

歧口凹陷沙一下亚段湖相白云岩岩石学特征及成因分析

黄鹏, 李雪, 郭瑞

中国石油化工股份有限公司西北油田分公司勘探开发研究院, 乌鲁木齐 830011

摘要 歧口凹陷沙一下亚段白云岩发育在整体湖扩背景下,通过对研究区白云岩镜下鉴定,扫描电镜分析,发现研究区主要发育泥晶白云岩、微晶白云岩、砂质白云岩、灰质白云岩、泥质白云岩5种。结合阴极发光特征、氧同位素、稀土元素实验,揭示了研究区白云岩化作用的2种成因环境:准同生期的回流渗透白云岩化作用、成岩期的埋藏白云岩化作用。通常准同生期的回流渗透白云岩经过深部热液流体的改造,进而发生埋藏白云岩化作用,多见于裂缝发育区。研究区不同地区发育的不同成因的白云岩,对这些白云岩形成类型和形成环境的研究,以及对下一步预测白云岩储层具有重要地质意义。

关键词 歧口凹陷;湖相白云岩;岩石学特征

中图分类号 P618.13

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.2.008

Research on Petrologic Character and Genetic Mode of Lacustrine Dolomit

HUANG Peng, LI Xue, GUO Rui

Northwest Oilfield Company, China Petroleum & Chemical Corporation, Urumqi 830011, China

Abstract The dolomite of the Sha 1 lower submember in Qikou Sag developed under the background of lake expansion. Through microscopic identification and scanning electron microscopy analysis on the dolomite samples in the studied area, it is shown that there are 5 types of dolomites developed in the area, i.e., microcrystalline dolomite, micritic dolomite, argillaceous dolomite, sandy dolomite and calcite dolomite or dolomite limestone. The cathodoluminescence, oxygen isotope and rare earth element analysis reveals two environment causes of the dolomitization: the return of penecontemporaneous penetration of dolomitization and burial diagenetic dolomitization. Burial dolomitization on the back penecontemporaneous dolomite infiltration usually occurs at the fracture well-developed zone, through the transformation of the deep hydrothermal fluid. Different origins of dolomite developed in different regions in the studied area. These types of dolomite formation and the study on formation of environment greatly promote the dolomite reservoir prediction.

Keywords Qikou depression; lacustrine dolomite; petrologic character

歧口凹陷沙一下亚段在整体湖扩的背景下普遍发育了数套夹于暗色泥岩中的白云岩,其中探井埕42井在白云岩层段获得工业油气流,揭示出该区白云岩储层具有很好的勘探前景。相对海相白云岩较为成熟的研究方法,湖相白云岩具有分布范围局限性,岩石成分的多样性以及共生岩性的复杂性等特征,不同于海相大套白云岩,对其形成机理研究较为困难。有关白云岩成因研究目前大致有4种具有普遍性的成

因模式:准同生回流渗透白云石化模式、混合水白云石化模式、埋藏白云石化模式,以及最近几年流行起来的热液白云石化作用^[1-5]。本文探讨研究区不同地区、不同成因的白云岩差异性,以揭示研究区白云岩成因。

1 研究区概况

歧口凹陷位于渤海湾盆地黄骅拗陷中部,南起埕宁隆起

收稿日期: 2013-06-08;修回日期:2013-11-13

作者简介: 黄鹏,助理工程师,研究方向为塔河油田碎屑岩油气藏开发,电子信箱:huangpengshiyou@126.com

引用格式: 黄鹏,李雪,郭瑞. 歧口凹陷沙一下亚段湖相白云岩岩石学特征及成因分析[J]. 科技导报, 2014, 32(2): 50-56.

