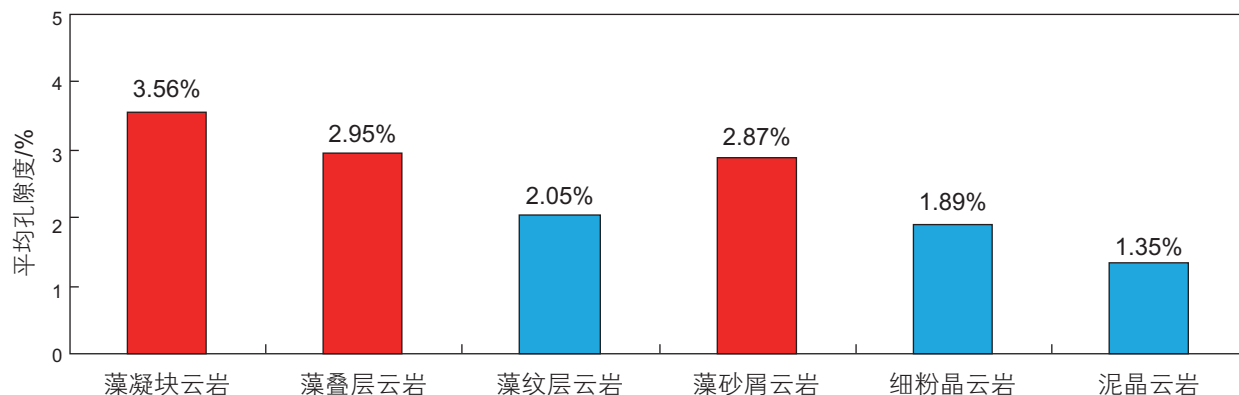


图 9 研究区灯四段储层岩性与孔隙度关系图

Fig. 9 Relationship between lithology and porosity of the fourth member of the Dengying Formation in the study area

竹寺组烃源岩厚度约 300 m 左右, 平均 TOC 为 2.48%。

YS1 井灯四段位于台地边缘高能丘滩相带, 紧邻拉张槽深水相区, 早寒武世裂陷槽逐渐填平补齐, 充填筇竹寺组厚层泥质烃源岩, 灯四段优质储层侧向上与西侧深水陆棚相优质烃源岩对接, 垂向上优质烃源岩位于储层正上方, 灯四段台缘丘滩具有“棚生缘储、上生下储”的优越源储配置条件, 利于近源充注形成规模油气藏(图 10)。同时, 筇竹寺组厚层泥岩构成了研究区一套区域封盖层, 为后期油气的持续保存奠定了良好的基础。

5.2 古油藏特征

研究表明, 四川盆地灯影组天然气主要为原油裂解气, 具有源外古油藏裂解和源内滞留烃裂解^[34-40]两种来源, 其中安岳气田源外原油裂解气占总生气量 66.5%^[6], 因此, 规模古油藏发育区常是现今油气勘探的有利目标^[30-31]。YS1 井灯四段储层普遍见焦沥青充填(图 5), 累积地层厚度大于 259 m。岩心和薄片统计的沥青含量加权平均值 3.10%, 指示灯四段曾发生大

规模古原油充注, 现今演化为气藏。

元坝东部通南巴地区 RT1 井、MS1 井台内丘滩储层的沥青含量加权平均值分别为 1.25% 和 0.77%, 说明台内也发育古油藏, 但规模显著低于 YS1 井台缘带。一方面, 这可能与台内丘滩储层厚度较小有关, 另一方面台内相区主要为“上生下储”的源储配置方式, 油气成藏效率较低。此外, 通南巴地区虽然发育古油藏, 但是 RT1、MS1 井现今含气性较差, 均为含气水层, 可能与生油期、生气期古构造位置较低、油气易于向高部位逸散有关。

5.3 油气成藏过程

元坝灯影组气藏形成时间早, 伴随着构造埋藏演变, 经历了油藏期、气藏期、油气转换期及现今气藏等多个阶段。包裹体测温结合川北地区埋藏史—热史—生烃史模型可以用来确定油气成藏时间。第一期与沥青包裹体伴生盐水包裹体均一温度 100~157℃, 平均 130.1℃, 盐度在 17.34%~23.11%, 平均 21.95%, 代表了主生油期充注温度; 第二期与甲烷气包裹体均一温度

