

川中南部地区下二叠统栖霞组白云岩储层成因研究

赵娟^{1,2}, 曾德铭¹, 梁锋², 范玲², 侯甫², 宋林珂², 王家树², 滕怡葳³

(1. 西南石油大学地球科学与技术学院, 四川 成都 610500;

2. 中国石油西南油气田公司川中油气矿, 四川 遂宁 629000;

3. 中国石油川庆钻探公司地质勘探开发研究院, 四川 成都 610051)

摘要: 川中南部地区下二叠统栖霞组在钻探中发现栖二段细—中晶白云岩是良好的储层, 并且多口井获得工业气流, 展示出一定勘探潜力。为进一步预测川中南部地区白云岩的储层分布特征, 加快研究区下一步勘探开发, 应用储层岩性特征识别、碳氧同位素、包裹体测温、阴极发光以及稀土元素分析研究白云岩储层成因, 结果表明栖霞组白云岩无石膏或其他蒸发盐岩伴生, 储集岩以细—中晶白云岩和灰质白云岩为主, 主要分布于栖二段; 栖霞组白云岩 C、O 同位素测试 $\delta^{13}\text{C}$ 为 4.03‰~4.77‰、古盐度为 131.74~133.39, 包裹体均一温度为 110~180 °C, 阴极发光较弱, 基质白云岩发紫红色光, 溶洞充填马鞍状白云岩不发光; 稀土元素的轻稀土和重稀土分布趋势一致, 保持了原岩的稀土配分趋势; 综合分析认为栖二段白云岩为埋藏成因, 其中裂缝和溶洞充填的马鞍状白云岩为热液成因。

关键词: 栖霞组; 白云岩; 阴极发光; 包裹体; 埋藏成因; 热液成因

中图分类号: P618.13

文献标识码: A

THE GENESIS OF THE DOLOMITIC RESERVOIRS OF THE LOWER PERMIAN QIXIA FORMATION IN THE SOUTH CENTRAL SICHUAN BASIN

ZHAO Juan^{1,2}, ZENG Deming¹, LIANG Feng², FAN Ling², HOU Fu², SONG Linke²,
WANG Jiashu², TENG Yiwei³

(1. School of Geosciences, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. Chuazhong Petroleum Resource Plant, Southwest Oil and Gas Company, CNPC, Suining 629000, Sichuan, China;

3. Institute of geological exploration and development, Chuazhong drilling company, CNPC, Chengdu 610051, Sichuan, China)

Abstract: During the exploration of the south central Sichuan Basin, the fine-medium grained dolostones of Lower Permian Qixia Formation was found as good reservoir rocks. Industrial gas flows were obtained in numbers of development wells, which reveals great potentiality of the gas exploration. For the further prediction of dolomite reservoir distribution characteristics in central and southern regions, speeding up the next exploration and development of the study area, the genesis of dolomite reservoir is studied through the application of reservoir lithology recognition, carbon and oxygen isotope, fluid inclusion, cathodoluminescence and rare earth elements analysis in this study. The results show that, in the Qixia Formation, the dolostones formed without associated gypsum or other evaporites; the reservoir rocks are mainly gray fine-medium grained dolostones, which spread mainly in the Qier Group. According to a

series of reservoir rock analysis, the $\delta^{13}\text{C}$ content is 4.03 ~ 4.77‰; the paleosalinity varies among 131.74 ~ 133.39; the homogenization temperatures of fluid inclusions are among 110 ~ 180 °C; the cathodoluminescence is fairly weak, and the dolomitic matrix reflects purple red light, while the saddle dolomite filled in the vugs absorbs all the light; the distribution trend of light rare earth elements and heavy ones are consistent with the protolith. Overall, in this study it is believed that the Qier Group dolomites were formed during the burial stage, while saddle dolomites filled in the vugs and fractures were formed due to a hydrothermal cause.

Key words: the Qixia Formation; dolostone; cathodoluminescence; inclusions; buried genesis; hydrothermal genesis

川中油气区在 first 口钻穿下二叠统的女基井栖霞组测试获工业气流以来,截至2017年6月底,对川中南部地区钻达下二叠统钻井显示进行了统计,栖霞组见显示的井有69口,共计137井次,且主要分布在川中南部地区,以气侵和气测异常为主,并且多口井测试获得工业油气流,其中最高天然气测试日产量达 $41.74 \times 10^4 \text{ m}^3$,证实了川中南部地区下二叠统栖霞组具有一定的勘探潜力。通过前期研究成果认为,该时期碳酸盐岩沉积时均为灰岩,但栖霞组良好储层段岩性均为白云岩,属于次生成因^[1]。白云岩成因研究一直是碳酸盐岩油气藏勘探研究的热点与难点问题,目前主要成因类型有原生沉淀、准同生白云化、回流渗透白云化、混合白云化、埋藏白云化、淡水、热液成因等^[2]。针对四川盆地白云岩的成因研究,相关学者认为栖霞组白云岩为受高能相带控制下的混合水白云化成因,或是热液成因,但多数研究都仅限于川西地区^[3],在川中地区对于栖霞组白云岩储层成因研究甚少。通过大量调研白云岩成因机理研究实例,总结现有白云岩研究方法、技术与原理,结合研究区沉积和构造演化背景,根据已有岩心资料,充分应用碳氧同位素、包裹体测温、阴极发光、稀土元素测量等技术^[3],分析得出了研究区内白云岩的岩石学特征和成因。研究成果不仅可以丰富四川盆地下二叠统栖霞组白云岩成因理论,还可以弄清川中南部地区栖霞组白云岩储层分布规律,以期为今后优质白云岩储层的预测提供依据。

