引用格式：王炳森，袁海锋，王涛，等.2026.川中蓬莱地区震旦系灯影组四段储层成岩作用、孔隙演化及油气充注[J].沉积学报，44(1):182-200.
WANG BingSen, YUAN HaiFeng, WANG Tao, et al. 2026. Reservoir Diagenesis, Pore Evolution and Oil and Gas Charging in the Fourth Member of the Sinian Dengying Formation in the Penglai Area, Central Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 44(1): 182-200.
DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2024.012 **CSTR**: 32268.14/j.cjxb.62-1038.2024.012

川中蓬莱地区震旦系灯影组四段储层成岩作用、孔隙演化及油气充注

王炳森[1,2]，袁海锋[1,2]，王涛[1,2]，谭谦[1,2]，张风顺[1,2]
1.油气藏地质及开发工程全国重点实验室(成都理工大学)，成都 610059
2.成都理工大学能源学院，成都 610059

摘 要 **【目的】**川中蓬莱地区灯影组已获得重大勘探突破，但灯影组四段(灯四段)储层埋深大、时代老、成岩演化过程复杂，经历了多期次油气充注，储层孔隙演化与油气充注关系尚不清楚。**【方法】**基于区内钻井取心资料，通过薄片观察、阴极发光、原位微区元素分析、流体包裹体等手段对灯四段储层岩石学类型、储集空间特征、成岩作用类型、成岩演化序列、孔隙演化与油气充注关系进行了研究。**【结果】**蓬莱地区灯影组四段储层岩石类型主要为晶粒白云岩、颗粒白云岩和微生物白云岩三类；储集空间类型可划分为溶洞、孔隙和裂缝三种类型；主要成岩作用类型有同生—准同生期溶蚀作用、表生期溶蚀作用、埋藏溶蚀作用、胶结充填作用、构造破裂作用、硅化作用和压实压溶作用。不同阶段的成岩作用共同控制了灯四段储层孔隙演化，其中对储层起建设性成岩作用为各时期溶蚀作用、破裂作用，对储层形成起破坏性成岩作用的为压实压溶作用、胶结充填作用。**【结论】**灯四段储层溶蚀孔洞中胶结物充填序列可划分为：第Ⅰ世代叶片状白云石→第Ⅱ世代粉晶白云石→第Ⅰ期沥青→第Ⅲ世代细晶白云石→第Ⅳ世代中晶白云石→第Ⅴ世代粗晶白云石→第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石→第Ⅱ期沥青→第Ⅶ世代石英、萤石等矿物。根据各期次胶结充填物所捕获的流体包裹体的类型、相态、均一温度等信息，重建了蓬莱地区灯四段油气充注过程：志留纪中晚期古油藏充注(第Ⅰ期古油藏)→加里东晚期古油藏破坏→中三叠世古油藏充注(第Ⅱ期古油藏)→晚侏罗世古油藏裂解生气→晚白垩世至今古油气藏—气藏的调整与定型，其中晚期油裂解气→气态烃的充注是灯影组四段气藏的主要形成期。

关键词 蓬莱地区；灯影组；成岩作用；孔隙演化；油气充注

第一作者 王炳森，男，2000年出生，硕士研究生，地质资源与地质工程，E-mail: 2209489684@qq.com
通信作者 袁海锋，男，教授，E-mail: yuanhaifeng08@cdut.cn

中图分类号：P618.13 **文献标志码**：A **文章编号**：1000-0550(2026)01-0182-19

0 引言

四川盆地自20世纪60年代发现威远气田以来，之后的40年未取得重大突破(魏国齐等，2017)。2011年，随着安岳特大型气田的发现，掀起了川中震旦系—寒武系油气勘探的高潮(徐春春等，2014；邹才能等，2014)。同时，绵阳—长宁拉张槽的发现使得勘探重点区由古隆起高部位向拉张槽两侧转移。蓬莱地区位于高磨地区北部，其大面积发育的台缘丘滩体为灯影组圈闭形成提供了良好的条件。近年来，蓬莱地区PS1井灯影组四段(灯四段)测试获得天然气产量3.4×10^4 m^3/d(杨雨等，2022)，JT1井钻揭灯四段丘滩优质储层厚度达166.6 m，测井解释气层8层，厚101 m(谢增业等，2021)，证实了蓬莱地区灯四段具备形成大型岩性气藏的条件。

目前四川盆地灯影组研究在沉积特征、储层特征及成岩作用方面，取得显著进展。灯影组优质储层广泛发育(刘树根等，2007；许海龙等，2012)，蓬莱地区台地边缘微生物丘滩为灯影组形成优质储层提供了物质基础，与颗粒滩沉积相关的藻白云岩类，特别是藻叠层白云岩是最主要的储集岩类型(文龙等，2017)。灯影组白云岩的形成与微生物相关的云化

收稿日期：2023-11-16；**修回日期**：2024-01-21；**录用日期**：2024-03-08；**网络出版日期**：2024-03-08
基金项目：国家自然科学基金项目(41572133，41872130)

作用有关(金民东等,2019),大体可将白云岩分为晶粒云岩、粒屑云岩和藻云岩三大类(陈艺娴等,2021;罗青云等,2023)。但灯影组储层发育的控制因素具有多样性及复杂性,其中与构造相关的表生岩溶作用(宋金民等,2013;杨威等,2014),与热液有关的溶蚀作用及溶蚀改造(Davies and Smith,2006;朱东亚等,2014;蒋裕强等,2017),同生期—准同生期溶蚀作用(张玺华等,2023)等,这些成岩作用与灯影组的储层形成密切相关,但不同成岩阶段储层中的成岩流体对储层的改造较为复杂。不同学者对蓬莱地区灯影组油气充注也持有不同观点:有学者认为研究区灯影组只经历二叠纪—三叠纪末期古油藏成藏阶段(解楠等,2023),有学者认为研究区灯影组经历了两期古油藏成藏阶段,分别为志留纪末期和三叠纪中晚期(范俊佳等,2022)。然而,目前针对灯影组孔洞中的胶结充填物以及其代表的成岩流体信息与油气成藏过程的关系研究较少,因此明确研究区灯四段复杂成藏过程及成岩作用、孔隙演化特征,理清灯四段成岩过程中孔隙演化特征对分析其成藏—成岩耦合关系具有重要意义。

以四川盆地川中古隆起北斜坡蓬莱地区灯四段为例,通过钻井岩心观察、薄片鉴定分析了蓬莱地区灯四段的成岩序列,综合阴极发光、原位微区地球化学分析讨论了灯四段储层孔隙中胶结充填作用不同期次特征,结合流体包裹体特征研究灯四段的油气充注过程,以期为蓬莱地区油气勘探提供借鉴。

1　地质背景

蓬莱地区西起德阳市中江县,东至阆中市仪陇县,北至绵阳梓潼县和遂宁市射洪市,南靠遂宁市,面积约为2×10^4 km^2。从构造位置看,蓬莱地区位于川中古隆起北部,整体为北倾大型单斜构造,其南部紧邻安岳气田,西侧紧邻德阳—安岳裂陷槽,北侧以九龙山为界(杨雨等,2022)。蓬莱地区经历了多期构造运动,在加里东期和印支期存在两期沉积间断(马奎等,2022)。灯影组沉积末期,受桐湾运动的影响,磨溪以北发生明显的隆升作用,随着加里东运动的持续影响,导致奥陶系、寒武系在蓬莱地区部分缺失;至海西晚期,上扬子地区发生克拉通内伸展裂陷作用,蓬莱地区开始下沉形成单斜构造;印支晚期至现今,受川西龙门山逆冲推覆构造运动的影响,最终形成现今的低幅斜坡构造(沈安江等,2021;范俊佳等,2022)。

灯影组沉积期,由于桐湾运动影响,四川盆地川中—川北地区发育德阳—安岳裂陷槽,灯影组一、二段沉积时期裂陷槽具有“U”型特征,向南消失于威远附近,灯四段沉积期,裂陷槽则贯穿全盆。围绕裂陷槽东西两侧发育台缘带,台缘带东侧为局限台地沉积。

蓬莱地区灯影组位于裂陷槽北段东侧,为一套台地相沉积的碳酸盐岩,厚度介于650~1 000 m,发育潮坪、台内滩、台缘滩、藻丘、潟湖、局限海盆或者深水陆棚(图1a);区内藻类生物较繁盛,广泛发育微生物白云岩(方少仙等,2003;郭恒玮等,2022),根据岩性灯影组自下而上可分为四段:灯四段以藻纹层、砂屑和藻凝块白云岩沉积为主;灯三段以泥质白云岩、泥晶白云岩为主,含少量砂屑白云岩;灯二段以藻叠层白云岩、藻砂屑白云岩和泥晶白云岩为主;灯一段以颗粒白云岩及泥晶白云岩为主(图1b)。区内丘滩体大量发育,为蓬莱地区灯影组四段储层的发育奠定了重要的基础。

2　样品及方法

灯四段白云岩样品均来自蓬莱地区钻井岩心,选样时选择取心井取心段不同岩性及孔洞中胶结充填物发育期次明显的样品。对现象明显的样品进行200余片包裹体片磨制观察后,选择白云石期次清楚的50余片薄片进行阴极发光分析,然后选择阴极发光下白云石胶结期次发育较多的20余片薄片进行原位微区元素分析,最后进行包裹体测温分析。

薄片及阴极发光(CL)分析均在成都理工大学国家重点实验室完成,阴极发光所用仪器为CL8200 MK5阴极发光仪,检测标准依据SY/T 5916—2013岩石矿物阴极发光鉴定方法;原位激光微区分析于成都创源微谱科技有限责任公司实验室完成,实验仪器为LA-ICP-MS,LA-ICP-MS由RESOlution LR 193 nm ArF准分子激光剥蚀系统和Thermo iCAP TQ组成,实验所得的稀土元素结果通过澳大利亚太古代页岩(PAAS)进行标准化处理;包裹体测温在北京核工业地质研究院完成,实验仪器为LINKAM THMS600型冷热台。

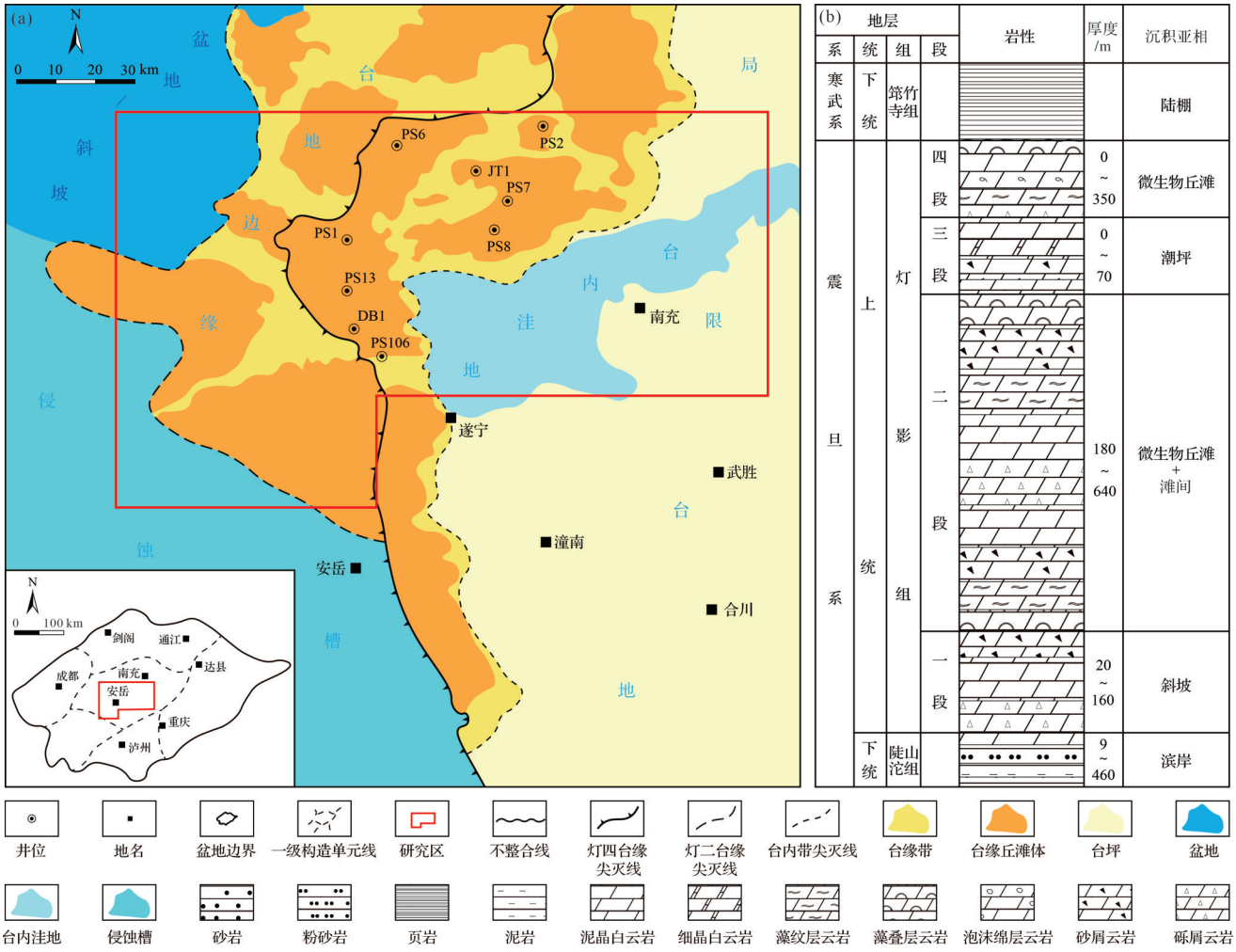


图1 川中蓬莱地区灯影组沉积相图及地层特征示意图(据杨雨等,2022修改)