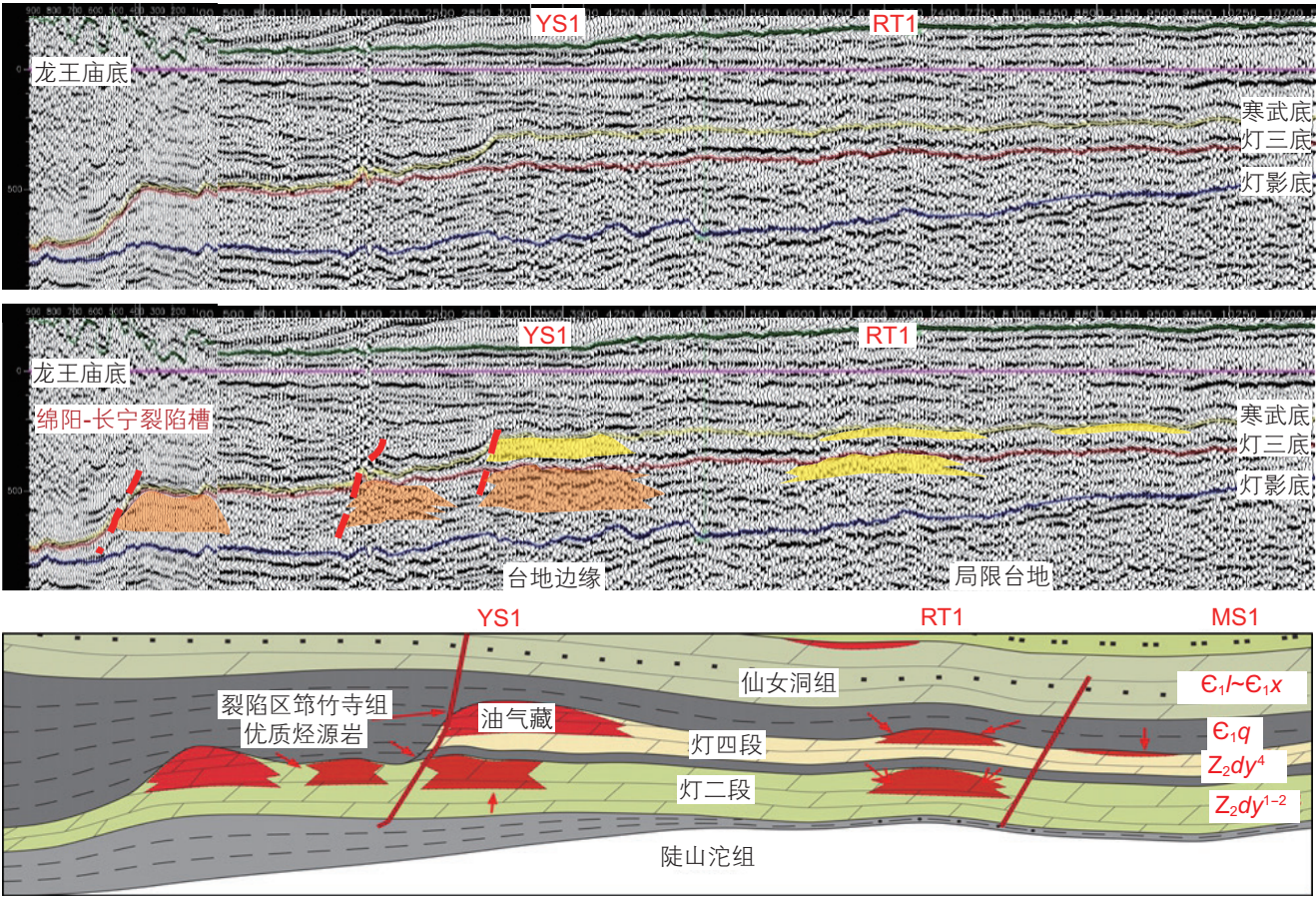


图 10 元坝地区灯四段油气成藏模式

Fig. 10 Hydrocarbon accumulation model for the fourth member of the Dengying Formation in Yuanba Area

在 168~210 °C, 平均 193.6 °C, 盐度在 4.65%~7.17%, 平均 6.01%, 代表了主裂解气期充注温度; 第三期与晚期甲烷气包裹体均一温度在 240~246 °C, 平均 244 °C, 盐度在 12.05%~12.16%, 平均 12.08%, 该期包裹体温度高, 代表了晚期调整气期充注温度(图 11)。

(1) 油藏期

晚二叠世—中三叠世, 川北地区筇竹寺组烃源岩处于主生油期, 此时, 台地边缘区古地貌高于烃源岩区, 因此, 烃源岩生成的大量原油自西至东、由上至下充注至灯四段储层; 受川中古隆起的影响, 元坝地区位于川中古隆起斜坡区, 整体显示出南高北低的古地貌特征(图 12a), 因此, 元坝台缘丘滩储层内的原油有进一步向南运移至川中古隆起的趋势, 但是受滩间致密岩性体侧向封堵的控制形成规模性岩性古油藏。