1 研究区概况

研究区总体隶属于川中古隆中斜平缓带,西北为磨溪气田,东北为广安气田,东侧紧邻华蓥

山,与川南古坳中隆低陡弯形带及川东古斜中隆高陡断褶带以华蓥山为界。受华蓥山断裂带的影响,研究区内背斜构造多为北东向延伸。局部构造褶皱幅度较弱,构造宽且平缓。

已有研究^[4]显示川中南部地区栖霞组地层总厚度为90 ~ 140 m,内部地层从上自下可分为栖霞二段、栖霞一段,白云岩储层主要发育于栖霞二段。栖霞组地层由南西向北东方向逐渐增厚,这与栖霞组沉积时期的古地貌高低和填平补齐沉积作用有关。目前对四川盆地下二叠统的沉积相研究观点基本统一^[5],柳江运动及云南运动使得下二叠统之前地层暴露,经长期风化剥蚀,形成小规模的地形起伏差异,在下二叠沉积期,整个四川盆地属于上扬子碳酸盐岩台地,期间经历过若干次的海平面升降变化,进而使得整个四川盆地不同时期的沉积特征不尽相同,存在着一定程度的沉积差异,川中南部地区栖霞时期主要发育台内滩相(见图1)。

2 白云岩储层成因研究

2.1 白云岩储层特征

通过野外剖面踏勘、岩心描述、镜下薄片观察和岩化资料分析发现,研究区内栖霞组地层以灰岩、泥质灰岩沉积为主,偶含燧石,无石膏或其他蒸发盐岩伴生;研究区栖霞组储集岩以细一中晶白云岩、灰质白云岩和白云质灰岩为主,其中细一中晶白云岩是栖霞组最好的储集岩类,白云化程度高,白云石含量达94% ~ 98%,主要为基质白云石及少量加大边白云石。常见储集空间有粒间孔、晶间孔(见图2a)、溶孔、溶洞(见图2b)、溶缝,洞面及缝面常见马鞍状白云石。据此可以判定白云岩成因为毛细管浓缩(蒸发泵)作

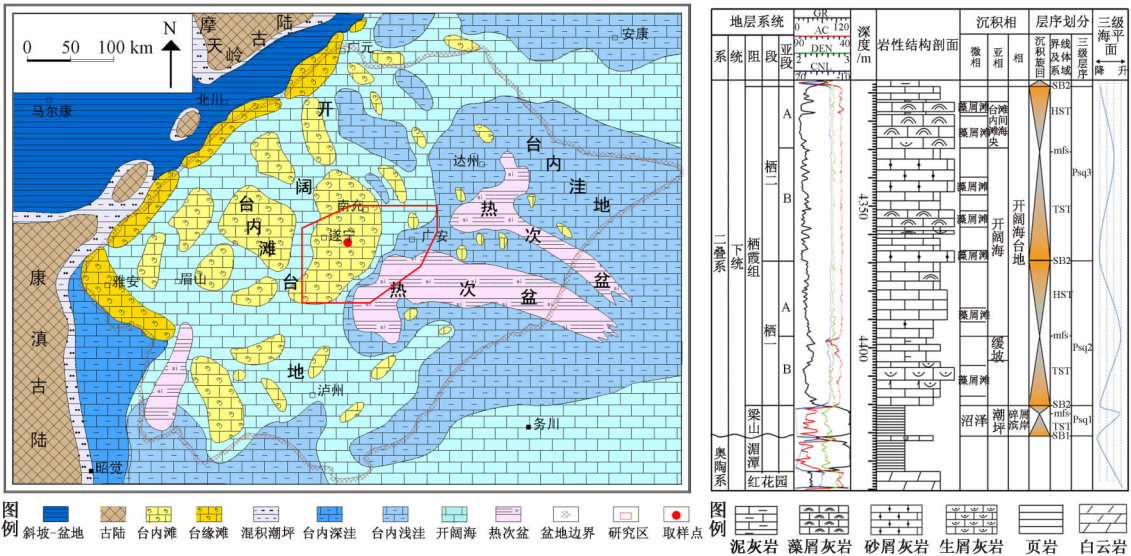
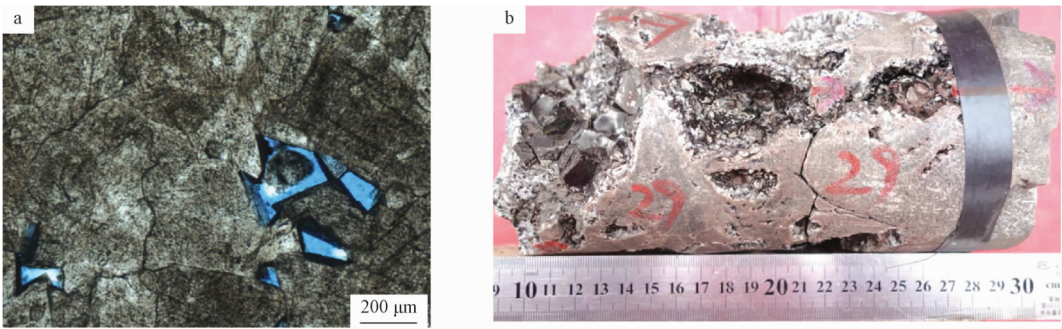