北坡,北至北大港潜山构造带,西到孔店构造带,东临歧口沿岸带,为第三纪以来长期继承发育的大型生油凹陷。研究区沙河街组一段下亚段(以下简称沙一下亚段)普遍发育夹与

暗色泥岩中的白云岩,主要发育于齐家务、六间房、周清庄、赵家堡及黄骅地区(图1)^[6]。沙一下亚段自下而上可分为滨I、板4、板3、板2等4个油层组。

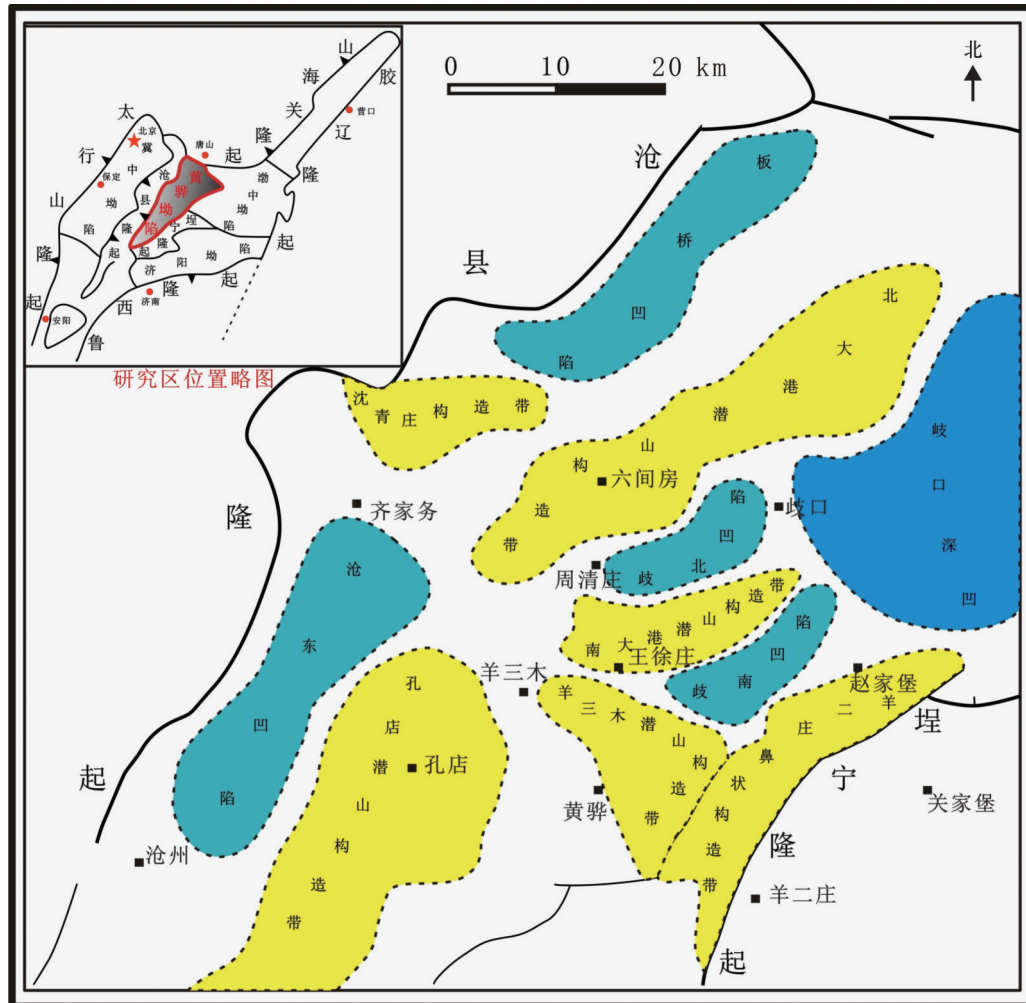


图1 研究区区域构造单元划分

Fig. 1 Tectonic partition of the studied region

2 研究区白云岩岩石学特征

2.1 主要白云岩类型

薄片鉴定和扫描电镜分析表明,研究区主要发育的白云岩类型有泥晶云岩、微晶云岩、泥质云岩、砂质云岩、灰质云岩。

1) 泥晶白云岩是指白云岩的晶体粒度范围介于隐晶质(偏光显微镜无法识别)到微晶(单个晶体颗粒可以被偏光显微镜识别)之间(图2(a))。研究区泥晶白云岩大部含10%左右的泥质,间或见有溶蚀孔。常与泥岩呈纹层状互层,泥晶白云石纹层厚0.03~0.5 mm不等,少数可达1 mm;泥质纹层厚度不定,小于0.1 mm到大于1 mm都有。