现今储层内沥青及沥青包裹体含量非常丰富, 指示了古油藏的存在。盐水包裹体均一温度为 100~150 °C, 说明元坝地区灯影组形成大型古油藏的时间介于晚二叠世—中三叠世。

(2) 油气藏转换期

中—晚三叠世盆地北部的米仓山开始褶皱隆升, 川北南江地区地貌持续升高, 而元坝—阆中地区则位于川中古隆、汉南古陆夹持凹陷区。然而, 元坝与阆中地区的相对地貌却发生了转换: 元坝地区处于米仓山斜坡区局部隆起区, 古地貌相对高于阆中地区(图 12b)。此时, 南江地区烃源灶仍处于主生油期, 位于盆缘高部位的南江古油藏不仅接受筇竹寺组烃源岩充注的油气, 还接受低部位古油藏再调整发生的油气充注; 元坝地区烃源灶进入裂解气时期, 形成受局部构

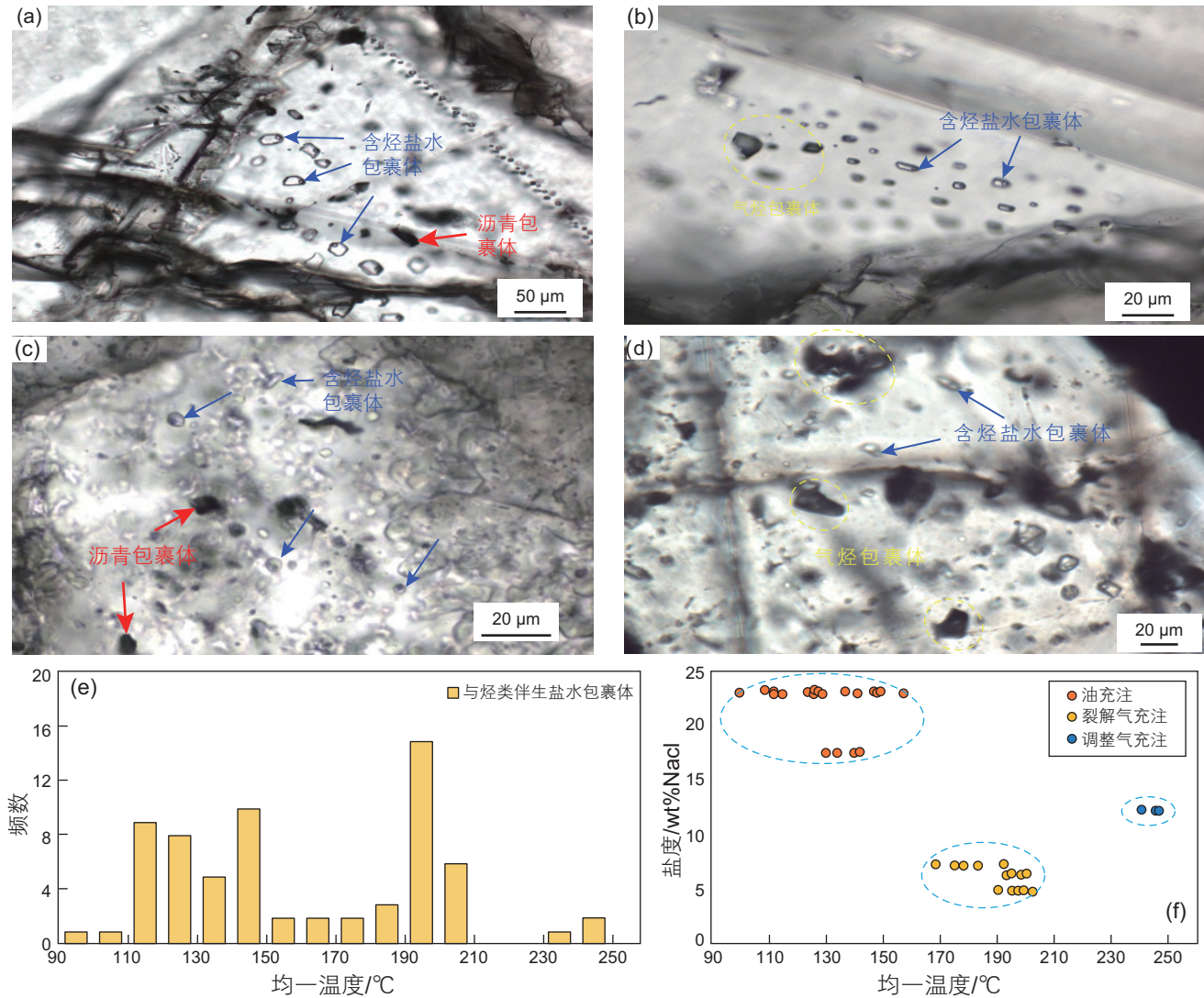


图 11 YS1 灯四段包裹体特征、均一温度直方图及均一温度和盐度关系图

Fig. 11 Histogram of homogenization temperature of inclusions in the fourth member of the Dengying Formation and the relationship diagram between homogenization temperature and salinity

