

## 四川盆地东部长兴组礁灰岩 缺乏大规模白云石化作用的原因分析及启示

潘立银<sup>1,2</sup>, 张建勇<sup>1,2</sup>, 胡安平<sup>1,2</sup>, 王小芳<sup>1,2</sup>, 韦东晓<sup>1,2</sup>, 王永生<sup>1,2</sup>

(1 中国石油杭州地质研究院; 2 中国石油天然气集团公司碳酸盐岩储层重点实验室)

**摘要** 位于四川盆地东部开江—梁平海槽西南侧台地边缘的长兴组礁灰岩, 沉积时具有很高的原生孔隙度, 但由于缺乏大规模白云石化作用, 现今多数礁灰岩致密无孔。研究表明礁灰岩缺乏白云石化作用可能与早期白云石化流体供应不足有关, 而并非如前人推测的是由于早期海水胶结作用将孔隙完全充填堵塞造成白云石化流体无法进入所致。早期海水胶结作用结束后, 长兴组礁灰岩中仍存在大量孔隙及流体活动空间, 但由于礁灰岩(礁核相)位于台地边缘靠近海槽的高能区, 受早期沉积环境的控制, 成岩流体为活跃循环的正常海水, 不具备发生白云石化作用所需的轻度咸化海水渗透回流的条件。埋藏成岩环境下块状亮晶方解石的胶结作用是造成礁灰岩中孔隙完全丧失的原因。

**关键词** 四川盆地; 晚二叠世; 长兴组; 碳酸盐岩储层; 礁灰岩; 白云石化作用; 孔隙演化

**中图分类号**: TE121.2\*3

**文献标识码**: A

四川盆地东部上二叠统长兴组礁滩复合体是重要的天然气储集层<sup>[1-2]</sup>。在该套深埋地层中, 孔隙的发育状况与白云石化作用具有密切关系。我们知道, 虽然孔隙多分布在白云岩中, 但白云岩的原岩为礁盖、礁顶、礁翼等部位的粒泥灰岩和泥粒灰岩; 礁核部位的礁灰岩缺乏大规模白云石化作用, 尽管沉积时具有很高的孔隙度, 但现今多为致密的非储集层。基于这一原因, 以前的研究多以白云岩样品为对象, 虽然近二十年间针对白云岩的成因也开展了大量工作, 但仍未达到统一的认识<sup>[3]</sup>。礁灰岩由于缺乏油气地质意义而很少得到关注, 因此对礁灰岩中缺乏白云石化作用的原因也尚未进行过系统的分析, 仅在零星的研究中将其原因归结为早成岩阶段强烈的海水胶结作用造成孔隙被充填, 致使后期流体无法进入岩石中发生作用<sup>[4-5]</sup>。然而, 这种解释仅仅为推测, 并未得到验证。

本文以长兴组礁灰岩样品为研究对象, 利用岩石学、地球化学、流体包裹体等手段, 探讨其孔隙充填期所处的环境。在此基础上, 分析礁灰岩中缺乏

大规模白云石化作用的原因, 以期对四川盆地东部长兴组白云石化作用的探讨有所启示。

### 1 沉积背景与样品

四川盆地在古生代—中生代早中三叠世时期属于扬子克拉通盆地的一部分。中晚古生代泥盆纪—石炭纪, 受古特提斯洋扩张及俯冲作用影响, 四川盆地及邻区出现裂陷海槽。到二叠纪, 克拉通内裂陷作用进一步加强, 向盆地内部延伸。至晚二叠世长兴期, 裂陷作用加剧, 在构造拉张背景下, 形成了城口—鄂西海槽、开江—梁平海槽和南充—绵阳台内洼陷三个负向单元, 以及奉节—镇巴台坪、石柱—仪陇台坪和遂宁—磨溪台坪三个古地貌高地为特征的“三隆三凹”的古地理格局, 沿这些海槽边缘的高能沉积相带, 发育了长兴组礁滩复合体(图1)<sup>[2,6]</sup>。