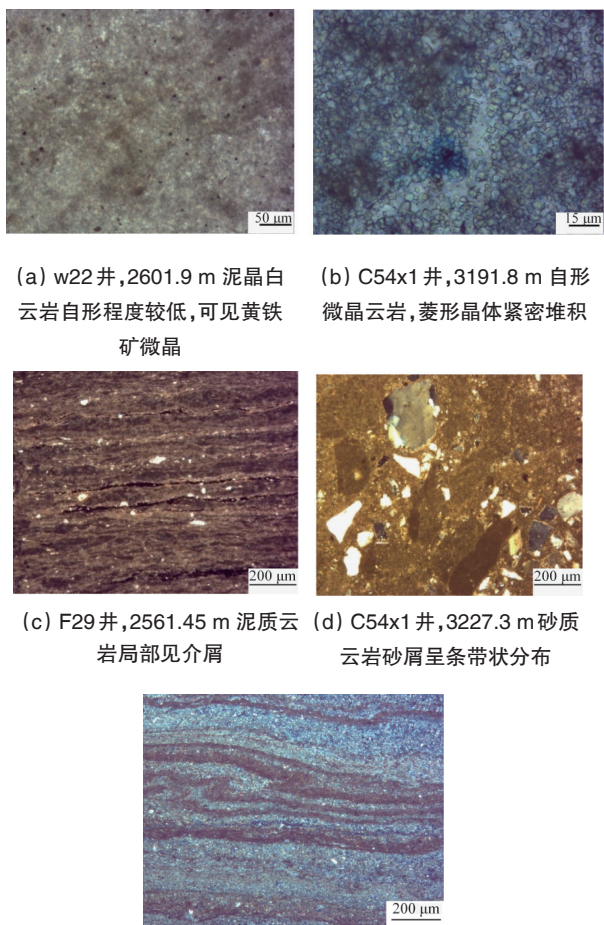
2) 微晶白云岩是研究区另一种普遍发育的白云岩,晶体多为自形,晶粒大小约2.5~5.5 μm,晶粒多呈紧密堆积状(图2(b)),晶间胶结物主要为铁白云石和方解石。岩心观察多

呈现麻粒状构造,裂缝较发育。微晶云岩的有利发育相带为云坪环境。

3) 泥质云岩主要产于板4油层组,多为白云石纹层与暗灰色薄层泥岩呈互层状产出,(图2(c))同时可见部分石英颗粒夹杂于细纹层中,且具有一定的方向性。

4) 砂质云岩其颗粒组分主要为粉砂级石英、长石颗粒,(图2(d))。石英含量较高,石英颗粒主要呈单颗粒状星散分布在白云岩中,次棱角磨圆。砂质云岩主要见于滨I和板4油组上部。

5) 灰质云岩为白云岩与灰岩的过渡岩类,白云岩和灰岩成分间界线分明(图2(e))。白云岩晶粒较灰岩明显粗大,具明显的重结晶现象,而与之共生的泥晶灰岩部分未见有明显的重结晶现象^[7]。



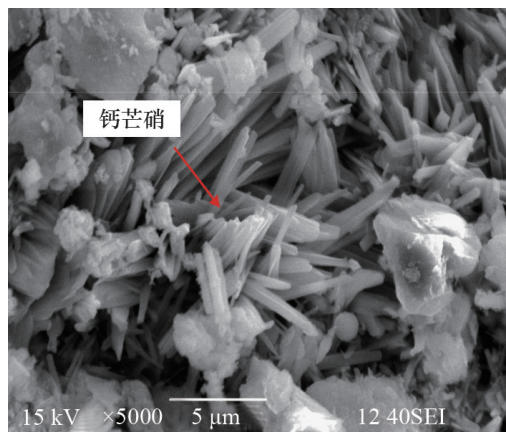
(a) w22井, 2601.9 m 泥晶白云岩自形程度较低, 可见黄铁矿微晶
(b) C54x1井, 3191.8 m 自形微晶白云岩, 菱形晶体紧密堆积
(c) F29井, 2561.45 m 泥质白云岩局部见介屑
(d) C54x1井, 3227.3 m 砂质白云岩砂屑呈条带状分布
(e) F29井 2585.9 m 云质灰岩, 灰质与云质条带状互层

图2 研究区白云岩发育类型
Fig. 2 Typical types of dolomites in the research area

2.2 岩石结构特征

在黄骅地区, Q86井、Q106井、K42井及J8井所取白云岩样品在扫描电镜下均可见准同生期形成的石膏、岩盐及钙芒硝等物质(图3)。在成岩早期沉积不久的表层沉积物(文石), 开始阶段, 粒间充满正常的海水, 由于研究区气候干热, 蒸发作用强烈, 粒间水不断的向空气中散发, 同时海水又通过毛细管作用, 源源不断地补充到这些疏松的沉积物颗粒间^[8-9]。周而复始正常的海水就变成了盐水, 从这种盐水中首先沉淀出来石膏、石盐等盐类矿物, 石膏等的沉淀使粒间水或表层水的Mg/Ca比值大大提高, 这种高镁的粒间盐水经常与文石颗粒接触, 将不可避免地使文石被交代, 发生白云石化。称为准同生交代白云岩, 因此白云岩样品中石膏、岩盐的出现认为是在准同生环境下形成的^[10-12]。