造和岩性共同控制的古油气藏。

(3)气藏期

中侏罗世—早白垩世阶段，随着地层快速深埋，此时元坝地区筇竹寺组烃源岩 R_o 超过 2.0%，南江地区烃源灶进入主裂解气期，原油原位裂解生气，在有利古构造区形成古气藏。该时期米仓山强烈造山活动导致南北构造高度差增大，低部位天然气向高部位调整运移；元坝地区气藏期的构造形态与油气转化期基本相同，仍然处于米仓山隆起斜坡区的局部隆起(图 13)，储层中气包裹体丰富，包裹体均一温度为 168~210℃，

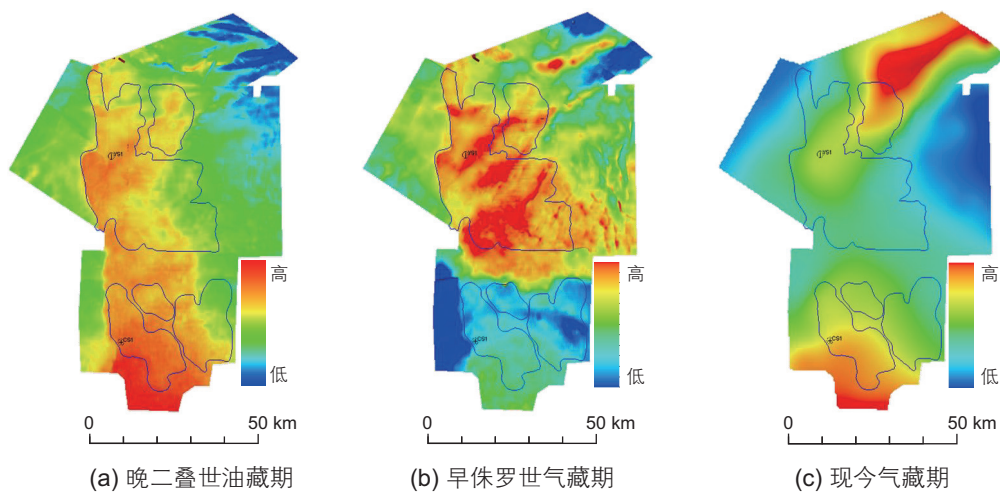


图 12 元坝—阆中地区灯四段成藏关键期灯影组顶部古构造图

Fig. 12 Key paleo-structures of the top surface of the Dengying Formation during hydrocarbon accumulation in the Yuanba — Langzhong Areas