四川盆地东部已发现的长兴组礁滩复合体主要分布于开江—梁平海槽西南与东北两侧, 以及城口—鄂西海槽西南侧的台地边缘相带(图1)。本次研

收稿日期: 2014-07-16; 改回日期: 2015-03-17

本文受国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(编号: 2011ZX05004-002)及中国石油天然气股份公司重大科技专项“深层油气勘探开发关键技术研究”(编号: 2014E-32)资助

潘立银: 1981年生, 工程师。2006年毕业于南京大学, 获硕士学位。主要从事碳酸盐岩岩石学和地球化学研究工作。通讯地址: 310023 浙江省杭州市西溪路920号; E-mail: panly\_hz@petrochina.com.cn

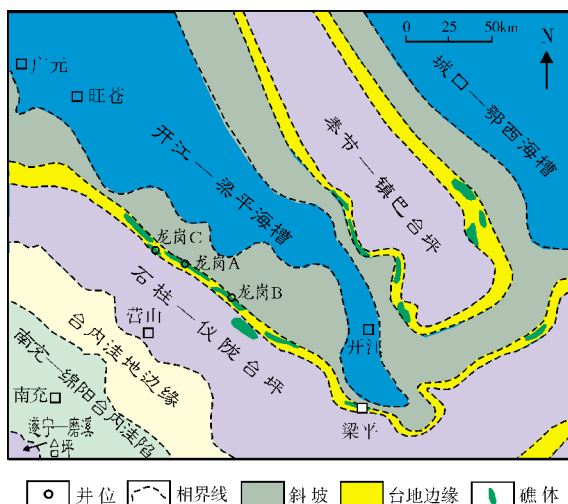


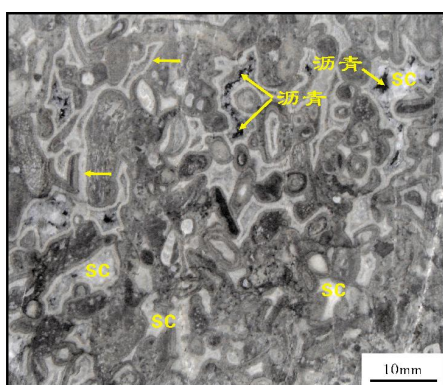
图1 四川盆地东部晚二叠世长兴组岩相古地理与研究区位置图(据文献[6],有修改)

究区域为龙岗地区,位于开江—梁平海槽西南侧,该区长兴组礁滩的沉积背景及岩石学特征与四川盆地东部其它地区相似,因而具有代表性。

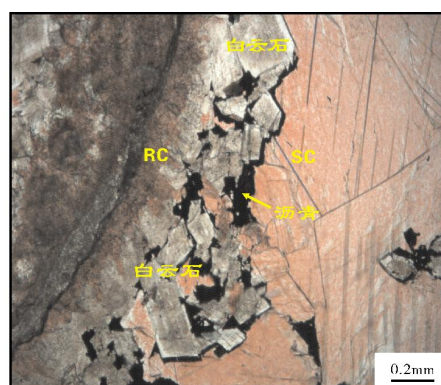
礁灰岩样品来自龙岗A井和龙岗B井的长兴组,同时为了进行对比研究,还从龙岗C井采集了少量白云岩样品。取样井的位置见图1。