Fig.1 Sedimentary facies and stratigraphic characteristics of the Dengying Formation in the Penglai area, central Sichuan Basin (modified from Yang *et al*., 2022)

3 储层岩石学及储集空间类型

3.1 储层岩石学

观察了PS13井、PS1井、PS2井等5口井灯四段取心段岩心,根据镜下薄片观察,统计了取心段的沥青含量及沥青充填程度,划分了取心段的成岩相,并绘制了其取心段综合柱状图(图2)。根据镜下及岩心观察,结合Folk和张荫本的分类方案(Folk,1959;张荫本等,1996),可将蓬莱地区灯四段白云岩划分为晶粒白云岩、颗粒白云岩和微生物白云岩三类。其中,晶粒白云岩以晶粒大小可划分为泥晶白云岩及粉晶白云岩;颗粒白云岩主要为砂屑白云岩、砾屑白云岩及凝块石白云岩;微生物白云岩主要为藻纹层白云岩、藻叠层白云岩、泡沫绵层状白云岩。

由于灯四段台缘丘滩体发育,储层中微生物白云岩占主要部分(65%),颗粒白云岩其次(20%)(杨威等,2022),在白云岩沉积过程中,藻类生物大量生长,形成大量的微生物格架孔,这些格架孔在后期成岩演化过程中被充填和改造,是灯四段储集空间形成的基础。

3.2 储集空间类型

由于灯四段时代老、埋深大,经历多期构造运动,成岩演化历史复杂,形成了多样的储集空间类型,储层中原生孔隙作为储集空间的基础,在后期成岩作用中接受改造,形成溶孔、溶洞和裂缝(图3)。根据岩心描述、镜下观察,可将研究区灯四段储集空间类型划分为溶洞、孔隙和裂缝三种类型。

溶洞是直径大于2 mm的孔隙,灯四段的溶洞多为早期孔隙遭受成岩作用溶蚀改造形成,在岩心上较为常见(图3a,b),作为有效孔隙为油气运移聚集

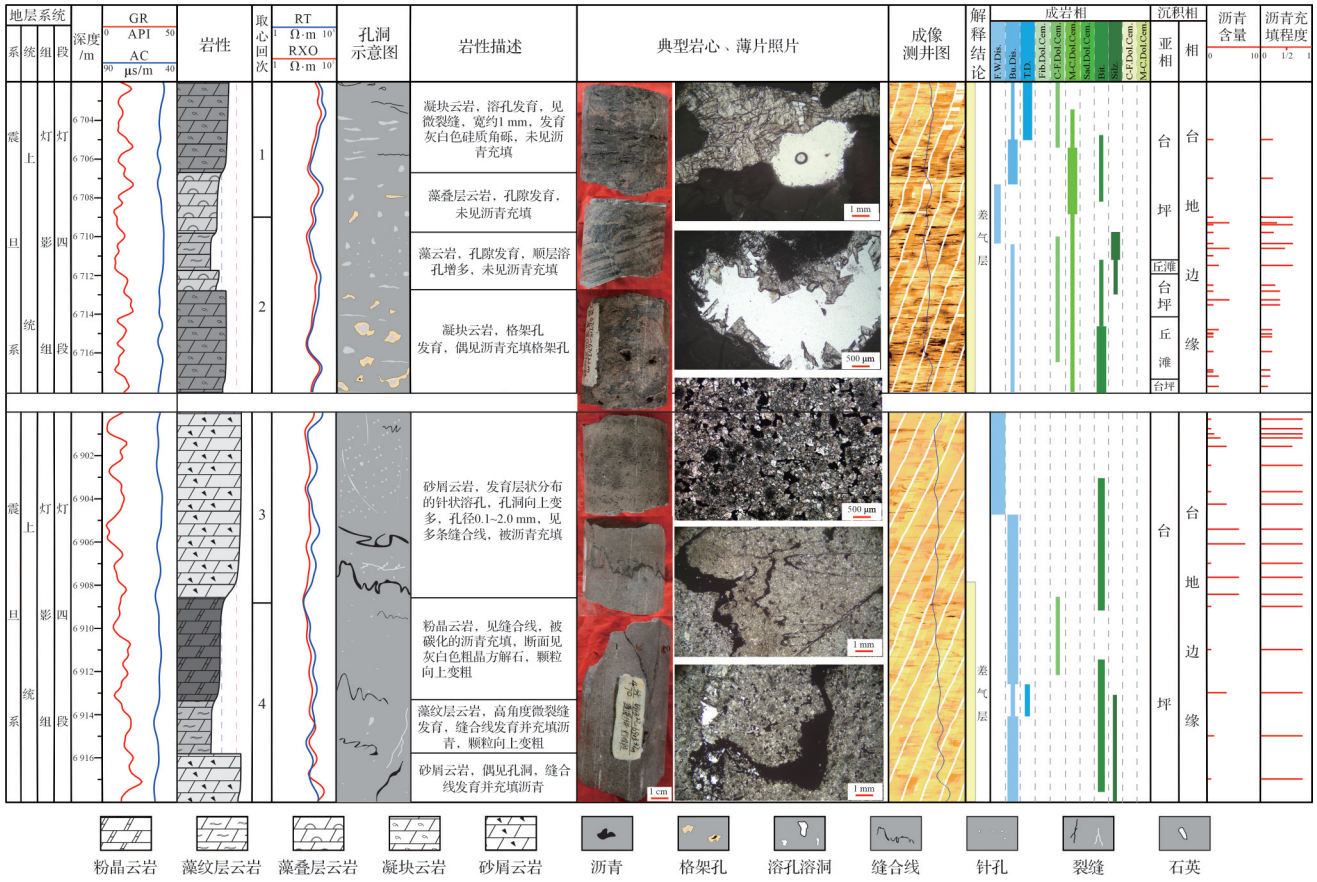


图2　蓬莱地区PS13井取心段综合柱状图

Fig.2　Comprehensive coring histogram for well PS13

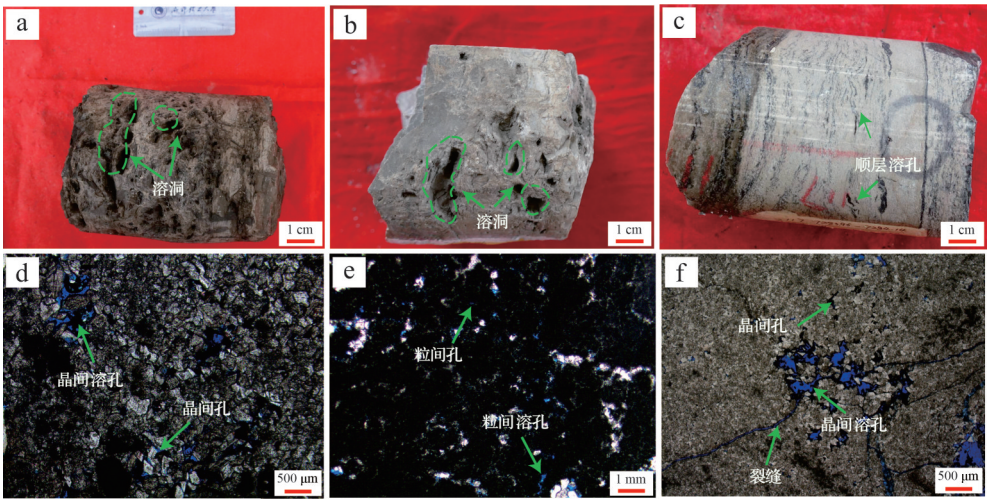


图3　研究区灯四段储集空间特征

(a)藻砂屑白云岩,溶洞发育,PS8井,7 047.45~7 047.55 m;(b)泡沫绵层状白云岩,溶洞发育,PS2井,7 791.26~7 791.36 m;(c)藻叠层白云岩,顺层溶孔,PS1井,7 283.95~7 284.14 m;(d)藻砂屑白云岩,晶间孔及晶间溶孔,PS13井,6 901.19 m;(e)凝块石白云岩,粒间孔及粒间溶孔,PS13井,6 717.75 m;(f)粉晶白云岩,晶间孔及裂缝,DB1井,6 410.61 m

Fig.3　Reservoir space characteristics of the Fourth member of the Dengying Formation in the study area

(a) sand sized algal intraclastic dolomite, karst cave development, well PS8, 7 047.45-7 047.55 m; (b) foam layer dolomite, karst cave development, well PS2, 7 791.26-7 791.36 m; (c) stromatolithic dolomite, strata solution pore, well PS1, 7 283.95-7 284.14 m; (d) sand sized algal intraclastic dolomite, intercrystalline pore and intercrystalline solution pore, well PS13, 6 901.19 m; (e) clotted dolomite, intergranular pores and intergranular solution pores, well PS13, 6 717.75 m; (f) silty dolomite, intercrystalline pores and fractures, well DB1, 6 410.61 m

提供空间，是研究区储层最重要的储集空间类型（单秀琴等，2016）。研究区灯四段的孔隙主要为晶间孔、晶间溶孔、粒间孔及粒间溶孔。晶间孔发育在白云石颗粒之间，在后期成岩过程中，部分晶间孔溶蚀扩大，形成晶间溶孔（图3d，f）。粒间孔主要发育在藻凝块云岩、藻叠层云岩和藻纹层云岩中，大多数被白云石胶结物或沥青半充填，粒间溶孔是粒间孔的溶蚀扩大，其孔隙边缘不规则，呈港湾状，连通性较好（图3e）。裂缝在灯四段大量发育，作为油气运移的通道，对储层改善起到了重要作用（图3f）。

4 成岩作用类型

碳酸盐岩的储集性能除了受到沉积环境的控制作用外，与储层演化过程中的成岩作用也息息相关（Saller *et al.*，2001；Ehrenberg *et al.*，2006）。成岩作用可以使岩石的原始组构、孔隙数量、大小及形态发生变化，包括原生孔隙的保存、改造，次生孔隙的发育及孔隙的连通性等。通过对研究区钻井岩心观察及薄片样品的镜下鉴定，灯影组自同生期—准同生期到埋藏期的成岩演化过程中，经历了多期成岩作用的影响及改造，其中破坏性成岩作用有胶结充填作用、压实压溶作用及硅化作用，建设性成岩作用有多期溶蚀作用，破裂作用等。多期白云石胶结充填、硅化等破坏性成岩作用和多期溶蚀作用等建设性成岩作用在灯四段普遍发育。因此，要理清灯四段油气充注期次，必须将成岩演化与烃类充注相结合，才能确定油气成藏时间。

4.1 压实压溶作用

压实作用是会导致储层中颗粒变形、破碎，物性变差的一种重要成岩作用类型。由于研究区灯影组埋深大（7 000~8 000 m），压实压溶作用在较长的一段地质历史时期持续性地作用于灯四段之上，属于主要成岩作用之一。区内主要表现为颗粒云岩中，颗粒的接触方式由漂浮状态变为点接触—线接触或者是凹凸接触。随着压实作用增强，受化学成岩作用的影响，发生压溶作用，主要以顺层发育的缝合线为典型特征（莫静等，2013）。强烈的压实压溶作用是导致区内原生孔隙减少及缝合线发育的主要原因。但从薄片观察发现，区内缝合线多充填有沥青（图4i），所以压实压溶作用产生的缝合线也可以为原油运移提供通道。

4.2 胶结充填作用

岩心观察及对应薄片的显微特征表明，研究区灯四段发育多期的胶结充填作用（图4c，d，f），并具有明显的世代关系。通过研究蓬莱地区灯四段孔洞中胶结充填物的世代关系，分析其成岩环境、成岩流体特征以及矿物中流体包裹体所记录的油气成藏流体的相态等信息，有助于分析成岩演化、油气充注事件、流体相态及成岩—成藏耦合关系。

通过显微镜下胶结物充填类型、晶体形态、晶型大小及充填特征、胶结充填矿物的世代关系分析以及阴极发光分析，并参照碳酸盐岩不同成岩阶段、成岩环境所形成矿物的特点进行判别（黄思静等，2009；Liseroudi *et al.*，2022），将蓬莱地区灯四段溶蚀孔洞中的充填物划分为白云石胶结物、沥青、石英及萤石三类。

4.2.1 白云石胶结物

1）第Ⅰ世代海底叶片状白云石

第Ⅰ世代海底叶片状白云石是文石矿物早期白云石化的结果（Hood *et al.*，2011；张杰等，2014），具有一向延展的特征（图5a，b），为海底环境形成。相关年龄数据为553.6±6.4 Ma（Su *et al.*，2022），表明其形成于震旦纪末期。主要表现为围绕白云岩孔洞边缘呈等厚环带生长，单个晶体宽0.05~0.1 mm，长0.15~0.25 mm，可充填次生储集空间的0~20%，为孔洞内第Ⅰ世代胶结物，在阴极发光下发昏暗光或不发光。