研究区还发育一种过渡类的白云岩, 主要为灰质云岩或云质灰岩, 这2个成分间界线分明, 白云岩晶粒较灰岩明显粗大, 具明显的重结晶现象, 而与之共生的泥晶灰岩部分未见有明显的重结晶现象, 白云岩与灰岩之间呈同沉积特征的挤压挠曲现象(图4)。白云岩与灰岩之间这种沉积构造, 如果简单地看成是外来富镁流体顺层交代的结果, 则难以解释为何泥晶灰岩未被白云岩化。因此, 这种沉积结构不是简单的交代也不是简单的沉积。由于沉积白云石要求精确的Ca-Mg有序度, 很难从海水或湖水中直接沉淀白云石。从观察结果可推断, 在初始沉积状态下, 文石与高镁方解石可较容易互层沉积, 从而形成纹层状互层并可见挠曲现象^[13]。当进入浅埋藏—中埋藏环境下, 文石可向稳定的方解石转变, 同时随着富镁离子的成岩流体加入, 优先交代高镁方解石中的钙离子, 从而形成微晶白云岩与泥晶灰岩互层的现象^[14]。

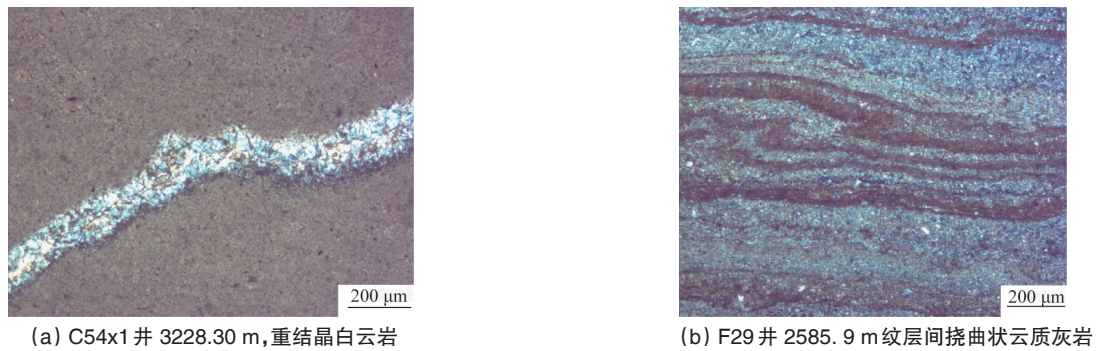


(a) Q86井, 2896.30 m 石膏



(b) J8井, 2688.40 m 针状钙芒硝

图3 准同生白云岩岩石结构特征
Fig. 3 Structure of penecontemporaneous dolomite



(a) C54x1 井 3228.30 m,重结晶白云岩

(b) F29 井 2585.9 m 纹层间挠曲状云质灰岩

图4 埋藏白云岩岩石结构特征

Fig. 4 Structure of burial diagenetic dolomite

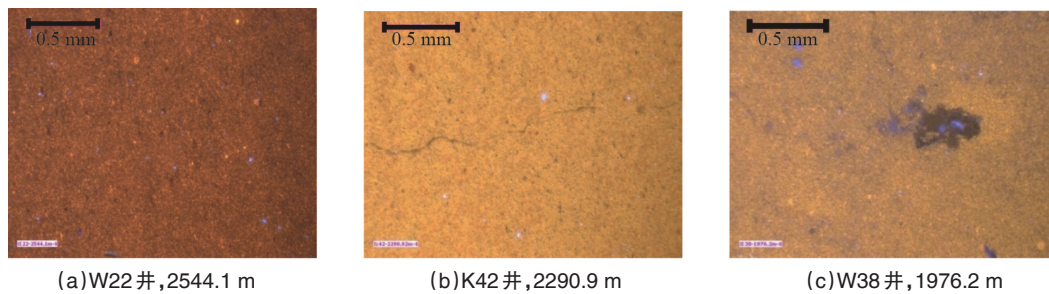
3 研究区地球化学特征

3.1 阴极发光特征

在白云岩成因的研究中,阴极发光是比较有效的研究手段之一。白云石阴极发光特征主要取决于 Fe^{2+} 、 Mn^{2+} 含量的变化, Fe^{2+} 是主要的发光淬灭剂, Mn^{2+} 是发光激活剂。白云石中极少量的锰就足以激发阴极发光, 10^{-4} mg的锰即可使样品强烈发光,但当 Fe^{2+} 的含量达到 10^{-3} mg时对光的淬灭作用会加剧;当铁的含量超过 1.5×10^{-3} mg时,不论锰的含量多少,发光完全被淬灭^[14]。只有 Fe^{2+} 才对阴极发光有影响,也只有在还原环境中才有大量 Fe^{2+} 存在,随着埋深的增大, Fe^{2+} (主要是 FeCO_3 形成)含量的增加,白云石的阴极发光颜色从桔红、暗红褐色到黑褐色甚至不发光。在地下埋藏较深处,温度较高