图 1 四川盆地地下二叠统栖霞期岩相古地理图及层序地层柱状图

Fig. 1 Lithofacies palaeogeographic map of the Lower Permian Qixia Formation in the Sichuan basin and sequence stratigraphic histogram



a—磨溪 42 井岩石铸体薄片 (栖霞二 4650.44 m, 中晶白云岩晶间孔发育, 图中蓝色区域为晶间孔);
b—磨溪 42 井岩心 (栖霞二 4652.99 ~ 653.19 m, 细—粉晶白云岩, 溶洞发育)

图 2 储集空间类型

Fig. 2 Reservoir space types

用和渗透回流作用的可能性较小, 因为上述两种作用均发生在蒸发作用强烈的泻湖、潮坪等环境, 使海水浓缩达到高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 而形成白云岩, 该环境常有蒸发盐岩相伴生; 其次, 毛细管浓缩作用形成的白云岩为微晶或粉晶, 达不到细晶级别^[6-14]。

2.2 碳氧同位素

根据同位素分馏原理, 海水蒸发作用使¹²C 和¹⁶O 等较轻的元素挥发, 使得海水中 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 偏正, 但 $\delta^{18}O$ 受高温影响会偏负, 并随埋深增大、温度升高而负值增大^[12-13]。据磨溪 42 井栖霞二 5 个灰岩、4 个基质白云石和 5 个溶洞充填马鞍状白云石的 C、O 同位素测试, 灰岩 $\delta^{13}C$ 为 3.58‰ ~ 4.44‰, 平均 3.91‰, 古盐度 Z 为 131.45 ~ 133.21; 基质白云岩 $\delta^{13}C$ 为 4.03‰ ~ 4.3‰, 平均

4.21‰, 古盐度 Z 为 131.74 ~ 132.82; 马鞍状白云石 $\delta^{13}C$ 为 4.45‰ ~ 4.77‰, 平均 4.59‰, 古盐度 Z 为 132.64 ~ 133.39。根据 C、O 同位素分析认为, 栖霞二白云岩是在海水环境中形成的, 淡水成因可能性较小^[15-17]。