2）第Ⅱ世代浅埋藏粉晶白云石

第Ⅱ世代浅埋藏粉—细晶状白云石充填在叶片状白云石胶结之后的残余孔隙中，晶粒较小，呈等轴粒状，粒径介于0.03~0.25 mm，充填在第一期沥青之前（图5e，f）。该期白云石Mn元素均值为178.1×10^{-6}，Fe元素均值为97×10^{-6}。这类白云石的阴极发光表现为发暗红光，发光强度略强于叶片状白云石，由于这期白云石在研究区广泛分布，占到储集空间的50%以上，是对储层孔隙起破坏作用的最主要的胶结物之一。

3）第Ⅲ世代大气淡水细晶白云石

第Ⅲ世代大气淡水细晶白云石在研究区分布较少。受大气淡水淋滤影响，该期白云石与第Ⅱ世代白云石相比Fe，Mn元素含量较高（金民东等，2019），其Mn元素均值为$1\,043.2\times10^{-6}$，Fe元素均值为916.1×10^{-6}。受海平面变化的影响，灯四段暴露于地表，受

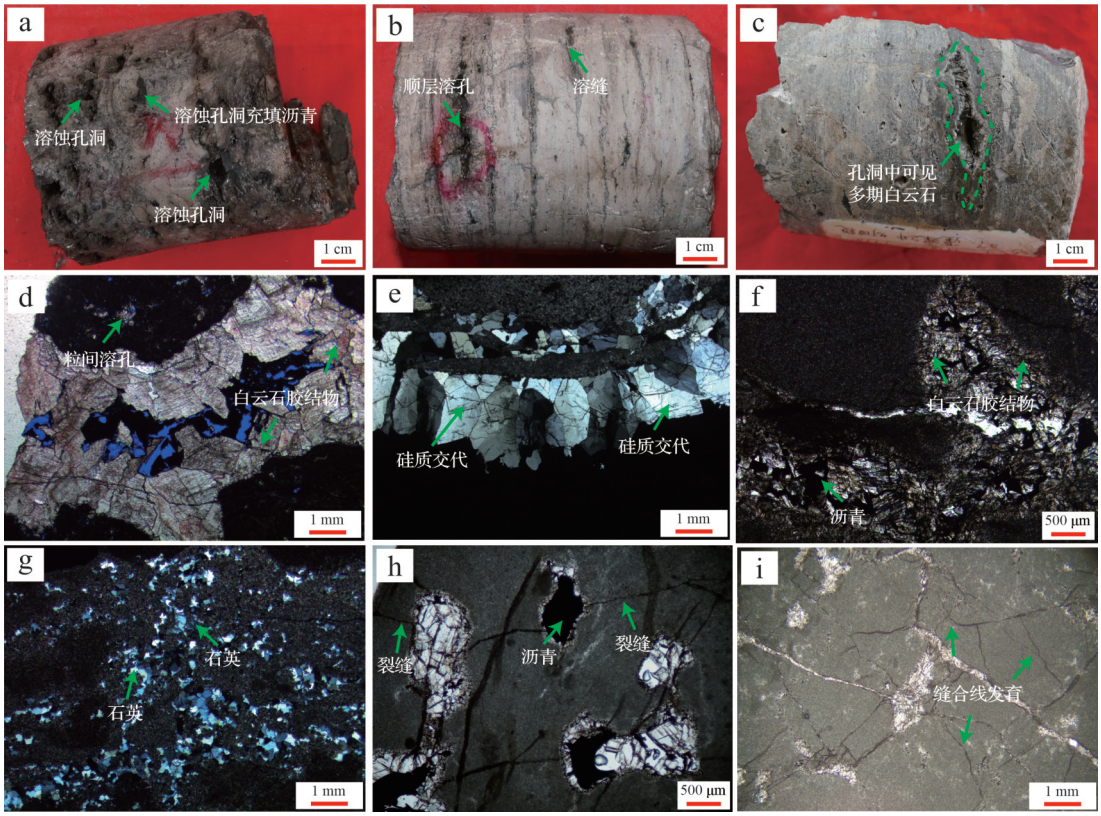


图4　研究区灯四段成岩作用特征

(a)藻砂屑云岩,溶蚀孔洞发育,部分溶蚀孔洞充填沥青,PS8井,7 049.81~7 049.9 m;(b)藻纹层云岩,可见顺层溶孔、溶缝发育,PS7井,7 240.89~7 240.97 m;(c)藻砂屑云岩,藻格架孔内发育多期白云石胶结物,PS2井,7 778.50~7 778.75 m;(d)藻凝块云岩,粒间溶孔发育,白云石胶结物充填孔隙,PS13井,6 717.75 m;(e)藻砂屑云岩,硅质交代白云石,可见残余白云石期次特征及白云石菱形晶特征,PS13井,6 711.83 m;(f)藻凝块云岩,孔洞内充填多期白云石胶结物及沥青,PS1井,7 275.96 m;(g)泡沫绵层状云岩,石英充填孔隙,PS1井,6 410.52 m;(h)藻凝块云岩,裂缝发育,沥青完全充填孔洞及部分裂缝,PS8井,7 057.59 m;(i)藻砂屑云岩,缝合线发育并被沥青充填,PS13井,6 914.85 m

Fig.4　Diagenetic characteristics of the Fourth member of the Dengying Formation in the study area

(a) sand sized algal intraclastic dolomite, solution cavity developed, partial solution cavity filled with bitumen, well PS8, 7 049.81-7 049.9 m; (b) laminated dolomite, visible along layer solution pore, solution fracture development, well PS7, 7 240.89-7 240.97 m; (c) sand-algal clastic dolomite, multi-stage dolomite cement developed in algal lattice pores, well PS2, 7 778.50 m; (d) clotted dolomite, intergranular pore development, dolomite cement filling pores, well PS13, 6 717.75 m; (e) sand sized algal intraclastic dolomite, siliceous metasomatic dolomite, visible residual dolomite stage and dolomite diamond crystal characteristics, well PS13, 6 711.83 m; (f) clotted dolomite, caverns filled with multi-stage dolomite cement and bitumen, well PS1, 7 275.96 m; (g) foam layer dolomite, quartz filled pores, well PS1, 6 410.52 m; (h) clotted dolomite, fractures developed, bitumen completely filled with holes and partial fractures, well PS8, 7 057.59 m; (i) sand sized algal intraclastic dolomite, sutures developed and filled with bitumen, well PS13, 6 914.85 m

大气水淋滤、溶蚀的影响,形成该期与大气淡水有关的细晶白云石,显微镜下晶体干净明亮(图5a,b),阴极发光表现为发亮红光。其形成时间晚于第Ⅱ世代白云石。大气淡水细晶白云石在研究区内相对较少,因此其对孔隙的破坏作用较小。

4)第Ⅳ世代中埋藏中晶白云石

第Ⅳ世代中晶白云石形成于微生物白云岩储层较大的溶蚀孔洞中,其晶体较为粗大明亮,以半自形的菱形晶体为主,粒径介于0.25~0.50 mm,阴极发光下发暗红光或红光(图5g,h),部分发育亮红光的白云石环带,与前几期白云石胶结物具有明显区别。

5)第Ⅴ世代中埋藏粗晶白云石

第Ⅴ世代粗晶白云石也形成于晚成岩期,形成于中晶白云石之后(图5c,d),与中晶白云石相比,其晶体更加粗大,多为半自形—自形特征,粒径介于0.5~2.0 mm,阴极发光为红光或暗红光。

6)第Ⅵ世代深埋藏巨晶—鞍形白云石

第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石形成于深埋藏环境,仅发育于较粗大的残余孔洞中,大多位于原生孔隙的中部,晶体粗大,表面较脏,以半自形—自形的菱形晶体为主,粒径大于2 mm,阴极发光下发亮红光,形成于第二期热裂解沥青之前。虽巨晶—鞍形白云石胶结物发育相对较少,但由于其单个晶体较大,仍能对储集空间造成破坏作用。

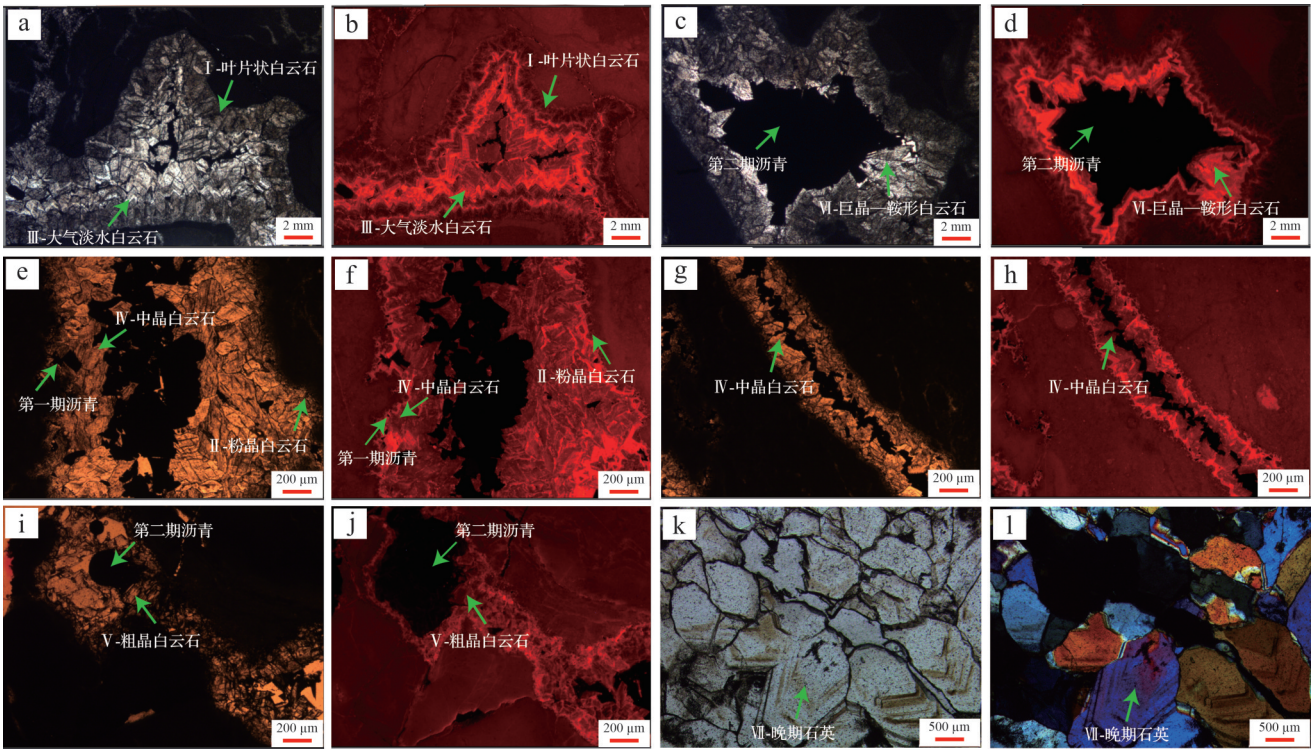


图5 研究区灯四段胶结作用期次特征

(a,b)藻凝块云岩,第Ⅰ世代叶片状白云石及第Ⅲ世代大气淡水细晶白云石胶结充填,阴极发光下分别发昏暗光及亮红光,a为单偏光,b为阴极发光,PS7井,6 243.92 m;(c,d)藻凝块云岩,第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石充填孔隙,残余孔隙被第二期沥青充填,第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石在阴极发光下发亮红光,c为单偏光,d为阴极发光,PS7井,7 245.38 m;(e,f)藻凝块云岩,见少量第Ⅱ世代粉晶白云石充填孔隙,在阴极发光下分别发暗红光,可见第一期沥青充填在第Ⅱ世代粉晶白云石与第Ⅳ世代中晶白云石之间,e为单偏光,f为阴极发光,PS106井,5 853.25 m;(g,h)藻凝块云岩,第Ⅳ世代中晶白云石充填孔隙,阴极发光表现为发暗红光,g为单偏光,h为阴极发光,PS106井,5 853.25 m;(i,j)藻凝块云岩,溶洞中见第Ⅴ世代粗晶白云石、第二期沥青等充填孔隙,第Ⅴ世代粗晶白云石阴极发光下发暗红光,i为单偏光,j为阴极发光,PS106井,7 048.09 m;(k,l)藻砂屑云岩,晚期石英胶结物充填孔隙,具有环带特征,k为单偏光,l为正交偏光,PS2井,7 799.13 m

Fig.5 Characteristics of cementation stages of the Fourth member of the Dengying Formation in the study area