(大于 100°C),白云石可以形成,并常作为砂岩的胶结物出现,这种白云石常富含Fe元素,甚至可以是铁白云石,主要是由于深埋藏还原环境下,Fe以 Fe^{2+} 形式出现。因此埋藏成因白云岩阴极发光特征表现为暗褐色到黑褐色至不发光^[15,16]。

研究区白云岩样品置于阴极发光曝光率相同的条件下,其发光特征分为2类,黄骅、齐家务地区的W22井、K42井、W38井区白云岩发褐红色—亮棕黄色光(图5)。周清庄、赵家堡地区的F10井、F29井、bin22井、C54x1井白云岩发暗褐色—褐褐色光(图6)。依据白云岩阴极发光特征分析,黄骅地区及齐家务地区白云岩以准同生期白云岩为主,而周清庄、赵家堡地区白云岩主要以浅埋藏—中埋藏白云岩为主。



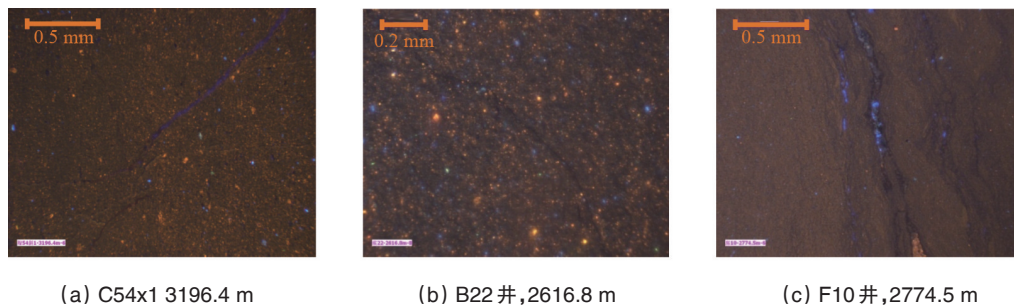
(a)W22 井,2544.1 m

(b)K42 井,2290.9 m

(c)W38 井,1976.2 m

图5 准同生白云岩阴极发光特征

Fig. 5 Cathodoluminescence of penecontemporaneous dolomite



(a) C54x1 3196.4 m

(b) B22 井,2616.8 m

(c) F10 井,2774.5 m

图6 埋藏白云岩阴极发光特征

Fig. 6 Cathodoluminescence of burial diagenetic dolomite

3.2 白云岩氧稳定同位素特征

氧同位素的组成主要受温度的影响,温度每升高 4°C , ^{18}O 值会下降0.1%。相反,温度降低会导致 ^{18}O 值增大^[17-18]。

在本研究区(表1),赵家堡地区C54x1井白云岩样品 ^{18}O 变化范围较大,其 ^{18}O 值分布在 -0.472% ~ -0.109% ,平均值为 -0.441% ;周清庄地区(包括B22井和F10井) ^{18}O 值分布