## 2 礁灰岩的孔隙充填序列

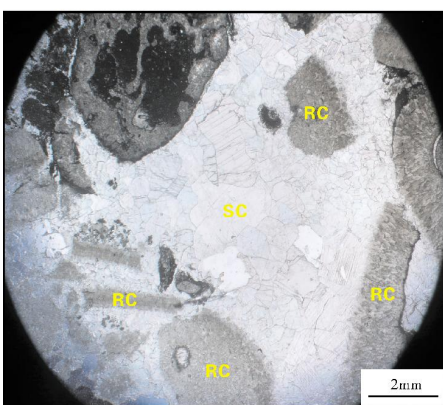
岩心观察与薄片镜下鉴定表明,礁灰岩的孔隙(格架孔、裂缝等)已被碳酸盐胶结物及沥青完全充填。碳酸盐胶结物可分为3类:放射轴状方解石、白云石和块状亮晶方解石(图2a,2b)。其中,放射轴状方解石和白云石沿格架孔分布,形成时间均早于沥青(图2b);块状亮晶方解石沿格架孔(图2c)和裂缝(图2d)分布,有些早于沥青(图2b),有些晚于沥



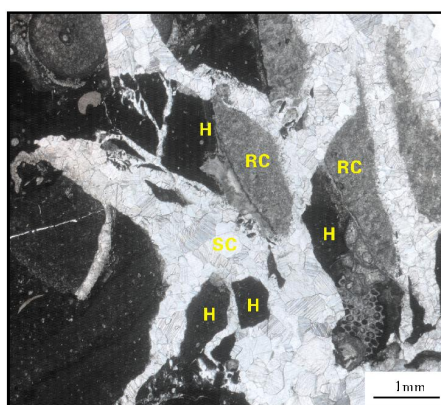
(a) 礁灰岩。格架孔中肉眼可见两期方解石胶结物,依次为等厚环边放射轴状方解石(箭头)、块状亮晶方解石(SC)。块状亮晶方解石形成之后的残余孔隙被沥青完全充填。龙岗A井6180.69m。岩心



(b) 礁灰岩。格架孔中依次充填放射轴状方解石(RC)、白云石、块状亮晶方解石(SC)。部分块状亮晶方解石的形成时间晚于沥青充填。龙岗A井6176.10m。染色薄片,单偏光



(c) 礁灰岩。格架孔中的块状亮晶方解石(SC)包裹放射轴状方解石(RC)碎块。龙岗B井6599.60m。岩心薄片,单偏光



(d) 礁灰岩。块状亮晶方解石(SC)沿裂缝分布,并包裹围岩(H)和放射轴状方解石(RC)的碎块。龙岗B井6609.28m。岩心薄片,单偏光

图2 四川盆地东部长兴组生物礁灰岩中孔隙与胶结物的特征

青(图2b),为了论述方便,这两类方解石分别称为沥青充填前亮晶方解石和沥青充填后亮晶方解石。

根据上述充填物的相互关系,建立了礁灰岩的孔隙充填物序列,它们由早到晚依次为:放射轴状方解石、白云石、沥青充填前亮晶方解石、沥青、沥青充填后亮晶方解石。

### 3 胶结物的形成环境

多期多类胶结物和沥青的存在表明,长兴组礁灰岩经历了复杂的成岩作用,孔隙彻底丧失的原因是长期经历成岩演化所致。为更好地揭示礁灰岩的孔隙演化过程,需要对主要胶结物的形成环境进行分析。

据观察,长兴组礁灰岩样品中,孔隙充填物以放射轴状方解石和块状亮晶方解石最为普遍。虽然放射轴状方解石在生长结束后,有少量的小孔隙被完全充填,但礁灰岩中仍残留大量孔隙;而块状亮晶方解石是礁灰岩中数量最大的胶结物,在其形成后,礁灰岩中的孔隙则几乎丧失殆尽。

由于白云石和沥青仅在部分样品中发育,且数量小于1%,故本文对其不做专门分析。

### 3.1 放射轴状方解石

放射轴状方解石是古代生物礁和灰泥丘中常见的胶结物,曾被视为纤状文石重结晶作用的产物<sup>[7-9]</sup>。Kendall<sup>[10]</sup>对澳大利亚Canning盆地上泥盆统研究后,将该类方解石解释为海水中沉淀的高镁方解石胶结物。