(a, b) clotted dolomite, the first generation blade-like dolomite and the third generation fine crystalline dolomite were filled with cementation, dim light and bright red light respectively under cathodic luminescence, a is plane polarized light (PPL), b is cathodic luminescence (CL), well PS7, 6 243.92 m; (c, d) clotted dolomite, the sixth generation giant crystalline saddle-shaped dolomite filling pores, residual pores are filled by the second stage bitumen, the sixth generation giant crystalline saddle-shaped dolomite shining red under cathodic luminescence, c is PPL, d is CL, well PS7, 7 245.38 m; (e, f) clotted dolomite, found a small number of the second generation powdery dolomite filling pores, under the cathode luminescence, respectively, dark red light, it can be seen that the first stage bitumen filled in the second generation powdery dolomite and the fourth generation medium crystalline dolomite, e is PPL, f is CL, well PS106, 5 853.25 m; (g, h) clotted dolomite, the pores filled with the fourth generation medium crystalline dolomite, cathodic luminescence shows dark red light, g is PPL, h is CL, well PS106, 5 853.25 m; (i, j) clotted dolomite, filling pores such as the fifth generation coarse crystalline dolomite and the second stage bitumen are found in the cave, the fifth generation coarse crystalline dolomite gives off dark red light by cathode luminescence, i is PPL, j is CL, well PS106, 7 048.09 m; (k, l) sand sized algal intraclastic dolomite, late quartz cement filled pores, with ring characteristics, k is PPL, l is cross polarized light (XPL), well PS2, 7 799.13 m

4.2.2 硅质胶结物

石英在研究区主要分为三种,第一种是早期形成的细粒石英(杨平等,2018)(图4g);第二种是交代白云石形成的石英,其保留了白云石的期次、菱形晶特点(图4e);第三种则是最晚期和萤石一起在孔洞中形成的第Ⅶ世代石英充填物,具有明显的环带特征(图5k,l)。

4.2.3 沥青充填

储层沥青作为古油藏裂解的直接产物,可以指示油气充注过程(刘树根等,2021;马行陟等,2022;宋泽章等,2023)。通过镜下观察孔隙中胶结物的先后顺序,在研究区内共发现两期沥青充填。第一期沥青充填于粉晶白云石之后(图5e,f),在区内分布较少,主要分布在粉晶白云石晶间孔内,为研究区第一期古油藏发育特征。第二期沥青主要形成于第二期古油藏裂解期间,在研究区灯四段广泛发育,充填于晶间孔、藻格架孔、溶蚀孔洞及裂缝内,在巨晶—鞍状白云石充填之后形成(图5i,j)。

4.3 溶蚀作用

溶蚀作用是一种极为重要的成岩作用,其既可

以使原生孔隙进一步溶蚀扩大,也可以形成新的次生孔隙,但是溶蚀作用导致的产物在一定的介质条件下也会析出新的充填物填充孔隙,起到破坏储层的作用。研究区灯四段储层经历多期次溶蚀作用改造(图3a,b),根据其成岩顺序、岩心及镜下特征、所受流体影响的不同,划分为同生期—准同生期溶蚀作用、表生期溶蚀作用及埋藏溶蚀作用。

4.3.1　同生期—准同生期溶蚀作用

同生期—准同生期溶蚀作用发生于成岩早期,溶蚀储层程度较低,由于灯四段古环境条件适合蓝绿藻类微生物生长发育,在其生长过程中多形成藻纹层、藻叠层结构(Burne and Moore,1987;王文之等,2016),藻纹层云岩沉积环境属于低能环境,藻纹层在横向上较为连续,但起伏不大。藻叠层云岩沉积环境属于中—低能环境,在藻纹层的基础之上,横向上有起伏且各纹层起伏趋势较为一致。同生期—准同生期溶蚀作用形成的孔隙多为藻纹层或藻叠层之间形成的顺层孔洞及溶缝(杨威等,2022)(图3c、图4b)。同生期—准同生期形成的孔洞会成为后期成岩流体运移的通道,在晚期成岩作用的影响下,同生期—准同生期形成的孔隙多数被后期胶结物完全充填或者半充填(图4b),大多数孔隙空间被破坏。

4.3.2　表生期溶蚀作用

震旦纪末期,受桐湾运动影响,蓬莱地区灯四段抬升暴露,受到大气淡水的淋滤改造,形成了大量的溶沟及溶缝等(郝毅等,2017;文龙等,2017)。已有研究表明,表生期大气淡水溶蚀作用是灯影组储层发育的最关键因素(赵东方等,2022)。同生期—准同生期形成的孔洞作为良好的运移通道接受表生岩溶期流体对储层的改造,使得前期形成的孔洞或裂隙进一步溶蚀扩大形成直径大于2 mm的溶洞(郝毅等,2017)(图3a,b)。在表生岩溶阶段形成的溶蚀孔洞,尽管后期成岩作用中多被充填和改造,但被保留下来的溶蚀孔洞依旧能为油气成藏提供有效的运移途径和储集空间。

4.3.3　埋藏溶蚀作用

埋藏溶蚀作用是储层在固结成岩以后处于埋藏期的成岩作用,与同生期—准同生期溶蚀作用或表生期岩溶作用相比,埋藏溶蚀作用处于一个相对封闭的成岩流体系统中。区内埋藏期溶蚀作用分为有机质产生的有机酸溶蚀作用以及深部热液流体的溶蚀作用,有机质成熟生烃会生成CO_2、有机酸等对白云石产生溶蚀,易形成各类非组构选择型溶孔、溶洞和溶缝(Mazzullo,2004);区内灯四段在埋藏期经历多期热液作用(黄文明等,2011),各类深部热液流体,沿断裂系统向地层侵位,不断溶蚀围岩,形成热液溶蚀孔隙及热液破裂缝。

埋藏期溶蚀作用具有非组构选择性,形成的溶蚀孔洞和溶缝的规模较小,主要是对早期形成的孔、洞和缝进行改造扩溶,现今保留的孔隙中,与同生—准同生期溶蚀作用最大的区别为孔洞中是否有沥青充填(李毕松等,2023)(图4h)。通过薄片观察,研究区埋藏期溶蚀作用主要沿缝合线、裂缝和晶间孔等进行,形成了缝合线溶蚀孔、裂缝溶蚀孔、晶间溶孔等(图3a,b,e),能成为油气运移通道和有效储集空间,是形成储层的重要的成岩作用。

4.4　硅化作用

在碳酸盐沉积物或碳酸盐岩中,原来的矿物和组分被新矿物取代的作用称为交代作用。硅化作用是交代作用的一种,其交代形成的是硅质矿物。研究区内硅化作用明显,在岩心上可见硅化顺纹层硅化、局部硅化。在镜下观察到石英交代白云石后,其保留了白云石的期次、菱形晶特点(图4e)。

4.5　破裂作用

构造作用形成的构造缝是改善储层渗透性的重要因素。在研究区内,震旦系灯影组经历了多期构造运动,裂缝较为发育(图3f、图4h)。前人研究认为,四川盆地灯影组至少发育三期裂缝(单秀琴等,2016),这些裂缝为后期的酸性流体、地层水和大气水的运移提供了有利通道,导致溶蚀扩大。总体来看,由构造破裂作用形成的裂缝和溶蚀扩大对储层孔隙度的贡献较小,但是裂缝之间的连通性较好,裂缝的发育对改善储层渗透性具有积极作用。

5　成岩序列及孔隙演化

根据蓬莱地区灯影组四段储层孔隙中胶结充填物的形态、阴极发光特征等,可识别出9个期次的胶结充填序列,并明确了孔隙中的白云石胶结物和两期沥青之间的关系:第Ⅰ世代叶片状白云石→第Ⅱ世代粉晶白云石→第Ⅰ期沥青→第Ⅲ世代细晶白云石→第Ⅳ世代中晶白云石→第Ⅴ世代粗晶白云石→第Ⅵ世代巨晶—鞍状白云石→第Ⅱ期沥青→第Ⅶ世代晚期石英充填。

微量元素、稀土元素配分模式和流体包裹体作为研究碳酸盐岩成岩流体重要的技术方法，被广泛应用于岩石沉积环境以及成岩阶段等的研究中（Henderson，1984；张晓博等，2023）。其中稀土元素由于其在成岩过程中的稳定性，可以提供成岩流体及成岩作用方面的信息（Zhang *et al.*，2017），不同期次的白云岩REE含量的差异可以指示不同沉积环境下成岩流体及沉积过程的差异性。Eu的正异常代表了热液活动（Frimmel，2009），Ce的异常情况常用来判断海水氧化还原条件，在氧化环境下Ce^{3+}被氧化成Ce^{4+}导致海水中呈现Ce负异常，而在还原环境下Ce则不会显示负异常（Wang *et al.*，2020）。但由于海水中的La元素会影响Ce异常，所以也有学者使用$(Pr/Pr^*)_N$来反映Ce异常的程度：$(Pr/Pr^*)_N$<1代表Ce负异常，$(Pr/Pr^*)_N$>1代表正异常（赵彦彦等，2019）。

测得了蓬莱地区灯四段储层孔隙中不同期次白云石胶结物的微量稀土元素数据，通过澳大利亚页岩（PAAS）对测得的稀土元素结果进行标准化处理（图6），结合不同期次胶结物的微量元素特征，研究白云石胶结物形成过程中流体性质的变化及孔隙演化过程，可将研究区灯四段的成岩演化划分为四个阶段。

5.1 海底成岩阶段

海底成岩阶段，灯四段孔洞间白云石胶结物主要为叶片状白云石，具有相对稳定的内部结构及地化特征。其地球化学特征显示为存在Ce负异常（图7），稀土元素总量（∑REY）均值为0.2×10^{-6}，相对较低，Y/Ho均值为56.1，大于44，此阶段孔隙中的成岩流体为氧化海水。此阶段海底胶结形成的叶片状白云石充填了部分原始孔隙，可使原始储集空间减少10%~25%（王兴志等，2000），此阶段后储集空间以残余粒间孔及残余藻格架孔为主（图8）。

5.2 浅埋藏成岩阶段

浅埋藏成岩阶段，灯四段孔洞间白云石胶结物主要为粉晶白云石，白云石胶结物的地球化学特征与第一世代叶片状白云石相似，表现为存在Ce负异常，Y/Ho均值为50.4，大于44，为氧化海水特征。经过此阶段后储集空间依旧为残余粒间孔及残余藻格架孔，沉积物发生压实作用，孔隙度有所降低（图8）。

5.3 表生岩溶阶段

表生岩溶阶段，灯四段由于受到桐湾运动Ⅱ幕的影响，地层抬升暴露于大气淡水中，接受表生期岩溶作用的改造。经历此阶段后灯四段孔隙空间以溶蚀扩大孔、粒内溶孔及粒间孔为主，孔隙度由于强烈的淡水溶蚀作用而略有增加（图8）。

5.4 中—深埋藏阶段

中—深埋藏成岩阶段，灯影组储层孔隙中白云石胶结物主要为中晶白云石。晚期白云石胶结物受热液影响，其地球化学特征表现为存在弱Ce负异常，Eu正异常，部分数据点La正异常，Ce无异常，Y/Ho均值为43.2，海水特征逐渐减弱，此时孔隙中的成岩流体为残余海水和热液的混合体。到了深埋藏阶段，受热液影响，储层孔隙中白云石胶结物为粗晶、巨晶—鞍形白云石。其化学特征均表现为明显的Eu正异常，微弱Ce负异常，部分数据点La正异常，此时孔隙中的成岩流体为高温热液相关的酸性流体。

在此阶段压实压溶作用和硅化作用使得孔隙度降低，且深埋流体沉淀的亮晶胶结物继续充填残留孔洞，使得灯影组储层物性变差。最后，在油裂解阶段，剩余孔隙被沥青充填或半充填。经历此阶段，受压实压溶、胶结作用等对储集空间改造，灯四段孔隙空间减少（图8）。

6 油气充注过程重建

研究证实，蓬莱地区灯影组气藏油气源主要来自下寒武统麦地坪组—筇竹寺组黑色泥页岩（魏国齐等，2022），下寒武统烃源岩具有多期演化、多期成熟生烃过程（孙玮等，2017；姜华等，2022）。在梳理成岩序列、分析不同成岩环境下稀土微量元素特征的基础上，厘定了研究区灯四段储层孔隙中胶结充填物期次特征及成岩序列，并结合流体包裹体（图9，10），明确了灯四段油气成藏过程。

灯四段第一期古油藏成藏事件被孔洞中第Ⅱ世代白云石记录，该期粉晶白云石发育丰富的呈褐色有机质包裹体（图10a，b），与其对应的盐水包裹体均一温度为85 ℃~98 ℃（图9、表1），代表了第Ⅰ期古油藏的成藏温度，成藏时间为志留纪中晚期（范俊佳等，2022）。在薄片下可观察到在该期白云石之后充填有第一期沥青，表明该时期下寒武统烃源岩已经开始生烃，由于志留纪末期加里东运动影响，研究区抬升剥蚀，烃源岩生烃停滞，古油藏遭受一定程度的破坏，形成第Ⅰ期沥青，储层孔隙空间遭到破坏。灯