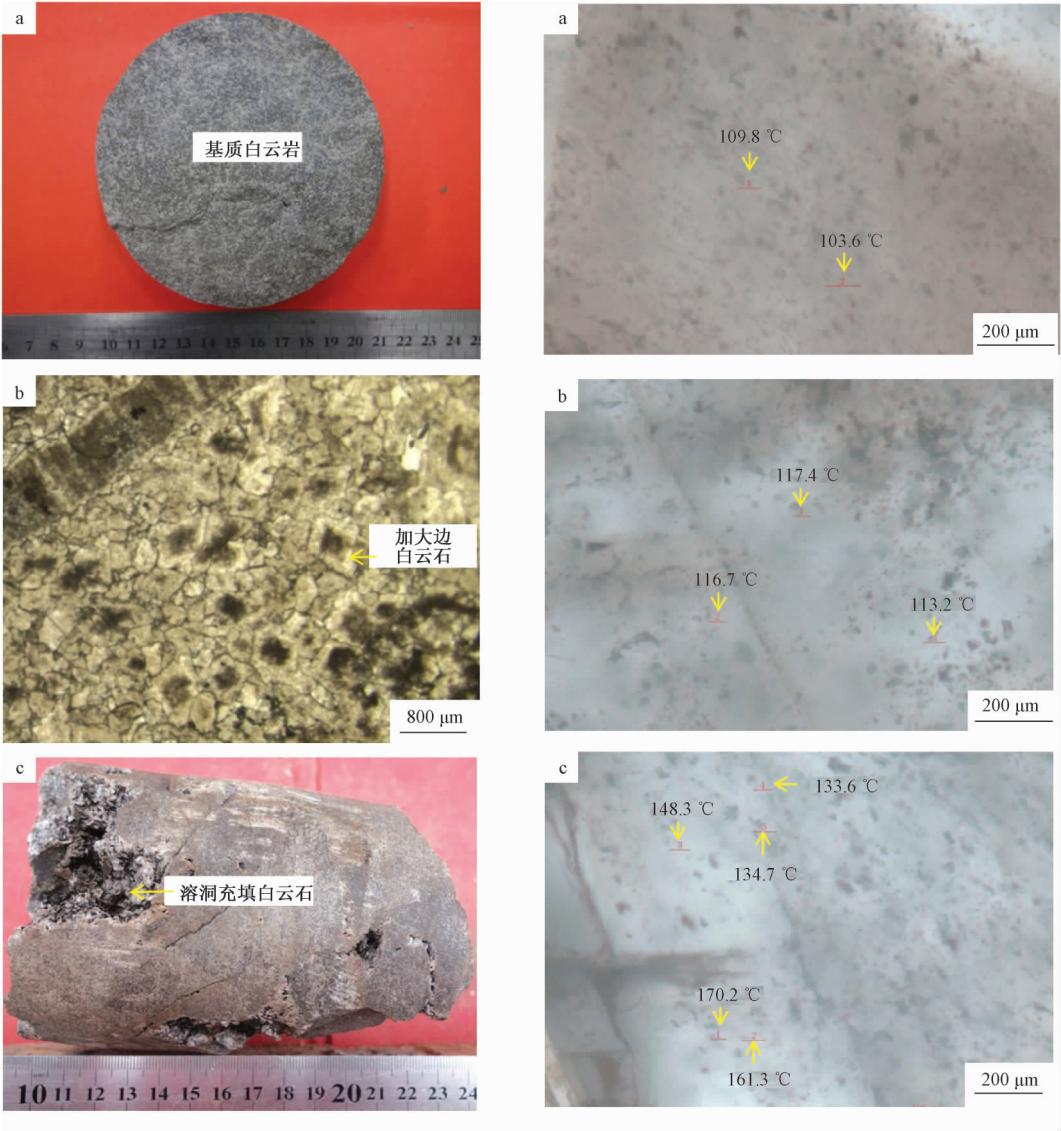
2.3 包裹体测温

包裹体在其形成之初为均匀的热流体, 由于温度和压力降低, 产生了相界线, 出现了相的分异; 给样品升温, 当包裹体内部的两相 (或多相) 转变成单一的均匀相时, 这时的温度即为均一温度 (也叫充填温度), 它代表了包裹体的形成温度。

此次实验分析主要是对盐水包裹体或含烃盐水包裹体的均一化温度进行了测试。从磨溪 42 井栖霞二 30 个白云岩中的包裹体测温统计来看, 均

一化温度分布在 103.6 ℃ ~ 170.2 ℃, 其中基质白云岩包裹体均一化温度分布在 100 ℃ ~ 130 ℃, 加大边白云岩包裹体均一化温度分布在 110 ℃ ~ 120 ℃, 溶洞充填白云岩包裹体均一化温度分布在 120 ℃ ~ 180 ℃, 溶洞充填白云岩具有比基质白云岩和加大边白云岩更高的包裹体均一化温度, 最

高甚至达到了 170 ℃ (见图 3、图 4)。整体来看栖霞组内白云岩均一化温度都比较高, 基质白云岩、加大边白云岩和溶洞充填白云岩包裹体的均一化温度区分明显, 后期充填白云石形成时的温度更高^[15-16]。由此可以排除近地表的毛细管浓缩作用、渗透回流、淡水、混合水等作用成因。



a—基质白云岩, 栖霞二段 4653.02 m, 左岩心照片, 右包裹体照片;
b—加大边白云岩, 栖霞二段 4650.86 m, 左单偏光, 右包裹体照片;
c—溶洞充填白云岩, 栖霞二段 4653.19 m, 左岩心照片, 右包裹体照片

图 3 磨溪 42 井栖霞组白云岩包裹体测温

Fig. 3 Temperature measurement of dolomite inclusions in the Qixia formation of well Moxi 42

2.4 阴极发光

白云石阴极发光特征主要基于 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量及比率的变化, Mn^{2+} 是发光激活剂, Fe^{2+} 是主要的发光淬灭剂。通常随埋深的增大和热液流体的影响, 白云石的阴极发光颜色因 Fe^{2+} 含量的变化。

正常海水中的 Mn、Fe 含量较低, 而成岩流体 (包括孔隙流体和大气水) 中 Mn、Fe 含量更高, 在开放环境中 Fe^{2+} 易被氧化成 Fe^{3+} 而失去对阴极发光的淬灭作用, 故混合水白云化和淡水作用形成的白云石发光主要呈现亮橘黄色, 且淡水白云石内