表1 研究区白云岩氧同位素特征

Table 1 Results of carbonatite oxygen isotope of Sha-1 lower submember in Qikou, Huanghuang Dpression

| 地区 | 井号 | 井深/m | 层位 | 岩性 | $\delta^{18}O_{PDB}/\%$ | 平均值/ $\%$ |
|-----------|-------|---------|----|------|-------------------------|-----------|
| 赵家堡和周清庄地区 | B22 | 2626.8 | 滨1 | 白云岩 | -0.211 | -0.373 |
| | B22 | 2612.3 | 板4 | 白云岩 | -0.344 | |
| | B22 | 2568.4 | 板3 | 白云岩 | -0.006 | |
| | C54x1 | 3229.3 | 滨1 | 白云岩 | -0.332 | |
| | C54x1 | 3181 | 板4 | 白云岩 | -0.111 | |
| | C54x1 | 3164.5 | 板3 | 白云岩 | -0.213 | |
| | C54x1 | 3221.1 | 滨1 | 泥质云岩 | -0.472 | |
| | C54x1 | 3191.1 | 板4 | 泥质云岩 | -0.109 | |
| | C54x1 | 3226.3 | 滨1 | 泥质云岩 | -0.426 | |
| | F10 | 2811.1 | 滨1 | 白云岩 | -0.660 | |
| 齐家务和黄骅地区 | K42 | 2287.15 | 滨1 | 白云岩 | -0.250 | -0.158 |
| | K42 | 2291.44 | 滨1 | 白云岩 | -0.220 | |
| | K42 | 2292.2 | 滨1 | 白云岩 | -0.115 | |
| | K42 | 2288.5 | 滨1 | 泥质云岩 | -0.070 | |
| | K42 | 2292.33 | 滨1 | 泥质云岩 | -0.430 | |
| | W22 | 2543.6 | 板4 | 泥质云岩 | -0.249 | |
| | W38 | 1975.1 | 板4 | 白云岩 | -0.008 | |

在-0.660%~-0.006%，平均值为-0.305%；这两个地区白云岩的 ^{18}O 值平均值为-0.373‰。黄骅地区(K42井区)白云岩 ^{18}O 值分布在-0.430%~-0.070%，平均值为-0.189%；齐家务地区(包括W22井和W38井)白云岩 ^{18}O 值分布区间为-0.249%~-0.08%，平均值为-0.128%。齐家务和黄骅地区白云岩的 ^{18}O 值平均值为-0.158%。根据氧同位素特征研究认为，赵家堡和周清庄地区白云岩氧同位素值相比黄骅和齐家务地区偏负值，因此周清庄地区和赵家堡地区相对而言有着更深的埋

藏和更高的成岩温度，表明周清庄地区和赵家堡地区以埋藏成因白云岩为主，而齐家务和黄骅地区则主要以准同生期白云岩分布为主。

3.3 白云岩稀土元素特征

研究区白云岩稀土元素特征分析，主要对其 $n_{La/Sm}$ 、 $n_{Gd/Yb}$ 、REE、LREE、HREE、Ce异常、Eu异常等常用的稀土元素反应环境的指标进行了统计， $n_{La/Sm}$ 反应轻稀土之间的分馏程度，该值越大，轻稀土越富集， $n_{Gd/Yb}$ 反应重稀土之间的分馏程度，该值越小，重稀土越富集。本次稀土元素(REE)测试由中国矿业大学分析测试中心完成。由于REE属于过渡类元素，但具有很强金属性，以Ce和Eu的变价、形成易溶离子后与REE相分离现象最为突出^[19]。在氧化环境中， Ce^{3+} 将不断氧化成相对易溶的 Ce^{4+} 被迁移而贫化，出现Ce负异常($\delta_{Ce}<1$)，在低温碱性环境中， Eu^{3+} 将被还原为相对易溶的 Eu^{2+} 被迁移而贫化，出现Eu负异常($\delta_{Eu}<1$)，但在高温环境中易被氧化为难溶的 Eu^{4+} 发生相对富集而出现Eu正异常($\delta_{Eu}>1$)^[20]。测试数据表明，黄骅地区和齐家务地区白云岩Ce异常、Eu异常值不明显，其Eu异常变化范围在0.8254~1.0221之间，其平均值为0.9255；Ce异常变化范围在0.9049~1.025之间，平均值为0.9642；而赵家堡地区和六间房地区白云岩则显示偏负的Ce异常和偏正的Eu异常。其Eu异常值分布区间为0.8318~2.0071，平均值为1.3227。Ce异常值分布在0.7894~0.9125，平均值为0.8198。在低温碱性环境中， Eu^{3+} 将被还原为相对易溶的 Eu^{2+} 被迁移而贫化，出现Eu负异常($\delta_{Eu}<1$)，反应为埋藏浅的准同生期成岩环境。在高温环境中 Eu^{3+} 易被氧化为难溶的 Eu^{4+} 发生相对富集而出现Eu正异常($\delta_{Eu}>1$)，反应为埋藏较深的高温成岩环境。赵家堡和六间房地区白云岩Eu正异常突出(表2)，表明该区白云岩形成环境主要为高温浅埋藏环境，有热液成岩流体的介入。