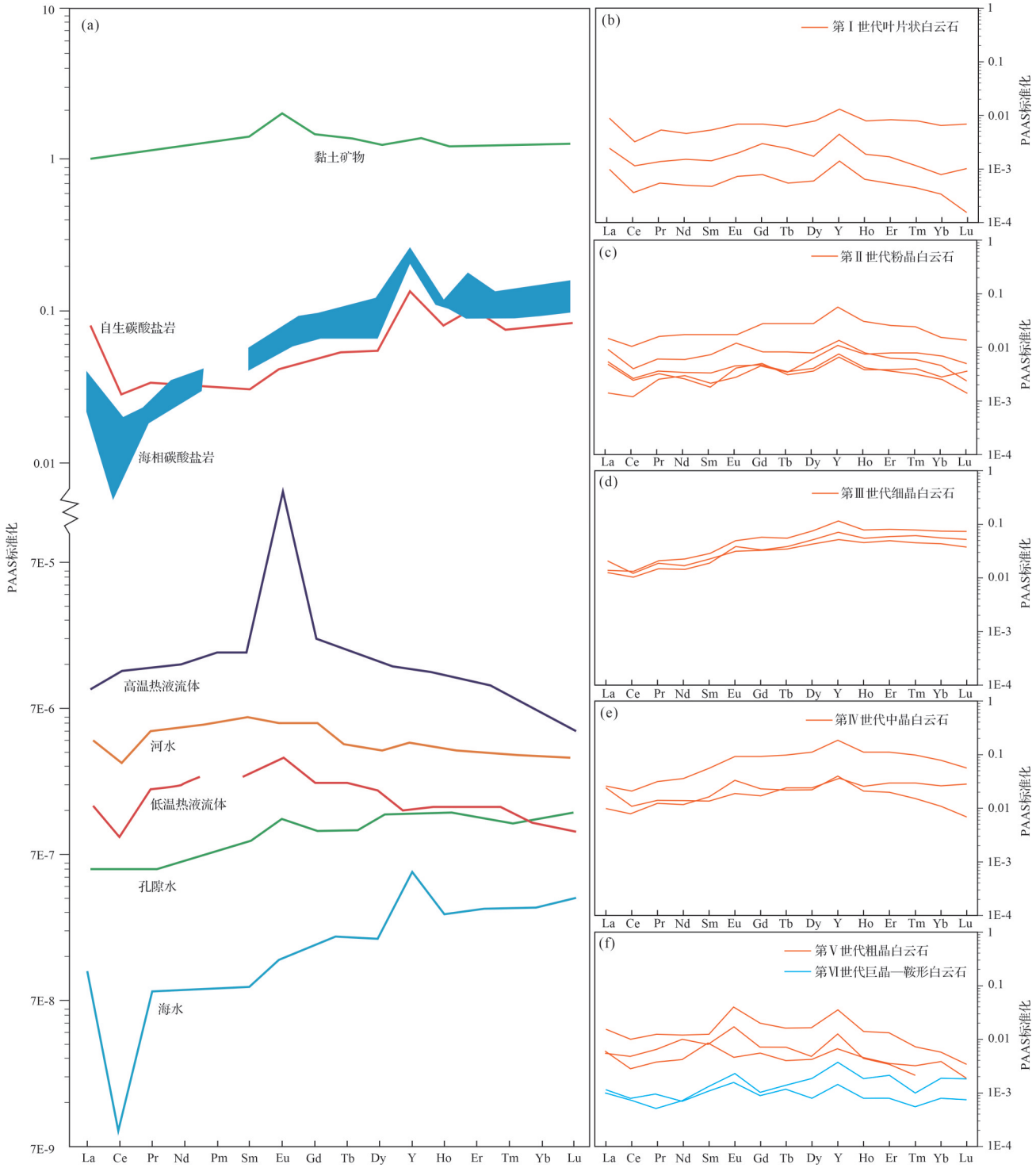


图6　研究区灯四段孔洞中不同期次白云石胶结物REY配分模式(PAAS标准化)

(a)自然界不同成岩流体稀土元素配分模式(赵彦彦等,2019);(b)第Ⅰ世代叶片状白云石REY配分模式图;(c)第Ⅱ世代粉晶白云石REY配分模式图;(d)第Ⅲ世代细晶白云石REY配分模式图;(e)第Ⅳ世代中晶白云石REY配分模式图;(f)第Ⅴ世代粗晶白云石及第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石REY配分模式图

Fig.6　Rare earth elements and yttrium (REY) distribution patterns (Post Archean Australian Shale (PAAS) standardization) of different phases of secondary dolomite cement in the Fourth member of the Dengying Formation in the study area

(a) distribution patterns of rare earth elements in different diagenetic fluids in nature (Zhao *et al*., 2019); (b) REY partition pattern of the first generation of lamellar dolomite; (c) REY partition pattern of the second generation powdery dolomite; (d) REY partition pattern of the third generation fine crystalline dolomite; (e) REY partition pattern of the fourth generation medium crystalline dolomite; (f) REY partitioning patterns of the fifth generation coarse crystalline dolomite and the sixth generation giant crystalline saddle-shaped dolomite

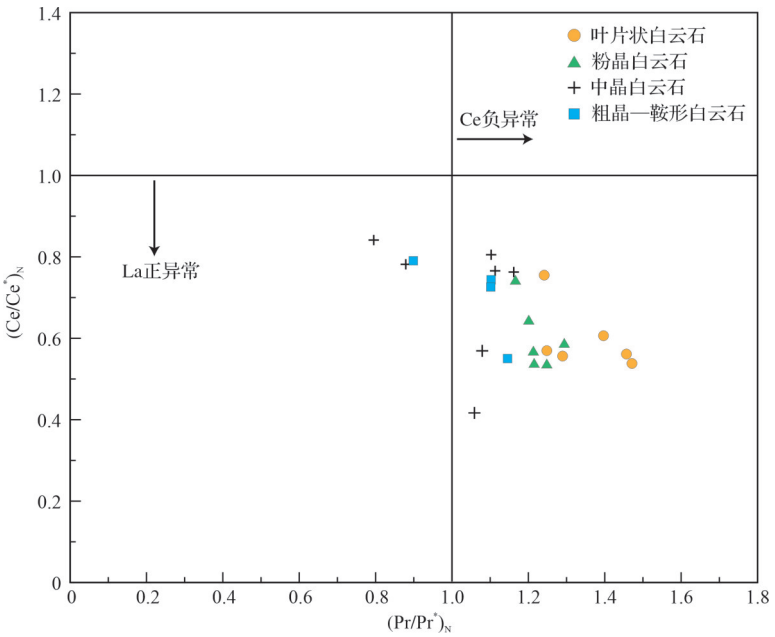


图7 研究区灯四段孔洞中不同期次白云石胶结物Ce异常识别图

Fig.7 Ce anomaly identification map of different phase secondary dolomite cement in the Fourth member hole of the Dengying Formation in the study area

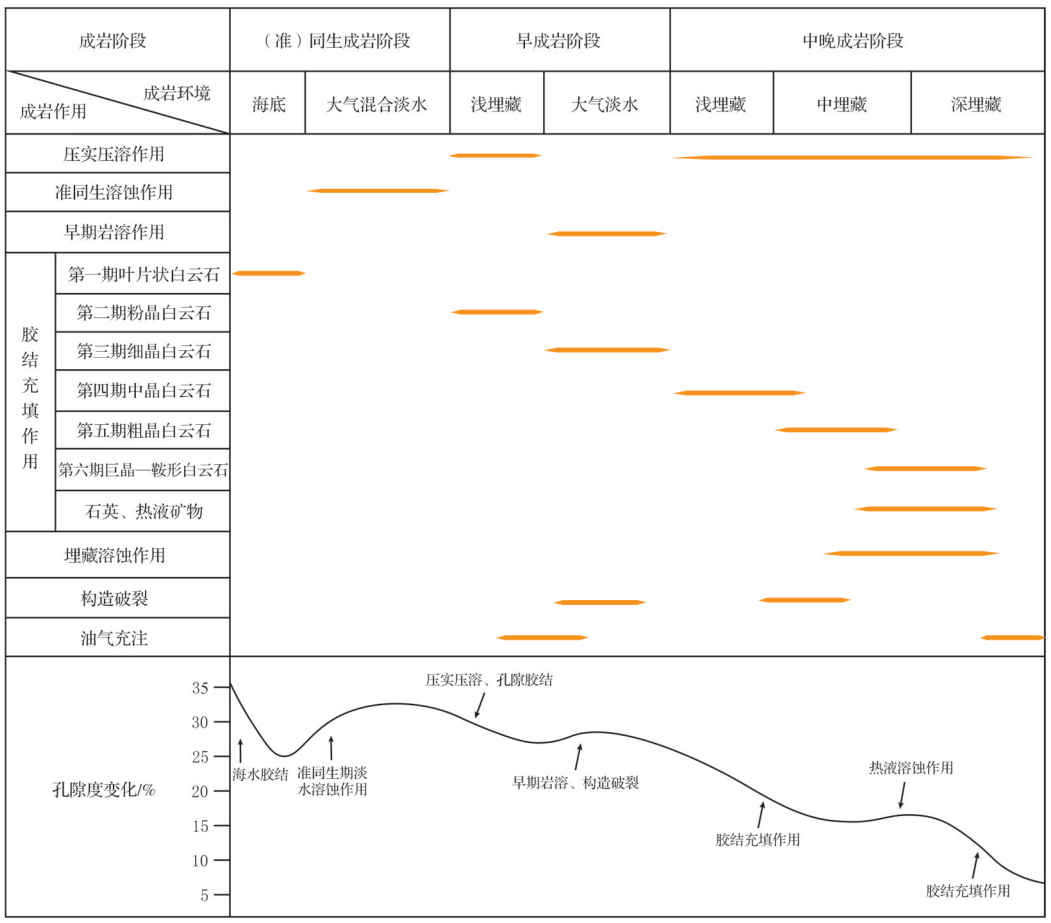


图8 研究区灯四段成岩环境及成岩作用

Fig.8 Diagenetic environment and diagenesis of the Fourth member of the Dengying Formation

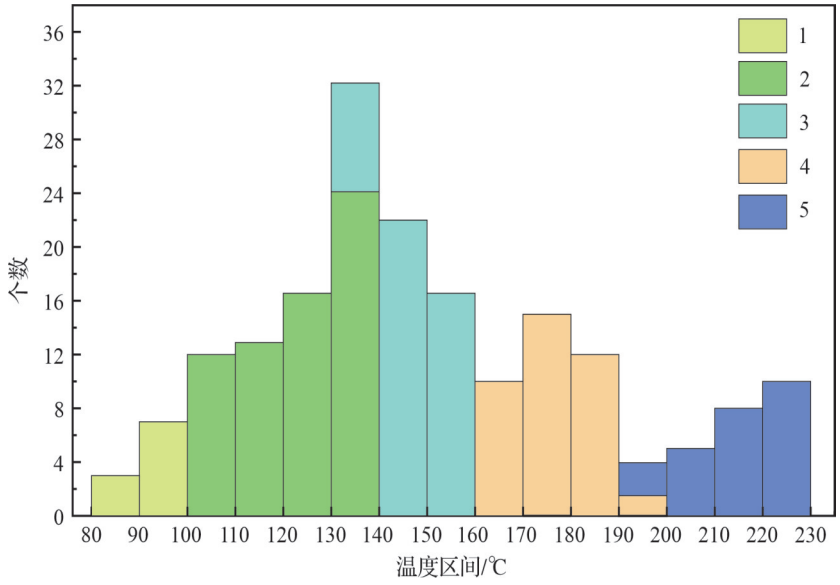


图9　蓬莱地区灯四段储层孔洞中不同期次胶结充填物流体包裹体均一温度分布

1.第Ⅱ世代粉晶白云石;2.第Ⅳ世代中晶白云石;3.第Ⅴ世代粗晶白云石;4.第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石;5.晚期石英、萤石

Fig.9　Homogenization temperature distribution of fluid inclusions in multi-stage cements from vugs in the Fourth member of the Dengying Formation, Penglai Area

1. second generation powdery dolomite; 2. fourth generation medium crystalline dolomite; 3. fifth generation coarse crystalline dolomite; 4. sixth generation giant crystalline saddle-shaped dolomite; 5. late quartz, fluorite

四段的第二期古油藏成藏事件被孔洞中的第Ⅳ世代中晶白云石记录,该期白云石主要发育呈深褐色的富沥青包裹体(图10e,f),包裹体测得的均一温度介于108 ℃~134 ℃(图9、表1),代表了第Ⅱ期古油藏,时间处于中三叠世。

灯四段的第三期成藏事件被孔洞中的第Ⅴ世代粗晶白云石记录,该期白云石主要发育大量的深褐色的富沥青包裹体(约占95%)和少量呈深灰色的气烃包裹体(约占5%)(图10g),包裹体测得的均一温度介于132 ℃~154 ℃(图9、表1),此时原油已经开始裂解(Pepper and Corv, 1995; Dahl et al., 1999),时间为晚三叠纪—早侏罗纪。灯四段第四期古油藏成藏事件被孔洞中的第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石所记录,该期白云石主要发育大量的深灰色气烃包裹体(约占90%)和少量的富沥青质包裹体(约占10%)(图10h),盐水包裹体测得的均一温度介于165 ℃~198 ℃(图9、表1),时间为晚侏罗世。深埋藏环境形成的晚期石英中的流体包裹体主要为深灰色气烃包裹体(图10i),伴有少量沥青包裹体,其均一温度介于195 ℃~230 ℃(图9、表1),温度范围跨度大,表明其形成持续时间较长。