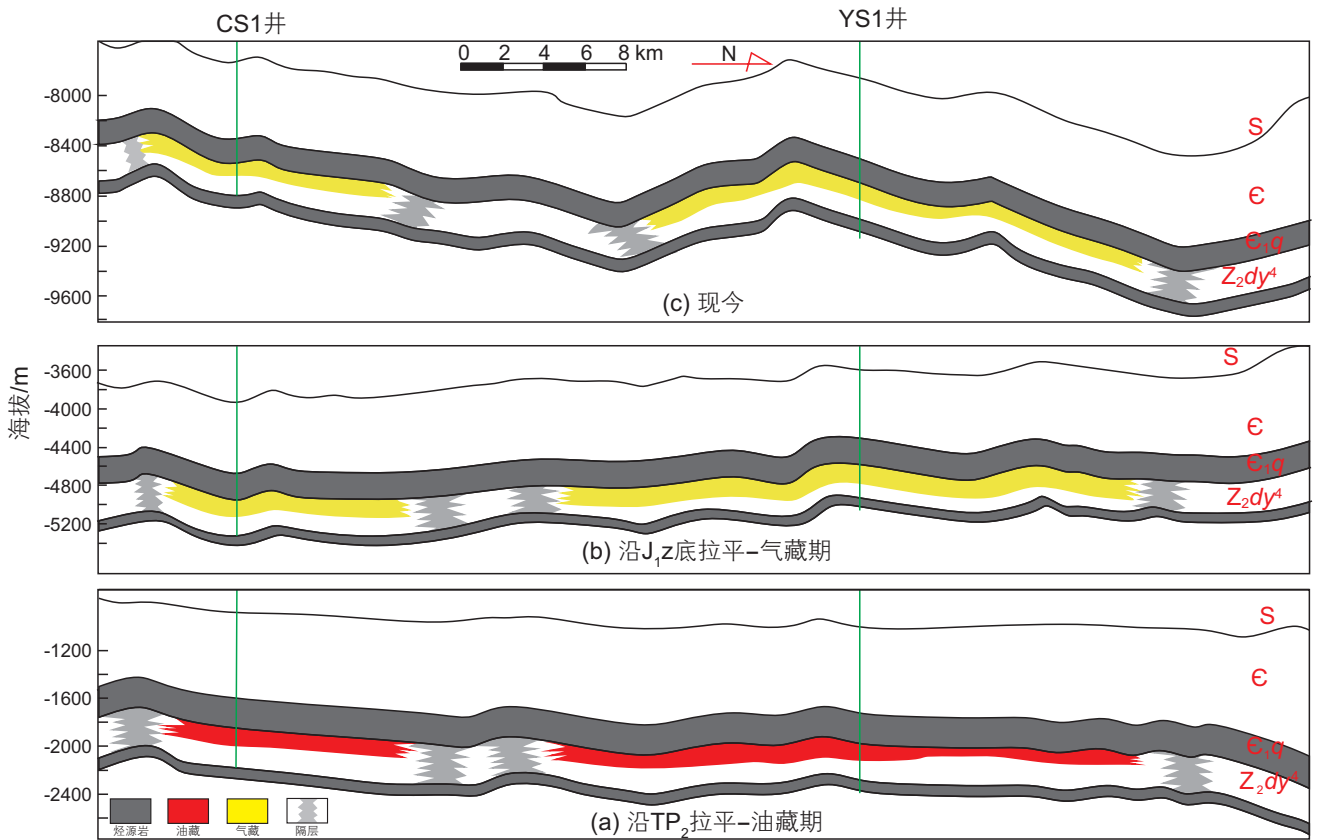


图 13 川北阆中—元坝—九龙山灯影组成藏演化剖面

Fig. 13 Evolution process of oil and gas accumulation of the Dengying Formation in the Langzhong-Yuanba-Jiulongshan of the northern Sichuan region

气藏压力系数达 1.89, 灯四段古气藏持续保持。

(4) 气藏调整期—现今

晚燕山—喜山期, 盆缘古陆构造联合挤压, 形成现今构造, 元坝南部处于构造最低部位, 阆中及元坝北部相对隆升(图 12c), 灯四段古气藏发生局部调整, 天然气向元坝北部及九龙山高部位调整运聚。同时, 此阶段的筇竹寺组烃源岩等效 R_o 演化至 5.06%, 进入石墨化阶段^[41-43], 失去向元坝灯四段气藏持续供烃的能力, 但筇竹寺组作为区域盖层则持续有效, 部分气藏保存至今, YS1 井测试获天然气。

综合分析认为, 川北超深层高过成熟的筇竹寺组烃源岩经历了渐进埋藏生烃过程, 元坝灯四段经历了古油藏、古油气藏、古气藏及现今气藏 4 个阶段(图 13), 气藏持续保存至今。针对超深层勘探应以寻找大型规模古油藏为目标, 同时关键成藏时期古构造位置和持续的保存条件是油气富集的关键。

6 结论

1) 元坝地区灯四段气藏现今埋深近 9000 m, 其烃

源岩主要来自寒武系筇竹寺组, 晚二叠世—三叠纪进入主生油期和裂解气初期, 至中侏罗—早白垩世达到高一过成熟阶段, 进入主裂解气时期, 目前处于过成熟阶段。

2) 灯四段气藏储层主要为台缘丘滩相白云岩储层, 其经历了长期压实、压溶和深埋胶结, 现今表现为低孔、低渗的特征; 台缘丘滩储层紧邻筇竹寺组优质烃源岩, 具有“棚生缘储, 上生下储”的有利源储配置条件, 为大规模古油气藏的形成提供了基础。

3) 川北地区灯四段—筇竹寺组烃源灶经历了至少四期油气成藏: 志留纪烃源灶普遍进入低成熟阶段, 开始生低熟油; 晚二叠世—三叠纪, 烃源灶达到中—高成熟阶段, 进入主生油期和裂解气初期; 中侏罗世—早白垩世, 达到高一过成熟阶段, 进入主裂解气时期; 晚燕山—喜山期, 气藏调整充注, 现今仍然具有较好含气性。因此, 超深层油气藏勘探应以寻找大规模古油藏为目标, 落实成藏关键时期古构造特征及油气运聚指向区, 持续的保存条件和古今构造高部位叠合有利区是油气调整富集关键。