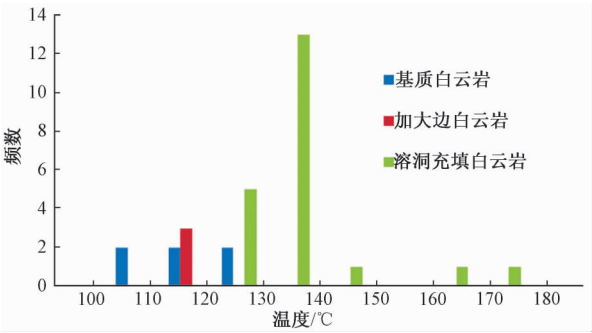
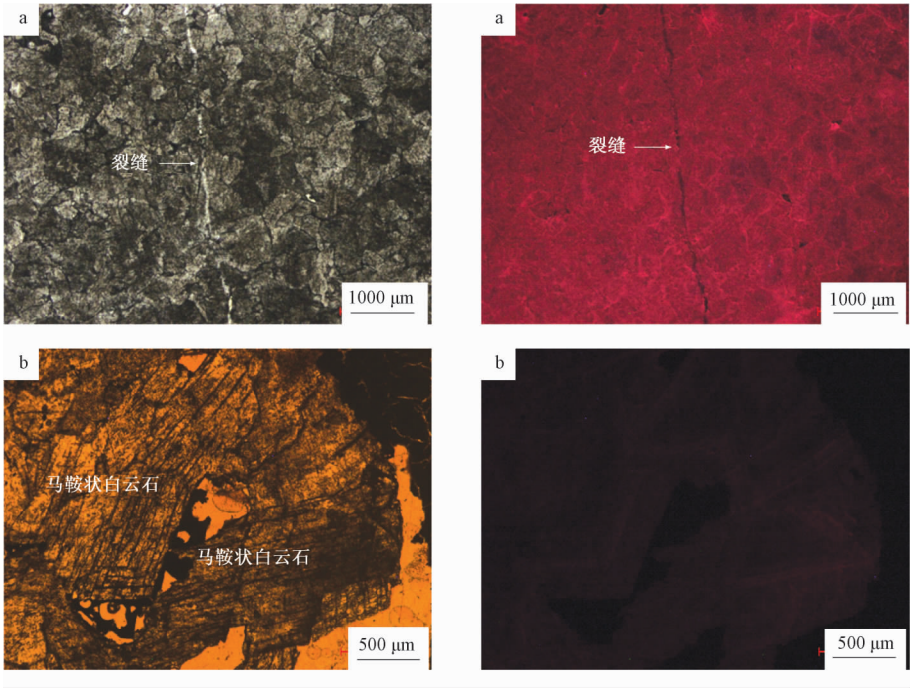


图 4 磨溪 42 井栖霞组白云岩包裹体测温统计
Fig. 4 Temperature measurement statistics of dolomite inclusions in the Qixia formation of well Moxi 42

部环带构造发育；而相对封闭环境中形成的毛细管浓缩白云岩、回流渗透白云岩、埋藏白云岩、热液白云岩等发光强度整体不强。因此可以通过白云石阴极发光特征判断白云岩成因^[18~19]。

研究区内通过取心观察，栖霞二段灰岩几乎不发光，晶粒白云岩整体发紫红色光、部分晶粒边缘

发光稍强，而裂缝中充填的白云岩和溶洞中充填的鞍状白云石发光极弱或几乎不发光（见图 5），说明栖霞组灰岩在正常海水沉积后，埋藏成岩至今，未发生蚀变作用，仍然保留了原始沉积海水的低 Mn、Fe 含量，发光极弱；在后期云化过程中，由于整体处于封闭的还原环境，且受白云岩化流体的影响，原岩中的部分 Ca、Mg 被 Mn、Fe 取代，Mn、Fe 的相互作用使晶粒白云岩呈紫红色；白云岩晶粒受重结晶作用使自生加大边的 Mn、Fe 含量发生变化，发光强度稍强；后期裂缝充填的白云岩和溶洞充填的鞍状白云石形成时的温度更高，表现在包裹体温度较原岩明显升高，且 Fe 含量异常升高发生淬灭作用而使阴极发光几乎消失。白云岩晶粒、自生加大边白云石、鞍状白云石三者的形成环境不同，反映经历了不同的成岩作用，三者的发光均不强，排除开放环境中的混合水白云石化和淡水白云石化作用。



a—中晶白云岩，整体发紫红色光，裂缝不发光，栖霞 4657.44 m；
b—鞍形白云石发光很暗，发极弱的暗红色光，栖霞 4653.02 m

图 5 磨溪 42 井栖霞组白云岩阴极发光特征（左为单偏光，右为阴极发光）

Fig. 5 Cathodoluminescence characteristics of dolomite cores of the Qixia formation in well Moxi 42

2.5 稀土元素

稀土元素指镧系的 15 个元素，且具有相似的地球化学性质，故在地质作用和造岩过程中常作为一个整体运移。但该组元素仍存在微小差异，

且铈元素（Ce）和铕元素（Eu）差异明显，因此常用稀土元素总量（REE）、轻重稀土比（LREE/HREE）、铈异常、铕异常等参数来对沉积演化进行研究^[19~22]。总的来说，海水来源的白云岩 REE

低, Ce 正异常, 轻稀土元素 (LREE) 较富集, 重稀土元素 (HREE) 配分曲线平坦; 大气淡水淋滤的白云岩 REE 含量较正常白云岩低, 保持了 LREE 相对富集的原岩特征, Ce 正异常减弱, 常表现为 Ce 负异常; 成岩—成烃流体作用的白云岩 REE 含量稍微降低, 配分模式与海水类似; 热液流体作用的白云岩使白云岩 REE 含量降低, Eu 正异常, 稀土含量变化复杂, REE 配分曲线起伏不平^[23~25]。