在长兴组礁灰岩的孔隙充填物中,放射轴状方解石形成最早,它们沿格架孔和生物体腔孔呈等厚环边分布(图2a, 2b),在有些较大的格架孔中可发育多层(单层厚度为1~3 mm)。从镜下看,该类方解石双晶面弯曲并向远端收敛,具波状消光。

在地球化学方面,长兴组礁灰岩中的放射轴状方解石与海水中沉积的灰泥具有类似的C、O、Sr同位素组成(图3a, 3b),且 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值位于长长期海水背景值范围内<sup>[11-12]</sup>(图3b);长兴组礁灰岩中放射轴状方解石的Sr浓度为250~415  $\mu\text{g/g}$ (图3c),这跟海水沉积灰泥以及Saller<sup>[13]</sup>报道的北太平洋Enewetak环礁中的中新统放射轴状方解石胶结物的Sr浓度(290~370  $\mu\text{g/g}$ )类似;此外,放射轴状方解石的Fe和Mn浓度也同样较低(图3d)。

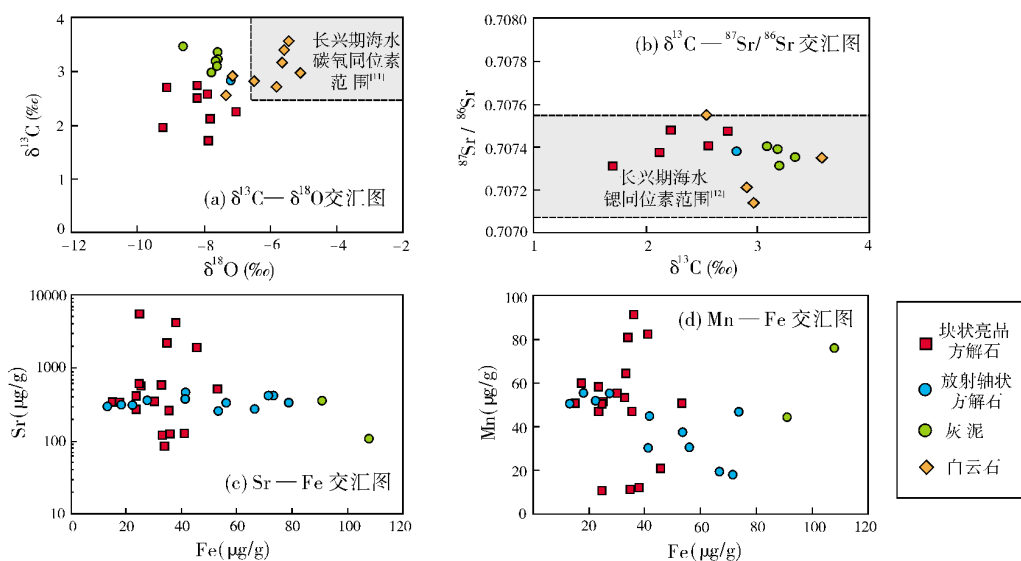


图3 四川盆地东部长兴组生物礁灰岩中不同结构组分的碳氧锶同位素以及微量元素交汇图

以上这些参数均为海水胶结物的典型特征,指示了放射轴状方解石胶结物形成于早期海水成岩环境。

### 3.2 块状亮晶方解石

块状亮晶方解石是古代灰岩中常见的胶结物,可形成于多种成岩环境,例如早期近地表大气淡水环境<sup>[14]</sup>、不同深度的埋藏环境<sup>[15-17]</sup>、表生期喀斯特环

境<sup>[18]</sup>等。据岩石学、地球化学、流体包裹体等证据显示,长兴组礁灰岩中的块状亮晶方解石形成时间较晚,为埋藏成岩环境的产物,其特征主要表现在:

(1)块状亮晶方解石形成于放射轴状方解石和白云石胶结物之后,甚至有一部分晚于沥青,为较晚的成岩矿物(图2b);

(2)块状亮晶方解石包裹放射轴状方解石和围



岩的碎块(图2c, 2d), 有些沿裂缝分布(图2d), 明显形成于压实作用之后;