参考文献

- [1] 马永生, 蔡勋育, 黎茂稳, 等. 深层—超深层海相碳酸盐岩成储成藏机理与油气藏开发方法研究进展[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 692–707. [MA Y S, CAI X Y, LI M W, et al. Research advances on the mechanisms of reservoir formation and hydrocarbon accumulation and the oil and gas development methods of deep and ultra-deep marine carbonates[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 692–707.]
- [2] 郭旭升. 加强勘探理论技术攻关迈向油气能源科技强国[J]. 中国石化, 2024, 3: 17–20. [GUO X S. Strengthen exploration theory and technology research to move towards a powerful country in oil and gas energy science and technology[J]. Sinopec, 2024, 3: 17–20.]
- [3] 何登发, 贾承造, 赵文智, 等. 中国超深层油气勘探领域研究进展与关键问题[J]. 石油勘探与开发, 2023, 50(6): 1162–1172. [HE D F, JIA C Z, ZHAO W Z, et al. Research progress and key issues of ultra-deep oil and gas exploration in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2023, 50(6): 1162–1172.]
- [4] 黄娟, 叶德燎, 韩彧. 超深层油气藏石油地质特征及其成藏主控因素分析[J]. 石油实验地质, 2016, 38(5): 635–640. [HUANG J, YE D L, HAN Y. Petroleum geological characteristics and main controlling factors of ultra-deep oil and gas reservoirs[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2016, 38(5): 635–640.]
- [5] 贾承造. 含油气盆地深层—超深层油气勘探开发的科学技术问题[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2023, 47(5): 1–12. [JIA C Z. Scientific and technological issues in deep and ultra-deep oil and gas exploration and development in petroliferous basins[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2023, 47(5): 1–12.]
- [6] 关晓东, 郭磊. 深层—超深层油气成藏研究新进展及展望[J]. 石油实验地质, 2023, 45(2): 203–209. [GUAN X D, GUO L. New progress and prospects of deep and ultra-deep hydrocarbon accumulation research[J]. Petroleum Geology & Experiment, 2023, 45(2): 203–209.]
- [7] 李建忠, 陶小晚, 白斌, 等. 中国海相超深层油气地质条件、成藏演化及有利勘探方向[J]. 石油勘探与开发, 2021, 48(1): 52–67. [LI J Z, TAO X W, BAI B, et al. Geological conditions, hydrocarbon accumulation evolution and favorable exploration directions of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 52–67.]
- [8] 张荣虎, 曾庆鲁, 王珂, 等. 储层构造动力成岩作用理论技术新进展与超深层油气勘探地质意义[J]. 石油学报, 2020, 41(10): 1278–1292. [ZHANG R H, ZENG Q L, WANG K, et al. New progress in the theory and technology of reservoir tectonic dynamic diagenesis and its geological significance for ultra-deep oil and gas exploration[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(10): 1278–1292.]