研究区内磨溪 42 井栖二段 5 个灰岩和 7 个白云岩样品的稀土元素与北美页岩标准化处理后 (见图 6), 轻稀土 (LREE) 和重稀土 (HREE) 的分布趋势较一致, 没有表现出明显的轻稀土或重稀土的富集或亏损, 轻稀土和重稀土作为一个整体迁移; 灰岩有相对较高的稀土元素总量, 在云化过程中稀土元素整体发生了迁移, 白云岩的稀土总量明显减少, 但 LREE 与 HREE 的含量差别不大, 其中有一个马鞍状白云岩样品表现为明显的 Eu 正异常, 反映栖二段白云岩整体为埋藏成因, 但溶洞中充填的马鞍状白云岩为热液成因。

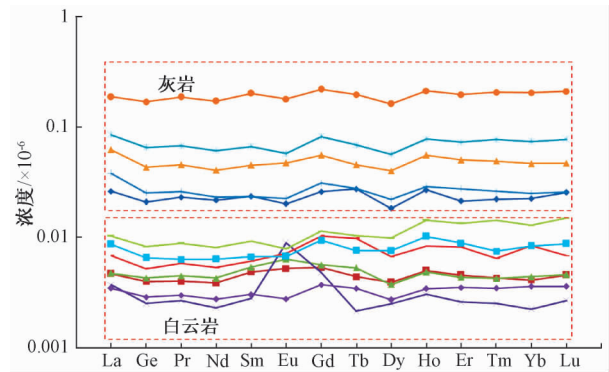


图 6 磨溪 42 井栖霞组灰岩、白云岩样品
稀土元素北美页岩标准化分配模式
Fig. 6 Normalized distribution model of rare earth elements of
North American shale from limestone and dolomite
samples in the Qixia formation of well Moxi 42

3 结论与讨论

3.1 颗粒滩相是白云石化作用发生的有利相带

下二叠沉积期前, 构造运动使地形呈现差异起伏, 下二叠沉积期, 海平面升降变化使整个四川盆地形成不同的沉积特征。研究区栖霞时期主要沉积相为台内滩相, 滩体发育于古地貌高点, 在海平面频繁的升降作用下, 发生暴露溶蚀, 从

而形成大量孔隙, 这些孔隙作为白云石化流体贮存及流动场所, 为白云石化作用的发生创造了条件。因此, 川中南部地区栖霞组台内滩相是白云石化作用发生的有利相带。

3.2 栖霞组白云岩的主要成因为埋藏热液成因

磨溪 42 井样品地球化学分析结果显示, 栖霞组以灰岩沉积为主, 无石膏或其他蒸发盐岩伴生, 白云岩以细—中晶云岩为主, 晶粒较粗, 排除毛细管浓缩 (蒸发泵) 作用和渗透回流作用; C、O 同位素测试 $\delta^{13}C$ 为 4.03‰ ~ 4.77‰、古盐度为 131.74 ~ 133.39, 由此排除淡水成因; 包裹体均一温度为 110 ~ 180 ℃, 排除近地表的毛细管浓缩作用、渗透回流、淡水、混合水等作用成因; 阴极发光较弱, 基质白云岩发紫红色光和溶洞充填马鞍状白云岩不发光, 再次排除淡水和混合水成因; 稀土元素的轻稀土 (LREE) 和重稀土 (HREE) 分布趋势一致, 保持了原岩的稀土配分趋势, 与淡水、热液作用无关; 有一个样品明显出 Eu 正异常, 表现为热液作用。通过上述分析, 认为栖二段白云岩主要是埋藏热液成因, 埋藏环境较高的温度使得栖霞组白云石沉淀作用得以顺利进行, 热液流体通过裂缝、断层等循环流动, 从而在裂缝和溶洞中形成充填的马鞍状白云岩。