蓬莱地区灯四段储层油气充注过程被不同地质历史时期孔隙中的胶结物中捕获的流体包裹体记录,不同期次的胶结物捕获的流体包裹体的类型、相态、均一温度随时间和埋深而变化,包裹体均一温度逐渐升高。当古油藏逐渐形成时,白云石胶结物中捕获的液烃包裹体丰度逐渐升高,随着古油藏裂解生气,其液烃包裹体丰度减小,捕获的气烃包裹体比例逐渐升高,代表了下寒武统烃源岩逐渐深埋、生烃成熟的热演化过程。根据流体包裹体的类型、相态及均一温度,将蓬莱地区灯四段油气充注过程恢复为:志留纪中晚期古油藏充注(第Ⅰ期古油藏)→加里东晚期古油藏破坏→中三叠世古油藏充注(第Ⅱ期古油藏)→晚侏罗世古油藏裂解生气→晚白垩世至今古油气藏—气藏的调整与定型,其中最晚期油裂解气→气态烃的充注是灯四段气藏的主要形成期(图11)。

7　结论

(1) 不同成岩阶段多种成岩作用的叠加综合控制了蓬莱地区灯四段储层孔隙空间变化。同生—准同生期溶蚀作用、表生期溶蚀作用、埋藏溶蚀作用及破裂作用是控制储集空间增加的主要因素,压实压溶作用、胶结充填作用是储集空间减少的主要因素。

(2) 根据蓬莱地区灯四段储层孔隙中胶结充填

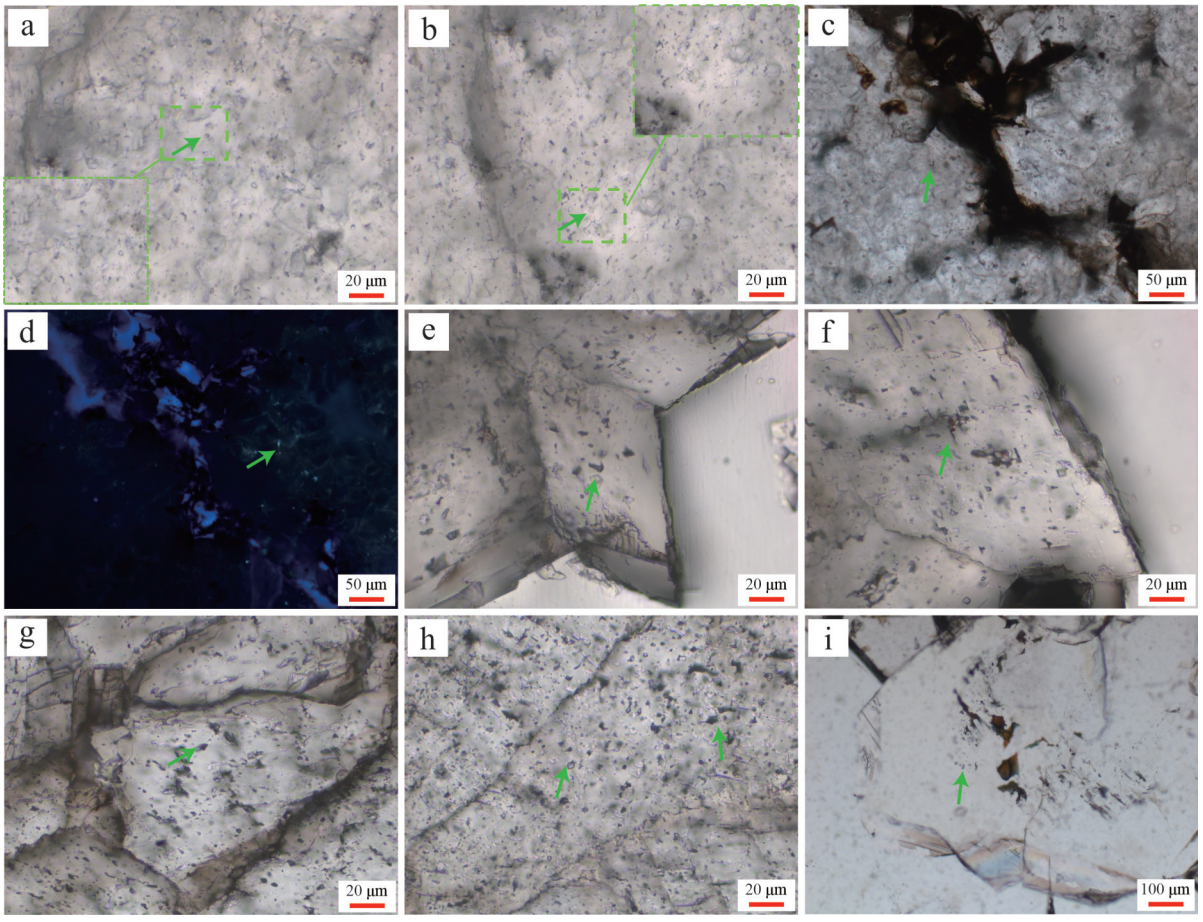


图 10 研究区灯四段不同期次胶结充填物中的流体包裹体特征

(a,b)孔洞内第Ⅱ世代粉晶状白云石胶结物内成群分布、呈褐色的有机质包裹体,PS2井,7 801.64 m;(c,d)孔洞内第Ⅲ世代细晶状白云石晶间微缝隙中充填褐色、深褐色的沥青,局部残留轻质油,显示浅蓝色的荧光,DB1井,6 410.01 m;(e)孔洞内第Ⅳ世代中晶状白云石内成群分布、呈深褐色的富沥青包裹体,PS1井,7 263.71 m;(f)孔洞内第Ⅳ世代中晶状白云石内成群分布、呈深褐色的富沥青包裹体,PS1井,7 263.71 m;(g)孔洞内第Ⅴ世代粗晶白云石内成群分布、呈深褐色的富沥青包裹体及深灰色气烃包裹体,DB1井,6 409.43 m;(h)孔洞内第Ⅵ世代巨晶—鞍形白云石内成群分布、深灰色气烃包裹体及呈深褐色的富沥青包裹体,DB1井,6 409.43 m;(i)孔洞内硅质胶结物内沿生长环带内呈带状分布、呈深灰色的气烃包裹体,PS2井,7 803.51 m

Fig.10 Characteristics of fluid inclusions in different phases of subconsolidated fill in the Fourth member of the Dengying Formation in the study area

(a, b) clustered brown organic inclusions in the second generation powdery dolomite cement in the caverns, well PS2, 7 801.64 m; (c, d) the micro-crevices of the third generation fine crystalline dolomite are filled with brown and dark brown bitumen, and some light oil remains, showing light blue fluorescence, well DB1, 6 410.01 m; (e) dark brown-rich asphalt-rich inclusions distributed in clusters within the fourth generation medium crystalline dolomite in the caverns, well PS1, 7 263.71 m; (f) dark brown-rich asphalt-rich inclusions distributed in groups within the fourth generation medium crystalline dolomite in the caverns, well PS1, 7 263.71 m; (g) dark brown rich bituminous inclusions and dark gray hydrocarbon inclusions in the fifth generation coarse crystalline dolomite in the caverns, well DB1, 6 409.43 m; (h) dark gray hydrocarbon inclusions and dark brown asphalt-rich inclusions distributed in the sixth generation giant crystalline saddle-shaped dolomite in the hole, well DB1, 6 409.43 m; (i) dark gray gas hydrocarbon inclusions in the siliceous cement within the cavity along the growth zone, well PS2, 7 803.51 m

物的形态、阴极发光特征等,可识别出9个期次的胶结充填序列:第Ⅰ世代叶片状白云石→第Ⅱ世代粉晶白云石→第Ⅰ期沥青→第Ⅲ世代细晶白云石→第Ⅳ世代中晶白云石→第Ⅴ世代粗晶白云石→第Ⅵ世代巨晶—鞍状白云石→第Ⅱ期沥青→第Ⅶ世代晚期石英充填。

(3)依据蓬莱地区灯影组四段白云石充填期次、流体包裹体特征及均一温度厘定了灯影组四段的油气充注过程:志留纪中晚期古油藏充注(第Ⅰ期古油藏)→加里东晚期古油藏破坏→三叠纪古油藏裂解生气→侏罗纪晚期古油藏充注(第Ⅱ期古油藏)→晚白垩纪至今古油气藏—气藏的调整与定型,其中最晚期油裂解气→气态烃的充注是灯四段气藏的主要形成期。

致谢 感谢三位评审专家对文章提出的宝贵建议。

表1　研究区灯四段储层胶结充填序列、流体包裹体特征、油气成藏期次及时间

Table 1　Cemented filling sequence, fluid inclusion characteristics, oil-gas accumulation period, and time of the Fourth member of the Dengying Formation in the study area

胶结充填物类型及形成环境	阴极发光特征	胶结充填物充填期次	流体包裹体类型、相态、均一温度/℃及盐度/*wt*.%$NaCl_{eqv}$	成岩流体特征	油气成藏期次及时间
叶片状白云石胶结物（海底成岩环境）	不发光—昏暗光	第Ⅰ世代白云石胶结	不发育流体包裹体	海水;(REE配分模式平坦,Y/Ho>44,Ce负异常)	—
粉晶白云石胶结物（浅埋藏成岩环境）	暗红光	第Ⅱ世代白云石胶结	褐色有机质包裹体,均一温度区间为85℃~98℃;盐度区间为22.98~23.05*wt*.%$NaCl_{eqv}$	大气淡水与残余海水混合（REE配分模式平坦,Ce负异常,Eu无正异常）	第一期油气成藏（志留纪中晚期）
第一期沥青					
细晶白云石胶结物（表生成岩环境）	亮红光	第Ⅲ世代白云石胶结	基本不发育流体包裹体	大气淡水;(REE配分模式平坦,Y/Ho<44,Ce微弱负异常)	古油藏被破坏
中晶白云石胶结物（中埋藏成岩环境）	暗红光	第Ⅳ世代白云石胶结	深褐色富沥青包裹体,均一温度区间为108 ℃~134 ℃;盐度区间为15.07~21.61 *wt*.%$NaCl_{eqv}$		第二期油气成藏（中三叠世）
粗晶白云石胶结物（中—深埋藏成岩环境）	暗红光或红光	第Ⅴ世代白云石胶结	深褐色富沥青包裹体+深灰色气烃包裹体,其中深褐色的富沥青包裹体约占95%±,呈深灰色的气烃包裹体约占5%±;均一温度区间为132 ℃~154 ℃;盐度区间为5.1~22.91 *wt*.%$NaCl_{eqv}$	残余海水和后期热液流体的混合（MREE富集,Ce微弱负异常,Eu正异常）	第三期油气成藏（晚三叠世—早侏罗世）
巨晶—鞍形白云石胶结物（深埋藏成岩环境）	亮红光	第Ⅵ世代白云石胶结	深灰色气烃包裹体+深褐色富沥青包裹体,其中深灰色的气烃包裹体约占90%±,呈深褐色富沥青包裹体约占10%±;均一温度区间为165 ℃~198 ℃;盐度区间为4.96~17.61 *wt*.%$NaCl_{eqv}$	高温热液相关的酸性流体（REE配分模式平坦,Eu正异常）	第四期油气成藏（晚侏罗世）
第二期沥青					
硅质胶结物（深埋藏—抬升埋藏环境）	不发光	晚期石英充填	深灰色气烃包裹体,均一温度区间为195 ℃~230 ℃;盐度区间为8.28~11.58 *wt*.%$NaCl_{eqv}$	—	气藏调整、定型（晚白垩世至今）