- [9] WU L L, LIAO Y H, FANG Y X, et al. The comparison of biomarkers released by hydropyrolysis and Soxhlet extraction from source rocks of different maturities[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(3): 373–383.
- [10] HUANG X W, JIN Z J, LIU Q Y, et al. Catalytic hydrogenation of post-mature hydrocarbon source rocks under deep-derived fluids: An example of early Cambrian Yurtus Formation, Tarim Basin, NW China[J]. Frontiers in Earth Science, 2021, 9: 626111.
- [11] HUANG H, ZHANG S, SU J. Palaeozoic oil-source correlation in the Tarim Basin, NW China: A review[J]. Organic Geochemistry, 2016, 94: 32–46.
- [12] 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 C Z, ZHANG S Z. Formation of marine ultra-deep oil and gas in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2023, 97(9): 2775–2801.]
- [13] 李毕松, 代林呈, 朱祥, 等. 四川盆地震旦系灯影组沉积储层特征与勘探前景[J]. 地球科学, 2023, 48(8): 2915–2932. [LI B S, DAI L C, ZHU X, et al. Sedimentary reservoir characteristics and exploration prospects of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2023, 48(8): 2915–2932.]
- [14] 周刚, 文龙, 王文之, 等. 川东高陡构造带震旦系灯影组丘滩相气藏预测[J]. 天然气勘探与开发, 2023, 46(3): 1–13. [ZHOU G, WEN L, WANG W Z, et al. Prediction of mound-shoal facies gas reservoirs of Sinian Dengying Formation in the high and steep structural belt of eastern Sichuan[J]. Natural Gas Exploration and Development, 2023, 46(3): 1–13.]
- [15] CHEN Z, SIMONEIT B, WANG T, et al. Biomarker signatures of Sinian bitumens in the Moxi-Gaoshiti Bulge of Sichuan Basin, China: Geological significance for paleo-oil reservoirs[J]. Precambrian Research, 2017, 296: 1–19.
- [16] 邓宾, 吴娟, 李文正, 等. 烃类包裹体赋存碳酸盐矿物 U-Pb 定年及其在油气成藏期次研究中的应用——以川中震旦系灯影组为例[J]. 天然气地球科学, 2023, 34(11): 1887–1898. [DENG B, WU J, LI W Z, et al. U-Pb dating of carbonate minerals hosting hydrocarbon inclusions and its application in the study of hydrocarbon accumulation stages: A case study of Sinian Dengying Formation in central Sichuan[J]. Natural Gas Geoscience, 2023, 34(11): 1887–1898.]
- [17] SU A, CHEN H, FENG Y, et al. In situ U-Pb dating and geochemical characterization of multi-stage dolomite cementation in the Ediacaran Dengying Formation, central Sichuan Basin, China: Constraints on diagenetic, hydrothermal and paleo-oil filling events[J]. Precambrian Research, 2022, 368: 106481.
- [18] 杨毅, 朱祥, 金民东, 等. 川北地区灯四段台内丘滩储层特征及主控因素[J]. 天然气技术与经济, 2023, 17(3): 24–31. [YANG Y, ZHU X, JIN M D, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of intra-platform mound-shoal in the fourth member of Dengying Formation in northern Sichuan[J]. Natural Gas Technology and Economy, 2023, 17(3): 24–31.]
- [19] 金民东, 李毕松, 朱祥, 等. 四川盆地东北部元坝地区及周缘震旦系灯影组四段储集层特征及主控因素[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(6): 1090–1099. [JIN M D, LI B S, ZHU X, et al. Reservoir characteristics and main controlling factors of the fourth member of Sinian Dengying Formation in Yuanba Area and its periphery in northeastern Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1090–1099.]
- [20] 杨佳佳, 孙玮琳, 徐学敏, 等. 高演化烃源岩岩石热解和总有机碳标准物质研制[J]. 地质学报, 2020, 94(11): 3515–3522. [YANG J J, SUN W L, XU X M, et al. Development of reference materials for rock pyrolysis and total organic carbon of highly evolved source rocks[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(11): 3515–3522.]
- [21] 饶松, 朱传庆, 王强, 等. 四川盆地震旦系一下古生界烃源岩热演化模式及主控因素[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1549–1559. [RAO S, ZHU C Q, WANG Q, et al. Thermal evolution models and main controlling factors of Sinian-Lower Paleozoic source rocks in Sichuan Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1549–1559.]
- [22] 胡圣标, 汪集旸. 沉积盆地热体制研究的基本原理和进展[J]. 地学前缘, 1995, 2(4): 171–180. [HU S B, WANG J Y. Basic principles and progress in the study of thermal regime of sedimentary basins[J]. Earth Science Frontiers, 1995, 2(4): 171–180.]
- [23] HE L, XU H, WANG J. Thermal evolution and dynamic mechanism of the Sichuan Basin during the Early Permian-Middle Triassic[J]. Science China Earth Science, 2011, 54: 1948–1954.
- [24] 刘一锋, 邱楠生, 谢增业, 等. 川中古隆起震旦系一下寒武统温压演化及其对天然气成藏的影响[J]. 沉积学报, 2014, 32(3): 601–610. [LIU Y F, QIU N S, XIE Z Y, et al. Temperature-pressure evolution of Sinian-Lower Cambrian in central Sichuan paleo-uplift and its influence on natural gas accumulation[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2014, 32(3): 601–610.]
- [25] 王铁冠, 戴世峰, 李美俊, 等. 塔里木盆地台盆区地层有机质热史及其对区域地质演化研究的启迪[J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40(10): 1331–1341. [WANG T G, DAI S F, LI M J, et al. Thermal history of organic matter in strata of the platform-basin region of the Tarim Basin and its enlightenment to the study of regional geological evolution[J]. Science China Earth Science, 2010, 40(10): 1331–1341.]
- [26] ZHANG B, ZHAO Z, ZHANG S C, et al. Discussion on marine source rocks thermal evolution patterns in the Tarim Basin and Sichuan Basin, west China[J]. Chinese Science Bulletin 2007, 52(A1): 141–149.
- [27] 段金宝, 梅庆华, 李毕松, 等. 四川盆地震旦纪—早寒武世构造—沉积演化过程[J]. 地球科学, 2019, 44(3): 738–755. [DUAN J B, MEI Q H, LI B S, et al. Tectonic-sedimentary evolution process of Sinian-Early Cambrian in Sichuan Basin[J]. Earth Science, 2019, 44(3): 738–755.]