(3) 块状亮晶方解石粒度大(0.2~1 mm, 最大可达10 mm), 由孔壁向孔隙中心晶体粒度具有变大的趋势(图2c), 显示了埋藏成岩环境的特点;

(4) 块状亮晶方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于放射轴状方解石, 暗示其形成温度高于后者(图3a);

(5) 部分块状亮晶方解石具有很高的Sr含量, 最高可达5376  $\mu\text{g/g}$ (图3c), 显示了封闭成岩体系的特点;

(6) 亮晶方解石中流体包裹体的均一温度全部高于100  $^{\circ}\text{C}$ (图4)。

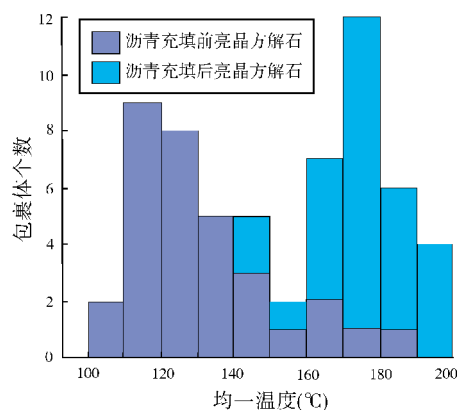


图4 四川盆地东部长兴组礁灰岩中块状亮晶方解石胶结物的流体包裹体均一温度分布图

## 4 礁灰岩缺乏大规模白云石化作用的原因分析

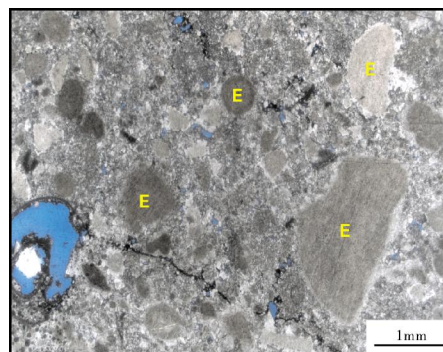
众所周知, 发生大规模白云石化作用需要满足三个基本条件<sup>[19]</sup>: ①存在充足的白云石化流体; ②存在使白云石化流体从源区进入先驱物的机制; ③先驱物具有一定的孔隙以利于白云石化流体的作用。

前面对胶结物形成环境的分析表明, 长兴组礁灰岩的孔隙在早期海水成岩作用期间因放射轴状方解石的形成而发生一定程度的损失; 在早期海水成岩作用结束后, 尚残留有大量孔隙, 直至深埋阶段(4600~5700m)孔隙才被完全充填——这意味着满足上述所说的大规模白云石化作用所需的第③个条件(本区礁灰岩缺乏大规模白云石化作用的现象, 无法用早期海水胶结作用造成孔隙被完全充填来解释)。另外, 部分礁灰岩样品中发育少量白云石, 说明存在使白云石化流体进入先驱物的机制, 即满足第②个条件。

如此看来, 长兴组礁灰岩中缺乏大规模的白云石

化作用可能与白云石化流体供应不足有关。前已述及, 长兴组白云岩多分布于礁盖、礁顶、礁翼, 而很少分布于礁核, 白云石化作用表现出的这种相带选择性暗示了它受成岩早期的沉积环境控制。从沉积环境上看, 礁核(礁灰岩)发育在台地边缘靠近海槽的高能区域, 成岩流体为活跃循环的正常海水(放射轴状方解石为典型产物), 不具备白云石化作用的潜力; 而礁盖、礁顶、礁翼等部位处于相对低能、局限环境, 海水循环慢, 同时蒸发作用可使海水轻度咸化、密度变大。轻度咸化海水的渗透回流可以引发白云石化作用, 这在美国二叠盆地<sup>[20]</sup>、地中海<sup>[21]</sup>等地区有过报道。