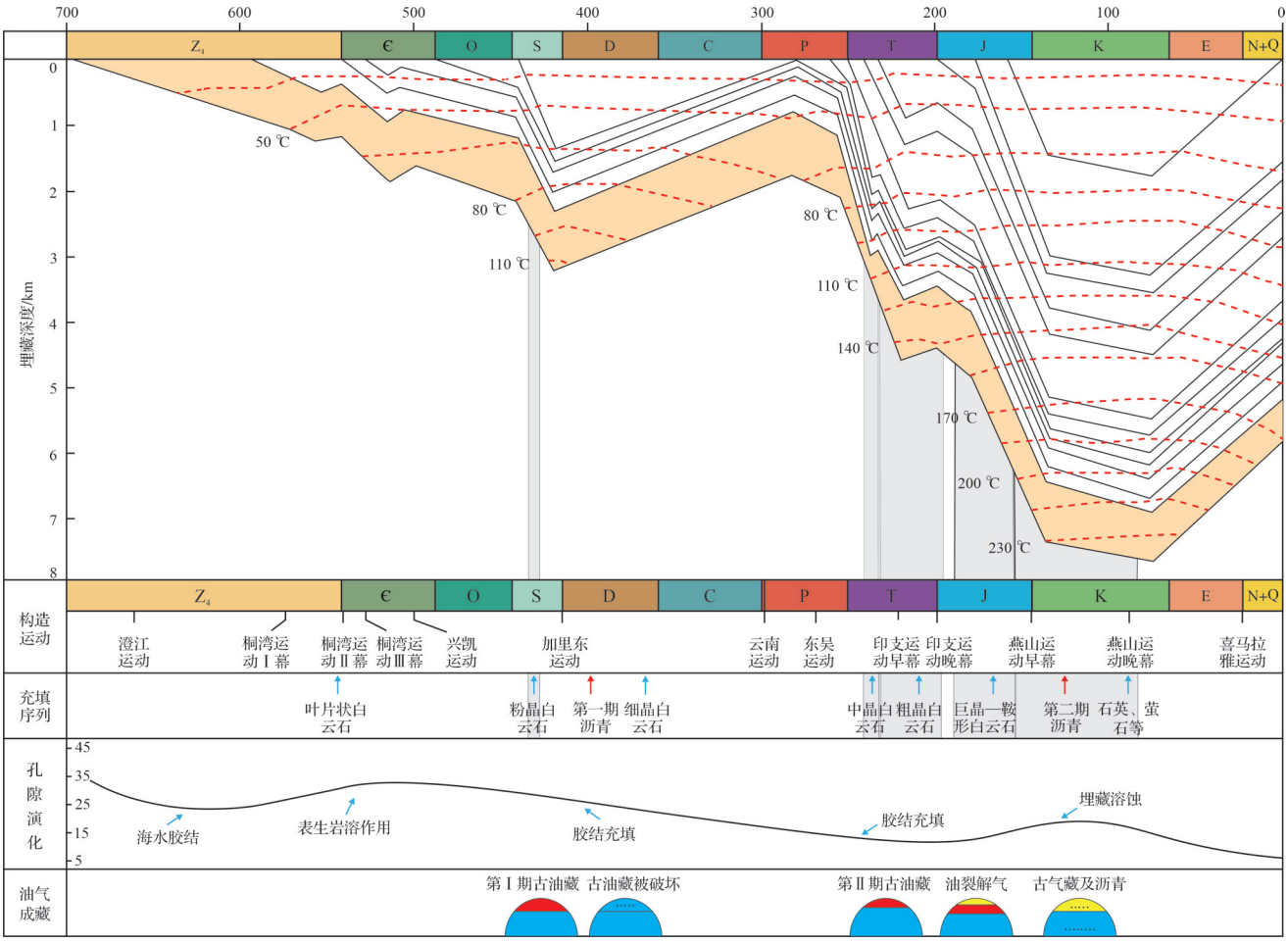


图 11 研究区震旦系灯四段埋藏史、热演化史及油气成藏事件图

Fig.11 Burial history, thermal evolution history and hydrocarbon accumulation event map of the Fourth member of the Dengying Formation of the Sinian system in the study area

参考文献(References)

陈艺娴,廖明光,王文之,等. 2021. 四川盆地上震旦统灯影组四段典型碳酸盐岩类型及沉积模式[J]. 天然气勘探与开发,44(1):38-45. [Chen Yixian, Liao Mingguang, Wang Wenzhi, et al. 2021. Typical carbonate rock types and sedimentary models of the 4th member of the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin [J]. Natural Gas Exploration and Development, 44(1): 38-45.]

范俊佳,姜华,鲁雪松,等. 2022. 四川盆地蓬莱地区震旦系灯影组气藏压力演化与成藏过程[J]. 天然气工业,42(12):32-43. [Fan Junjia, Jiang Hua, Lu Xuesong, et al. 2022. Pressure evolution and hydrocarbon accumulation process of Sinian Dengying Formation gas reservoirs in the Penglai area, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 42(12): 32-43.]

方少仙,侯方浩,董兆雄. 2003. 上震旦统灯影组中非叠层石生态系兰细菌白云岩[J]. 沉积学报,21(1):96-105. [Fang Shaoxian, Hou Fanghao, Dong Zhaoxiong. 2003. Non-stromatoltite ecologic system cyanobacteria dolostone in Dengying Formation of Upper-Sinian[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 21(1): 96-105.]

郭恒玮,伏美燕,宋荣彩,等. 2022. 川中高石梯地区灯四段藻丘类型与沉积模式[J]. 沉积学报,40(1):217-228. [Guo Hengwei, Fu Meiyan, Song Rongcai, et al. 2022. Algal type and sedimentary model of the 4th member, Dengying Formation in the Gaoshiti area of Chuanzhong[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 40(1): 217-228.]

郝毅,杨迅,王宇峰,等. 2017. 四川盆地震旦系灯影组表生岩溶作用研究[J]. 沉积与特提斯地质,37(1):48-54. [Hao Yi, Yang Xun, Wang Yufeng, et al. 2017. Supergene karstification in the Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 37(1): 48-54.]

黄思静,张雪花,刘丽红,等. 2009. 碳酸盐成岩作用研究现状与前瞻[J]. 地学前缘,16(5):219-231. [Huang Sijing, Zhang Xuehua, Liu Lihong, et al. 2009. Progress of research on carbonate diagenesis[J]. Earth Science Frontiers, 16(5): 219-231.]

黄文明,刘树根,马文辛,等. 2011. 四川盆地东南缘震旦系下古生界储层特征及形成机制[J]. 石油天然气学报,33(7):7-12. [Huang Wenming, Liu Shugen, Ma Wenxin, et al. 2011. Reservoir characteristics and formation mechanism of Sinian-Lower Paleozoic in the southeastern margin of Sichuan Basin[J]. Journal of Oil and

Gas Technology, 33(7): 7-12.]

姜华，李文正，黄士鹏，等. 2022. 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，42(5)：11-23. [Jiang Hua, Li Wenzheng, Huang Shipeng, et al. 2022. Process and model of hydrocarbon accumulation spanning major tectonic phases of Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 42(5): 11-23.]

蒋裕强，谷一凡，朱讯，等. 2017. 四川盆地川中地区震旦系灯影组热液白云岩储集相[J]. 天然气工业，37(3)：17-24. [Jiang Yuqiang, Gu Yifan, Zhu Xun, et al. 2017. Hydrothermal dolomite reservoir facies in the Sinian Dengying Fm, central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 37(3): 17-24.]

金民东，谭秀成，李毕松，等. 2019. 四川盆地震旦系灯影组白云岩成因[J]. 沉积学报，37(3)：443-454. [Jin Mindong, Tan Xiucheng, Li Bisong, et al. 2019. Genesis of dolomite in the Sinian Dengying Formation in the Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 37(3): 443-454.]

李毕松，金民东，朱祥，等. 2023. 川东北地区灯四段储层成岩作用及孔隙演化[J]. 地学前缘，30(6)：32-44. [Li Bisong, Jin Mindong, Zhu Xiang, et al. 2023. Reservoir diagenesis and porosity evolution of the 4th member of the Dengying Formation in northeastern Sichuan Basin[J]. Earth Science Frontiers, 30(6): 32-44.]

刘树根，李泽奇，邓宾，等. 2021. 四川盆地震旦系灯影组深层碳酸盐岩储层沥青赋存形态及其油气藏示踪作用[J]. 天然气工业，41(8)：102-112. [Liu Shugen, Li Zeqi, Deng Bin, et al. 2021. Occurrence morphology of bitumen in Dengying Formation deep and ultra-deep carbonate reservoirs of the Sichuan Basin and its indicating significance to oil and gas reservoirs[J]. Natural Gas Industry, 41(8): 102-112.]

刘树根，马永生，黄文明，等. 2007. 四川盆地上震旦统灯影组储集层致密化过程研究[J]. 天然气地球科学，18(4)：485-496. [Liu Shugen, Ma Yongsheng, Huang Wenming, et al. 2007. Densification process of Upper Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 18(4): 485-496.]

罗青云，王剑，杜秋定，等. 2024. 川北地区灯影组四段白云岩成岩演化对优质储层的控制作用[J]. 沉积学报，42(6)：2174-2190. [Luo Qingyun, Wang Jian, Du Qiuding, et al. 2024. Controls on the high-quality dolomite reservoir of the 4th member of Dengying Formation related to the diagenetic evolution, northern Sichuan Basin[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 42(6): 2174-2190.]

马奎，文龙，张本健，等. 2022. 四川盆地德阳：安岳侵蚀裂陷槽分段性演化分析和油气勘探意义[J]. 石油勘探与开发，49(2)：274-284. [Ma Kui, Wen Long, Zhang Benjian, et al. 2022. 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, 49(2): 274-284.]

马行陟，戴博凯，柳少波，等. 2022. 川中地区北部震旦系灯二段储层沥青特征及意义[J]. 天然气地球科学，33(8)：1251-1262. [Ma Xingzhi, Dai Bokai, Liu Shaobo, et al. 2022. Characteristics and significance of reservoir solid bitumen in the Second member of Sinian Dengying Formation in the north of central Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 33(8): 1251-1262.]

莫静，王兴志，谢林，等. 2013. 川中震旦系灯影组碳酸盐岩成岩作用及储层孔隙演化[J]. 石油天然气学报，35(8)：32-38. [Mo Jing, Wang Xingzhi, Xie Lin, et al. 2013. Diagenesis and pore evolution of carbonate in Sinian Dengying Formation in central Sichuan province[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 35(8): 32-38.]

单秀琴，张静，张宝民，等. 2016. 四川盆地震旦系灯影组白云岩岩溶储层特征及溶蚀作用证据[J]. 石油学报，37(1)：17-29. [Shan Xiuqin, Zhang Jing, Zhang Baomin, et al. 2016. Dolomite karst reservoir characteristics and dissolution evidences of Sinian Dengying Formation, Sichuan Basin[J]. Acta Petrolei Sinica, 37(1): 17-29.]

沈安江，赵文智，胡安平，等. 2021. 碳酸盐矿物定年和定温技术及其在川中古隆起油气成藏研究中的应用[J]. 石油勘探与开发，48(3)：476-487. [Shen Anjiang, Zhao Wenzhi, Hu Anping, et al. 2021. The dating and temperature measurement technologies for carbonate minerals and their application in hydrocarbon accumulation research in the paleo-uplift in central Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 48(3): 476-487.]

宋金民，刘树根，孙玮，等. 2013. 兴凯地裂运动对四川盆地灯影组优质储层的控制作用[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，40(6)：658-670. [Song Jinmin, Liu Shugen, Sun Wei, et al. 2013. Control of Xingkai taphrogenesis on Dengying Formation high quality reservoirs in Upper Sinian of Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 40(6): 658-670.]

宋泽章，葛冰飞，王文之，等. 2023. 超深层古油藏的定量表征及其对气藏形成的指示意义：以川中古隆起北斜坡灯影组为例[J]. 地球科学，48(2)：517-532. [Song Zezhang, Ge Bingfei, Wang Wenzhi, et al. 2023. Quantitative characterization of ultra-deep paleo-oil reservoirs and its indication for deep gas accumulation: A case study on the Dengying Formation, the North slope of central Sichuan paleo-uplift[J]. Earth Science, 48(2): 517-532.]

孙玮，刘树根，宋金民，等. 2017. 叠合盆地古老深层碳酸盐岩油气成藏过程和特征：以四川叠合盆地震旦系灯影组为例[J]. 成都理工大学学报(自然科学版)，44(3)：257-285. [Sun Wei, Liu Shugen, Song Jinmin, et al. 2017. Hydrocarbon accumulation process and characteristics of ancient deep carbonate rocks in superposed basin: A case study of Sinian Dengying Formation in Sichuan superposed basin[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 44(3): 257-285.]

王文之，杨跃明，文龙，等. 2016. 微生物碳酸盐岩沉积特征研究：以四川盆地高磨地区灯影组为例[J]. 中国地质，43(1)：306-318. [Wang Wenzhi, Yang Yueming, Wen Long, et al. 2016. A study of sedimentary characteristics of microbial carbonate: A case study of the Sinian Dengying Formation in Gaomo area, Sichuan Basin[J]. Geology in China, 43(1): 306-318.]

王兴志，穆曙光，方少仙，等. 2000. 四川盆地西南部震旦系白云岩成岩过程中的孔隙演化[J]. 沉积学报，18(4)：549-554. [Wang

Xingzhi, Mu Shuguang, Fang Shaoxian, et al. 2000. Evolution of porosity in the process of Sinian dolostone diagenesis in southwest Sichuan[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 18(4): 549-554.]

魏国齐,王志宏,李剑,等. 2017. 四川盆地震旦系、寒武系烃源岩特征、资源潜力与勘探方向[J]. 天然气地球科学,28(1):1-13. [Wei Guoqi, Wang Zhihong, Li Jian, et al. 2017. Characteristics of source rocks, resource potential and exploration direction of Sinian and Cambrian in Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 28(1): 1-13.]

魏国齐,谢增业,杨雨,等. 2022. 四川盆地中部北斜坡震旦系—寒武系大型岩性气藏形成条件[J]. 石油勘探与开发,49(5):835-846. [Wei Guoqi, Xie Zengye, Yang Yu, et al. 2022. Formation conditions of Sinian-Cambrian large lithologic gas reservoirs in the north slope area of central Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 49(5): 835-846.]