参考文献/References

[1] 李祖兵, 欧家强, 陈轩, 等. 川中地区下二叠统白云岩储层特征及发育主控因素 [J]. 大庆石油地质与开发, 2017, 36 (4): 1 ~ 8.
LI Zubing, OU Jiaqiang, CHEN Xuan, et al. Characteristics and main development controlling factors for lower Permian dolomite reservoirs in Chuansong region [J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2017, 36 (4): 1 ~ 8. (in Chinese with English abstract)
[2] 赵澄林, 朱筱敏. 沉积岩石学 [M]. 3 版. 北京: 石油工业出版社, 2001.
ZHAO Chenglin, ZHU Xiaomin. Sedimentary petrology [M]. The third edition. Beijing: Petroleum Industry Press, 2001. (in Chinese)
[3] 孟森, 周进高, 杨柳, 等. 川西地区中二叠统栖霞组中—粗晶白云岩成因 [J]. 海相油气地质, 2017, 22 (1): 75 ~ 83.
MENG Sen, ZHOU Jingao, YANG Liu, et al. Genesis of medium-coarse crystalline dolomite of middle Permian Qixia formation, Western Sichuan [J]. Marine Origin Petroleum Geology, 2017, 22 (1): 75 ~ 83. (in Chinese with English abstract)
[4] 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 Permian in Sichuan basin and adjacent areas, China [J]. Acta Petrolei Sinica, 2012, 33 (S2): 35 ~ 51. (in Chinese with English abstract)
- [5] 黄先平, 杨天泉, 张红梅. 四川盆地二叠统沉积相及其勘探潜力区研究 [J]. 天然气工业, 2004, 24 (1): 10 ~ 12.
- HUANG Xianping, YANG Tianquan, ZHANG Hongmei. Research on thesedimentary facies and exploration potential areas of lower Permian in Sichuan Basin [J]. Natural gas industry, 2004, 24 (1): 10 ~ 12. (in Chinese with English abstract)
- [6] 李昌峰, 侯明才, 张小青, 等. 川东北元坝地区上二叠统长兴组优质储层形成机制 [J]. 地质力学学报, 2015, 21 (2): 278 ~ 289.
- LI Changfeng, HOU Mingcai, ZHANG Xiaoqing, et al. Formation mechanism of high-quality reservoirs in the Upper Permian Changxing formation in Yuanba gas field, Northeastern Sichuan Basin [J]. Journal of Geomechanics, 2015, 21 (2): 278 ~ 289. (in Chinese with English abstract)
- [7] 赫云兰, 刘波, 秦善. 白云石化机理与白云岩成因问题研究 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 2010, 46 (6): 1010 ~ 1020.
- HE Yunlan, LIU Bo, QIN Shan. Study on the dolomitization and Dolostone genesis [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2010, 46 (6): 1010 ~ 1020. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李会军, 周新桂, 张林炎, 等. 塔河油田、普光气田碳酸盐岩储层特征对比研究 [J]. 地质力学学报, 2009, 15 (4): 396 ~ 408.
- LI Huijun, ZHOU Xingui, ZHANG Linyan, et al. Carbonate reservoir comparison between Tahe oil field and Puguang gas field [J]. Journal of Geomechanics, 2009, 15 (4): 396 ~ 408. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李振宏, 杨永恒. 白云岩成因研究现状及进展 [J]. 油气地质与采收率, 2005, 12 (2): 5 ~ 8.
- LI Zhenhong, YANG Yongheng. Present situation and progress of research on dolomite genesis [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2005, 12 (2): 5 ~ 8. (in Chinese with English abstract)
- [10] 朱东亚, 金之钧, 胡文瑄. 塔北地区下奥陶统白云岩热液重结晶作用及其油气储集意义 [J]. 中国科学: 地球科学, 2010, 40 (2): 156 ~ 170.
- ZHU Dongya, JIN Zhijun, HU Wenxuan. Hydrothermal recrystallization of lower Ordovician dolomite and its significance for hydrocarbon accumulation in North Tarim Basin [J]. Chinese Science: Earth Science, 2010, 40 (2): 156 ~ 170. (in Chinese with English abstract)
- [11] 杨玉芳, 钟建华, 陈志鹏, 等. 塔中地区寒武-奥陶系白云岩成因类型及空间分布 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31 (4): 455 ~ 462.
- YANG Yufang, ZHONG Jianhua, CHEN Zhipeng, et al. Genesis types and distribution pattern of the Cambrian and Ordovician dolomites in Tazhong area, the Tarim Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31 (4): 455 ~ 462. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王小林, 胡文瑄, 张军涛, 等. 白云岩物质组分与结构对微孔储集体系形成的制约——以塔里木盆地古生界白云岩为例 [J]. 天然气地球科学, 2008, 19 (3): 320 ~ 326.
- WANG Xiaolin, HU Wenxuan, ZHANG Juntao, et al. Dolomite composition and texture constrain the formation of Micropore Reservoir: an example From low Paleozoic dolomite, Tarim Basin [J]. Natural Gas Geoscience, 2008, 19 (3): 320 ~ 326. (in Chinese with English abstract)
- [13] 朱金富, 于炳松, 樊太亮, 等. 沉积成岩环境对白云岩储层的影响 [J]. 新疆地质, 2009, 27 (1): 43 ~ 48.
- ZHU Jinfu, YU Bingsong, FAN Tailiang, et al. He Cambrian-lower Ordovician dolomite reservoir development conditions in Tarim Basin [J]. Xinjiang Geology, 2009, 27 (1): 43 ~ 48. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李聪. 歧口凹陷沙一下段湖相白云岩形成机理及储层特征 [D]. 北京: 中国石油大学 (华东), 2011.
- LI Cong. Genesis and reservoir characteristics of lacustrine dolomite in the lower part of the Sha-1 formation in Qikou Depression [D]. Beijing: China University of Petroleum (East China), 2011. (in Chinese with English abstract)
- [15] 苏中堂, 陈洪德, 徐粉燕, 等. 鄂尔多斯盆地马家沟组白云岩地球化学特征及白云岩化机制分析 [J]. 岩石学报, 2011, 27 (8): 2230 ~ 2238.
- SU Zhongtang, CHEN Hongde, XU Fenyan, et al. Geochemistry and dolomitization mechanism of Majiagou dolomites in Ordovician, Ordos, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2011, 27 (8): 2230 ~ 2238. (in Chinese with English abstract)
- [16] 魏喜, 祝永军, 许红, 等. 西沙群岛新近纪白云岩形成条件的探讨: C、O 同位素和流体包裹体证据 [J]. 岩石学报, 2006, 22 (9): 2394 ~ 2404.
- WEI Xi, ZHU Yongjun, XU Hong, et al. Discussion on Neogene dolostone forming condition in Xisha Islands: evidences form isotope C and O and fluid inclosures [J]. Acta Petrologica Sinica, 2006, 22 (9): 2394 ~ 2404. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李伟, 蒲仁海, 卿海若. 威林斯頓盆地奥陶系白云岩储层同位素与成岩作用分析 [J]. 石油实验地质, 2009, 31 (1): 87 ~ 91.
- LI Wei, PU Renhai, QING Hairuo. Analysis of isotopes and Diagenesis of Ordovician dolomite reservoir in the Williston Basin [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2009, 31 (1): 87 ~ 91. (in Chinese with English abstract)
- [18] 刘洁, 皇甫红英. 碳酸盐矿物的阴极发光性与微量元素的关系 [J]. 沉积与特提斯地质, 2000, 20 (3): 71 ~ 76.