受成岩早期沉积环境控制的白云石化作用不仅能解释礁灰岩中缺乏大规模白云石化作用这一现象, 而且也得到了白云岩岩石学和地球化学数据的支持: (1)在有些白云岩中, 生物碎屑结构保存完好(图5), 表明白云石化作用发生在较低温度下(一般认为小于50  $^{\circ}\text{C}$ )<sup>[22]</sup>; (2)白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值位于同一时期海水背景值范围内(图3a, 3b), 反映了白云石化流体与海水或受过蒸发改造的海水有关。



白云岩中的棘屑(E)保存完好。龙岗C井6121.51m。岩心薄片, 单偏光

图5 四川盆地东部长兴组白云岩中的生物碎屑结构特征

## 5 结论

(1) 四川盆地东部长兴组礁灰岩具有很高的沉积孔隙度, 但绝大多数已在成岩作用过程中被胶结物所充填。礁灰岩中的放射轴状方解石和块状亮晶方解石为两类最重要的胶结物, 其中后者对孔隙的最终丧失起决定性作用。基于岩石学和地球化学分析认为: 放射轴状方解石为早期正常海水成岩作用的产物, 块状亮晶方解石为埋藏成岩作用的产物。

(2) 早期海水胶结作用结束后, 直至深埋阶段, 礁灰岩中仍存在有效孔隙及流体活动的空间。因此, 本区长兴组礁灰岩缺乏大规模白云石化作用的现

象,无法用早期海水胶结作用造成孔隙被完全充填来解释,本研究提出的受成岩早期沉积环境控制的轻度咸化海水渗透回流的机制对此作了很好的解释,并得到了白云岩的岩石学和地球化学数据支持。

#### 参考文献

- [1] 陈宗清. 四川盆地长兴组生物礁气藏及天然气勘探[J]. 石油勘探与开发, 2008, 35(2): 148-156.
- [2] 邹才能, 徐春春, 汪泽成, 等. 四川盆地台缘带礁滩大气区地质特征与形成条件[J]. 石油勘探与开发, 2011, 38(6): 641-651.
- [3] 刘树根, 黄文明, 张长俊, 等. 四川盆地白云岩成因的研究现状及存在问题[J]. 岩性油气藏, 2008, 20 (2): 6-15.
- [4] 吴熙纯, 刘效曾, 杨仲伦, 等. 川东上二叠统长兴组生物礁控储层的形成[J]. 石油与天然气地质, 1990, 11(3): 283-297.
- [5] 雷卞军, 强子同, 陈季高. 川东上二叠统生物礁成岩作用与孔隙演化[J]. 石油与天然气地质, 1991, 12(4): 364-375.
- [6] 张建勇, 周进高, 郝毅, 等. 四川盆地环开江—梁平海槽长兴组—飞仙关组沉积模式[J]. 海相油气地质, 2011, 16(3): 45-54.
- [7] Bathurst R G C. The cavernous structure of some Mississippian Stromatolite reefs in Lancashire, England[J]. Journal of Geology, 1959, 67(5): 506-521.
- [8] Bathurst R G C. Carbonate sediments and their diagenesis[M] // Developments in Sedimentology: 12. 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 1975: 475-516.
- [9] Kendall A C, Tucker M E. Radial fibrous calcite as a replacement after syn-sedimentary cement[J]. Nature (Physical Science), 1971, 232(29): 62-63.
- [10] Kendall A C. Radial fibrous calcite: A reappraisal [C] // Schneidermann N, Harris P M. Carbonate cements. Tulsa: SEPM Special Publication, 1985: 59-77.
- [11] Veizer J, Ala D, Azmy K, et al.  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{18}\text{O}$  evolution of Phanerozoic seawater[J]. Chemical Geology, 1999, 161(1): 59-88.
- [12] Korte C, Kozur H W, Bruckschen P, et al. Strontium isotope evolution of Late Permian and Triassic seawater[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2003, 67(1): 47-62.
- [13] Saller A H. Radial calcite in Lower Miocene Strata, sub-surface Enewetak Atoll[J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1986, 56(6): 743-762.
- [14] Bourque P A, Savard M M, Chi G, et al. Diagenesis and porosity evolution of the Upper Silurian-lowermost Devonian West Point reef limestone, eastern Gaspé Belt, Québec Appalachians [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 2001, 49(2): 299-326.
- [15] Choquette P W, James N P. Diagenesis in limestones 3: The deep burial environment[J]. Geoscience Canada, 1987, 14(1): 3-35.
- [16] Tobin K J, Walker K R, Goldberg S G. Burial diagenesis of middle Ordovician carbonate buildups (Alabama, USA): Documentation of the dominance of shallow burial conditions[J]. Sedimentary Geology, 1997, 114(1/4): 223-236.
- [17] Machel H G. Investigations of burial diagenesis in carbonate hydrocarbon reservoir rocks[J]. Geoscience Canada, 2005, 32 (3): 103-128.
- [18] 刘丽红, 黄思静, 王春连, 等. 碳酸盐岩中方解石胶结物的阴极发光环带与微量元素构成的关系——以塔河油田奥陶系碳酸盐岩为例[J]. 海相油气地质, 2010, 15(1): 55-60.
- [19] Machel H G. Concepts and models of dolomitization: A critical reappraisal [C] // Braithwaite C J R, Rizzi G, Darke G. The geometry and petrogenesis of dolomite hydrocarbon reservoirs. London: Geological Society, 2004: 7-63.
- [20] Melim L A, Scholle P A. Dolomitization of the Capitan Formation fore reef facies (Permian, west Texas and New Mexico): Seepage reflux revisited[J]. Sedimentology, 2002, 49(6): 1207-1227.
- [21] Qing Hairuo, Bosence D W J, Rose E P F. Dolomitization by penesaline sea water in Early Jurassic peritidal platform carbonates, Gibraltar, western Mediterranean[J]. Sedimentology, 2001, 48(1): 153-163.
- [22] Sibley D F, Gregg J M. Classification of dolomite rock textures [J]. Journal of Sedimentary Petrology, 1987, 57(6): 967-975.