文龙,王文之,张健,等. 2017. 川中高石梯—磨溪地区震旦系灯影组碳酸盐岩岩石类型及分布规律[J]. 岩石学报,33(4):1285-1294. [Wen Long, Wang Wenzhi, Zhang Jian, et al. 2017. Classification of Sinian Dengying Formation and sedimentary evolution mechanism of Gaoshiti-Moxi area in central Sichuan Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 33(4): 1285-1294.]

解楠,宋嘉琦,白栋,等. 2023. 川中蓬莱地区震旦系灯影组流体包裹体特征及成藏期次[J]. 非常规油气,10(3):55-63. [Xie Nan, Song Jiaqi, Bai Dong, et al. 2023. Characteristics of fluid inclusions and accumulation stages of Sinian Dengying Formation in Penglai area, central Sichuan[J]. Unconventional Oil & Gas, 10(3): 55-63.]

谢增业,李剑,杨春龙,等. 2021. 川中古隆起震旦系—寒武系天然气地球化学特征与太和气区的勘探潜力[J]. 天然气工业,41(7):1-14. [Xie Zengye, Li Jian, Yang Chunlong, et al. 2021. Geochemical characteristics of Sinian-Cambrian natural gas in central Sichuan paleo-uplift and exploration potential of Taihe gas area[J]. Natural Gas Industry, 41(7): 1-14.]

徐春春,沈平,杨跃明,等. 2014. 乐山—龙女寺古隆起震旦系—下寒武统龙王庙组天然气成藏条件与富集规律[J]. 天然气工业,34(3):1-7. [Xu Chunchun, Shen Ping, Yang Yueming, et al. 2014. Accumulation conditions and enrichment patterns of natural gas in the lower Cambrian Longwangmiao Fm reservoirs of the Leshan-Longnüsi paleohigh, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 34(3): 1-7.]

许海龙,魏国齐,贾承造,等. 2012. 乐山—龙女寺古隆起构造演化及对震旦系成藏的控制[J]. 石油勘探与开发,39(4):406-416. [Xu Hailong, Wei Guoqi, Jia Chengzao, et al. 2012. Tectonic evolution of the Leshan-Longnüsi paleo-uplift and its control on gas accumulation in the Sinian strata, Sichuan Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 39(4): 406-416.]

杨平,刘家洪,杨菲,等. 2018. 黔北灯影组自生石英流体包裹体特征及油气成藏演化[J]. 沉积与特提斯地质,38(2):82-93. [Yang Ping, Liu Jiahong, Yang Fei, et al. 2018. Fluid inclusions in authigenic quartz and hydrocarbon accumulation in the Dengying Formation in Renhuai, northern Guizhou[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 38(2): 82-93.]

杨威,魏国齐,谢武仁,等. 2022. 克拉通内裂陷边缘台缘丘滩体规模储层发育主控因素与成因模式:以四川盆地德阳—安岳克拉通内裂陷东侧灯影组四段为例[J]. 天然气地球科学,33(10):1541-1553. [Yang Wei, Wei Guoqi, Xie Wuren, et al. 2022. Main controlling factors and genetic mechanism for the development of high-quality reservoirs in the mound-shoal complexes on the platform margin mound-beach body at platform margin of the inner cratonic rift: Case study of the Fourth member of Dengying Formation in the east side of the Deyang-Anyue cratonic rifts, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 33(10): 1541-1553.]

杨威,魏国齐,赵蓉蓉,等. 2014. 四川盆地震旦系灯影组岩溶储层特征及展布[J]. 天然气工业,34(3):55-60. [Yang Wei, Wei Guoqi, Zhao Rongrong, et al. 2014. Characteristics and distribution of karst reservoirs in the Sinian Dengying Fm, Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 34(3): 55-60.]

杨雨,文龙,宋泽章,等. 2022. 川中古隆起北部蓬莱气区多层系天然气勘探突破与潜力[J]. 石油学报,43(10):1351-1368,1394. [Yang Yu, Wen Long, Song Zezhang, et al. 2022. Breakthrough and potential of natural gas exploration in multi-layer system of Penglai gas area in the north of central Sichuan paleo-uplift[J]. Acta Petrolei Sinica, 43(10): 1351-1368, 1394.]

张杰,Jones B,潘立银,等. 2014. 四川盆地震旦系灯影组葡萄状白云岩成因[J]. 古地理学报,16(5):715-725. [Zhang Jie, Jones B, Pan Liyin, et al. 2014. Origin of botryoidal dolostone of the Sinian Dengying Formation in Sichuan Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 16(5): 715-725.]

张玺华,李勇,张本健,等. 2023. 四川盆地中江—蓬莱地区灯二段储层特征及优质储层成因机制[J]. 成都理工大学学报(自然科学版),50(3):301-312. [Zhang Xihua, Li Yong, Zhang Benjian, et al. 2023. Characteristics and formation mechanism of high quality reservoir of the Second member of the Dengying Formation in Zhongjiang-Penglai area, Sichuan Basin, China[J]. Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition), 50(3): 301-312.]

张晓博,郭清海,张梦昭,等. 2023. 碳酸盐岩热储中稀土元素的地球化学行为及其指示意义:以施甸地热系统为例[J]. 地球科学,48(3):908-922. [Zhang Xiaobo, Guo Qinghai, Zhang Mengzhao, et al. 2023. Geochemical behavior and indicative effect of REEs in carbonate geothermal reservoir: A case of Shidian geothermal system[J]. Earth Science, 48(3): 908-922.]

张荫本,唐泽尧,陈季高. 1996. 粘结岩分类及应用[J]. 天然气勘探与开发,19(4):24-33. [Zhang Yinben, Tang Zeyao, Chen Jigao. 1996. Classification and application of caking rock[J]. Natural Gas Exploration and Development, 19(4): 24-33.]

赵东方,谭秀成,罗文军,等. 2022. 早成岩期岩溶特征及其对古老深层碳酸盐岩储层的成因启示:以川中地区磨溪8井区灯影组四段为例[J]. 石油学报,43(9):1236-1252. [Zhao Dongfang, Tan Xiucheng, Luo Wenjun, et al. 2022. Karst characteristics at early

diagenetic stage and their enlightenment for the origin of ancient deep carbonate reservoirs: A case study of the member 4 of Dengying Formation in Moxi 8 well area, central Sichuan[J]. Acta Petrolei Sinica, 43(9): 1236-1252.]

赵彦彦,李三忠,李达,等. 2019. 碳酸盐(岩)的稀土元素特征及其古环境指示意义[J]. 大地构造与成矿学,43(1):141-167. [Zhao Yanyan, Li Sanzhong, Li Da, et al. 2019. Rare earth element geochemistry of carbonate and its paleoenvironmental implications[J]. Geotectonica et Metallogenia, 43(1): 141-167.]

朱东亚,金之钧,孙冬胜,等. 2014. 南方震旦系灯影组热液白云岩化及其对储层形成的影响研究:以黔中隆起为例[J]. 地质科学,49(1) 161-175. [Zhu Dongya, Jin Zhijun, Sun Dongsheng, et al. 2014. Hydrothermally dolomitized reservoir bed in Sinian Dengying Formation, northern China: An example from Central Guizhou uplift[J]. Chinese Journal of Geology, 49(1): 161-175.]

邹才能,杜金虎,徐春春,等. 2014. 四川盆地震旦系—寒武系特大型气田形成分布、资源潜力及勘探发现[J]. 石油勘探与开发,41(3):278-293. [Zou Caineng, Du Jinhu, Xu Chunchun, et al. 2014. Formation, distribution, resource potential and discovery of the Sinian- Cambrian giant gas field, Sichuan Basin, SW China[J]. Petroleum Exploration and Development, 41(3): 278-293.]

Burne R V, Moore L S. 1987. Microbialites: Organosedimentary deposits of benthic microbial communities[J]. Palaios, 2(3): 241-254.

Dahl J E, Moldowan J M, Peters K E, et al. 1999. Diamondoid hydrocarbons as indicators of natural oil cracking[J]. Nature, 399(6731): 54-57

Davies G R, Smith Jr L B. 2006. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An Overview[J]. AAPG Bulletin, 90 (11): 1641-1690.

Ehrenberg S N, Eberli G P, Keramati M, et al. 2006. Porosity-permeability relationships in interlayered limestone-dolostone reservoirs[J]. AAPG Bulletin, 90(1): 91-114.

Folk R L. 1959. Practical petrographic classification of limestones[J]. AAPG Bulletin, 43(1): 1-38.

Frimmel H E. 2009. Trace element distribution in Neoproterozoic carbonates as palaeoenvironmental indicator[J]. Chemical Geology, 258(3/4): 338-353.

Henderson P. 1984. Rare earth element geochemistry[M]. Amsterdam: Elsevier.

Hood A V S, Wallace M W, Drysdale R N. 2011. Neoproterozoic aragonite-dolomite seas? Widespread marine dolomite precipitation in Cryogenian reef complexes[J]. Geology, 39(9): 871-874.

Liseroudi M H, Ardakani O H, Pedersen P K, et al. 2022. Fluid flow and water/rock interaction during the Early Triassic evolution of the western Canada sedimentary basin as revealed by carbonate diagenesis[J]. Marine and Petroleum Geology, 142: 105765.

Mazzullo S J. 2004. Overview of porosity evolution in carbonate reservoirs[J]. Search and Discovery, 79: 20-28.

Pepper A S, Corvi P J. 1995. Simple kinetic models of petroleum formation. Part I: Oil and gas generation from kerogen[J]. Marine and Petroleum Geology, 12(3): 291-319.

Saller A H, Lounsbury K, Birchard M. 2001. Facies control on dolomitization and porosity in the Devonian Swan Hills Formation in the Rosevear area, west-central Alberta[J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 49(4): 458-471.

Su A, Chen H H, Feng Y X, et al. 2022. 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, 368: 106481.

Wang J B, He Z L, Zhu D Y, et al. 2020. Petrological and geochemical characteristics of the botryoidal dolomite of Dengying Formation in the Yangtze Craton, South China: Constraints on terminal Ediacaran "dolomite seas"[J]. Sedimentary Geology, 406: 105722.

Zhang K J, Li Q H, Yan L L, et al. 2017. Geochemistry of limestones deposited in various plate tectonic settings[J]. Earth-Science Reviews, 167: 27-46.

Reservoir Diagenesis, Pore Evolution and Oil and Gas Charging in the Fourth Member of the Sinian Dengying Formation in the Penglai Area, Central Sichuan

WANG BingSen[1,2], YUAN HaiFeng[1,2], WANG Tao[1,2], TAN Qian[1,2], ZHANG FengShun[1,2]

1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

2. School of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China

Abstract: [**Objective**] The Dengying Formation in the Penglai area of central Sichuan has achieved a major breakthrough in petroleum exploration. The Fourth member of the Dengying Formation has experienced multiple stages of oil and gas charging owing to its large burial depth, old age, and complex diagenetic evolution. However, the relationship between reservoir pore evolution and oil and gas charging remains unclear. [**Methods**] Based on drilling coring data, the petrological types, reservoir space characteristics, diagenetic types, diagenetic evolution sequence, pore evolution, and hydrocarbon charging of the Fourth member of the Dengying Formation were studied through thin section observation, cathodoluminescence, in situ microelement analysis, and fluid inclusion. [**Results**] The reservoir rock types of the Fourth member of the Dengying Formation in the Penglai area are mainly crystalline, granular, and microbial dolomite. The types of reservoir space can be divided into three types: cave, pore, and fracture. The main diagenetic types are syngene-parsyngenetic dissolution, epigenetic dissolution, buried dissolution, cementation and filling, tectonic rupture, silicification, and compaction. Diagenesis in different stages jointly controls the evolution of reservoir pores in the four members of the Dengying Formation, among which the constructive diagenesis is dissolution and rupture in different periods, and the destructive diagenesis is compaction and pressure-dissolution and cementation and filling. [**Conclusions**] The filling sequence of cement in the solution holes of the Fourth member of the reservoir can be divided into: the first generation blade-like dolomite → the second generation powdery dolomite → the first stage bitumen → the third generation fine crystalline dolomite → the fourth generation medium crystalline dolomite → the fifth generation coarse crystalline dolomite → the sixth generation giant crystalline saddle-shaped dolomite → the second stage bitumen → the seventh generation quartz, fluorite and other minerals. Based on the information, such as type, phase state, and homogenization temperature, of fluid inclusions captured by cemented fill of each stage the oil-gas charging process of the Fourth member of the Dengying Formation in the Penglai area was reconstructed, as follows: Paleo-oil reservoir charging in the Middle and Late Silurian period (the first phase of fossil oil reservoir) → Late Caledonian paleo-oil reservoir destruction → Middle Triassic paleo-oil reservoir charging (the second phase of fossil oil reservoir) → Late Jurassic paleo-gas cracking in paleo-oil reservoir → the adjustment and formation of paleo-gas reservoir from the Late Cretaceous to present, in which the late oil cracking gas → gaseous hydrocarbon charging is the main forming period of the Fourth member gas reservoir of the Dengying Formation.

Key words: Penglai area; Dengying Formation; diagenesis; pore evolution; oil-gas charging

---

Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41572133, 41872130

Corresponding author: YUAN HaiFeng, E-mail: yuanhaifeng08@cdut.cn