LIU Jie, HUANGFU Hongying. The cathodoluminescence and trace elements in carbonate minerals [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2000, 20 (3): 71 ~ 76. (in Chinese with English abstract)

[19] 孙靖, 黄小平, 金振奎, 等. 碳酸盐矿物阴极发光性的控制因素分析 [J]. 沉积与特提斯地质, 2009, 29 (1): 102 ~ 108.

SUN Jing, HUANG Xiaoping, JIN Zhenkui, et al. Controlling factors of cathodeluminescence of carbonate minerals [J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 2009, 29 (1): 102 ~ 108. (in Chinese with English abstract)

[20] 陈琪, 胡文瑄, 王小林, 等. 川东北盘龙洞长兴组—飞仙关组白云岩稀土元素配分特征及成因 [J]. 石油实验地质, 2011, 33 (6): 624 ~ 633, 638.

CHEN Qi, HU Wenxuan, WANG Xiaolin, et al. Characteristics and genesis of REE patterns of Changxing and Feixianguan dolomites in Panlongdong, northeastern Sichuan [J]. Petroleum Geology and Experiment, 2011, 33 (6): 624 ~ 633, 638. (in Chinese with English abstract)

[21] 胡文瑄, 陈琪, 王小林, 等. 白云岩储层形成演化过程中不同流体作用的稀土元素判别模式 [J]. 石油与天然气地质, 2010, 31 (6): 810 ~ 818.

HU Wenxuan, CHEN Qi, WANG Xiaolin, et al. REE models for the discrimination of fluids in the formation and evolution of dolomite reservoirs [J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31 (6): 810 ~ 818. (in Chinese with English abstract)

[22] 陈永权, 周新源. 白云岩埋藏成岩作用过程中的金属元素与同位素再分配规律与受控因素 [J]. 海相油气地质, 2009, 14 (3): 65 ~ 67.

CHEN Yongquan, ZHOU Xinyuan. Theory of ion radius: the reassigning theory of metal elements and isotopes during burial diagenesis process for dolostone [J]. Marine Origin and Petroleum Geology, 2009, 14 (3): 65 ~ 67. (in Chinese with English abstract)

[23] 吴仁强, 朱井泉, 胡文瑄, 等. 塔里木盆地寒武系—奥陶系白云岩稀土元素特征及其成因意义 [J]. 现代地质, 2009, 23 (4): 638 ~ 647.

WU Renqiang, ZHU Jingquan, HU Wenxuan, et al. Rare earth element geochemistry characteristics of Cambrian ~ Ordovician Dolostones in the Tarim Basin and their implications for the origin [J]. Geoscience, 2009, 23 (4): 638 ~ 647. (in Chinese with English abstract)

[24] 黄思静, 石和, 刘洁, 等. 锶同位素地层学研究进展 [J]. 地球科学进展, 2001, 16 (4): 194 ~ 200.

HUANG Sijing, SHI He, LIU Jie, et al. Progress in strontium isotope stratigraphy [J]. Advance in Earth Sciences, 2001, 16 (4): 194 ~ 200. (in Chinese)

[25] 刘静, 季宏兵. 锶及其同位素在环境地球化学研究中的应用 [J]. 首都师范大学学报 (自然科学版), 2008, 29 (4): 67 ~ 73.

LIU Jing, JI Hongbing. Sr isotope characteristics and its indicative significance for biogeochemistry [J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition), 2008, 29 (4): 67 ~ 73. (in Chinese with English abstract)