编辑: 赵国宪

## Paucity of Pervasive Dolomitization in Upper Permian Changxing Reef Limestones in the East of Sichuan Basin: Cause and Implication

Pan Liyin, Zhang Jianyong, Hu Anping, Wang Xiaofang, Wei Dongxiao, Wang Yongsheng

**Abstract:** The Upper Permian Changxing reef limestones deeply buried in the platform margin by the southwest side of Kaijiang-Liangping Trough in the east of Sichuan Basin. These limestones are commonly tight due to paucity of large-scale dolomitization though they possessed high depositional porosity. It is shown that the paucity of large-scale dolomitization accounts for dolomitization fluid in short supply during early diagenesis rather than what was supposed by previous studies that dolomitization fluid could not enter the pores blocked by early cements. In the light of petrography, geochemistry and fluid-inclusion analysis, it is revealed that the facies-selective dolomitization in Changxing reef limestone implies its relation with sedimentary environment. The reason why pores are hardly preserved in the reef limestones may owe to the cementation of the radial calcite precipitated from normal sea water during early diagenetic environment and the blocky sparry calcite formed during deep-buried diagenetic environment though a great amount of pores and space of fluid activity were still present within reef limestone at the end of early marine cementation. Because the Changxing reef limestones (reef cores) are just located in high energy zone in the platform margin nearby the trough, the diagenetic fluid is actively circulating normal seawater under the control of sedimentary environment, where seepage reflux of mildly-evaporating seawater was not provided for dolomitization.

**Key words:** Late Permian; Reef limestone; Limestone reservoir; Dolomitization; Pore evolution; Sichuan Basin

Pan Liyin: Petroleum Geology Engineer. Add: PetroChina Hangzhou Research Institute of Geology, 920 Xixi Rd., Hangzhou, 310023, China