- [28] 李忠权, 刘记, 李应, 等. 四川盆地震旦系威远—安岳拉张侵蚀槽特征及形成演化[J]. 石油勘探与开发, 2015, 42(1): 26–33. [LI Z Q, LIU J, LI Y, et al. Characteristics and formation evolution of Weiyuan-Anyue extensional-erosion trough in Sinian, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(1): 26–33.]
- [29] 何登发. 中国多旋回叠合沉积盆地的形成演化、地质结构与油气分布规律[J]. 地学前缘, 2022, 29(6): 24–59. [HE D F. Formation and evolution, geological structure and hydrocarbon distribution law of multi-cycle superimposed sedimentary basins in China[J]. Earth Science Frontiers, 2022, 29(6): 24–59.]
- [30] 丁一, 刘树根, 文龙, 等. 中上扬子地区震旦纪灯影组沉积期碳酸盐岩台地古地理格局及有利储集相带分布规律[J]. 沉积学报, 2024, 42(3): 928–943. [DING Y, LIU S G, WEN L, et al. Paleogeographic pattern of carbonate platform and distribution law of favorable reservoir facies belts during Sinian Dengying Formation sedimentary period in the middle and upper Yangtze region[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(3): 928–943.]
- [31] DING Y, CHEN D, ZHOU X, et al. Tectono-depositional pattern and evolution of the middle Yangtze Platform (south China) during the Late Ediacaran[J]. Precambrian Research, 2019, 333: 105426.
- [32] ZHU M, ZHANG J, Yang A, et al. Sinian-Cambrian stratigraphic framework for shallow- to deep-water environments of the Yangtze Platform: An integrated approach[J]. Progress in Natural Science, 2004, 13(12): 75–84.
- [33] 王广伟. 白云岩化作用与白云岩孔隙的形成—来自实验模拟交代反应的启示[J]. 沉积学报, 2024, 42(2): 632–642. [WANG G W. Dolomitization and dolomite pore formation: Insights from experimentally simulated replacement[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2024, 42(2): 632–642.]
- [34] 李剑, 马卫, 王义凤, 等. 腐泥型烃源岩生排烃模拟实验与全过程生烃演化模式[J]. 石油勘探与开发, 2018, 45(3): 445–454. [LI J, MA W, WANG Y F, et al. Simulation experiment of hydrocarbon generation and expulsion from sapropelic source rocks and the whole-process hydrocarbon generation evolution model[J]. Petroleum Exploration and Development, 2018, 45(3): 445–454.]
- [35] 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 W Z, WANG Z Y, ZHANG S C, et al. Proposal of the “relay generation of gas from organic matter” model and its significance in exploration[J]. Petroleum Exploration and Development, 2005, 32(2): 1–7.]
- [36] 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 W Z, WANG Z Y, WANG D L, et al. The status and significance of dispersed liquid hydrocarbon accumulation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2015, 42(4): 401–413.]
- [37] DOMINÉ F, ENGUEHARD F O. Kinetics of hexane pyrolysis at very high pressures: Part 3 Application to geochemical modeling[J]. Organic Geochemistry, 1992, 18(1): 41–49.
- [38] GUO X, HE S, LIU K, et al. Quantitative estimation of overpressure caused by oil generation in petroliferous basins[J]. Organic Geochemistry, 2011, 42(11): 1343–1350.
- [39] ROBERT R B, GANGI A F. Primary migration by oil-generation microfracturing in low-permeability source rocks: Application to the Austin Chalk, Texas[J]. AAPG Bulletin, 1999, 83(5): 727–756.
- [40] NAN S. Gaseous hydrocarbons generated during pyrolysis of petroleum source rocks using unconventional grain-size: Implications for natural gas composition[J]. Organic Geochemistry, 2000, 31(12): 1409–1418.
- [41] 姜华, 李文正, 黄士鹏, 等. 四川盆地震旦系灯影组跨重大构造期油气成藏过程与成藏模式[J]. 天然气工业, 2022, 42(5): 11–23. [JIANG H, LI W Z, HUANG S P, et al. Hydrocarbon accumulation process and accumulation model of Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin across major tectonic periods[J]. Natural Gas Industry, 2022, 42(5): 11–23.]
- [42] 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. [GUO X S, HU Z Q, LI S J, 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.]
- [43] 朱联强, 柳广弟, 宋泽章, 等. 川中古隆起北斜坡不同地区灯影组天然气差异及其影响因素——以蓬探1井和中江2井为例[J]. 石油科学通报, 2021, 6(3): 344–355. [ZHU L Q, LIU G D, SONG Z Z, et al. The differences in natural gas from the Dengying Formation in different areas of the north slope of the central Sichuan Paleo-uplift and its controlling factors: Taking Pengtan-1 and Zhongjiang-2 wells as examples[J]. Petroleum Science Bulletin, 2021, 6(3): 344–355.]

(编辑 付娟娟)

第一及通信作者: 张雷(1990年—), 硕士, 工程师, 主要从事四川盆地海相碳酸盐岩沉积储层等方面研究, 530286149@qq.com。