表2 研究区稀土元素特征分析

Table 2 Characters of the rare earth elements in the research area

| | 岩性 | 井号 | $n_{La/Sm}$ | $n_{Gd/Yb}$ | REE | LREE | HREE | Ce异常 | Eu异常 | |
|----------|-----------|-------|-------------|-------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 齐家务、黄骅地区 | 白云岩 | 扣42 | 3.7988 | 0.9350 | 19.918 | 17.372 | 2.434 | 0.9868 | 0.9844 | |
| | 白云岩 | 扣42 | 4.4123 | 1.5457 | 42.950 | 39.272 | 3.496 | 0.9049 | 1.0221 | |
| | 白云岩 | 扣42 | 4.6576 | 1.7218 | 52.124 | 48.066 | 3.846 | 0.9103 | 0.9783 | |
| | 白云岩 | 旺38 | 3.3613 | 1.1398 | 47.211 | 40.681 | 6.220 | 0.9954 | 0.9684 | |
| | 白云岩 | 扣42 | 4.5582 | 1.4530 | 40.014 | 36.460 | 3.380 | 0.9671 | 0.8757 | |
| | 白云岩 | 扣42 | 3.9205 | 1.2720 | 33.659 | 30.263 | 3.235 | 0.9688 | 0.8588 | |
| | 云质灰岩 | 旺38 | 3.7190 | 1.1244 | 73.683 | 64.768 | 8.503 | 1.0250 | 0.8254 | |
| | 云质灰岩 | 庄64 | 3.8820 | 1.2570 | 48.520 | 43.499 | 4.774 | 0.9553 | 0.8907 | |
| | | 平均值 | | 4.0387 | 1.3061 | 44.760 | 40.048 | 4.486 | 0.9642 | 0.9255 |
| | 周清庄、赵家堡地区 | 白云岩 | 房10 | 4.6695 | 1.2980 | 58.224 | 53.238 | 4.755 | 0.9125 | 0.8586 |
| 白云岩 | | 滨22 | 4.3186 | 1.3900 | 25.307 | 23.017 | 2.189 | 0.7907 | 2.0071 | |
| 白云岩 | | 滨22 | 4.3620 | 1.2906 | 42.518 | 38.329 | 3.993 | 0.8012 | 1.2623 | |
| 白云岩 | | 埕54x1 | 4.1502 | 1.6086 | 45.762 | 41.616 | 3.952 | 0.7894 | 1.4678 | |
| 白云岩 | | 埕54x1 | 4.2765 | 1.2473 | 37.096 | 33.478 | 3.458 | 0.8103 | 1.5085 | |
| 泥质云岩 | | 埕54x1 | 3.8584 | 1.3546 | 85.930 | 77.436 | 8.094 | 0.8143 | 0.8318 | |
| | | 平均值 | | 4.2725 | 1.3648 | 49.140 | 44.519 | 4.407 | 0.8198 | 1.3227 |

4 白云岩成因模式讨论

通过白云岩样品阴极发光特征、氧稳定同位素、稀土元素特征分析,并结合岩石结构特征,认为研究区白云岩可分为2种成因类型:准同生白云岩、埋藏白云岩。

4.1 准同生交代成因白云岩

齐家务和黄骅地区多发育局限洼地,在地质历史某一阶段湖盆受到间歇性海侵的影响,海水混入湖盆。海水进入湖盆后,比重较大的海水下沉至湖底并逐渐扩散,多集聚在一

些湖盆低洼处(图7)。这些洼地内水循环较差,蒸发作用使这种封闭一半封闭的洼地环境盐度大幅度提高。当钙离子达到饱和时,首先沉积下来的是高镁方解石、文石及石盐、石膏、钙芒硝。随着钙离子消耗,镁离子不断富集, Mg/Ca 比提高,从而形成 Mg^{2+} 浓度高的重盐水。在浓度差和密度差的作用下,富 Mg 重盐水沿湖盆底部扩散,这种回流作用流经多孔的碳酸盐层时, Mg^{2+} 会取代其中的 Ca^{2+} 使之白云岩化。

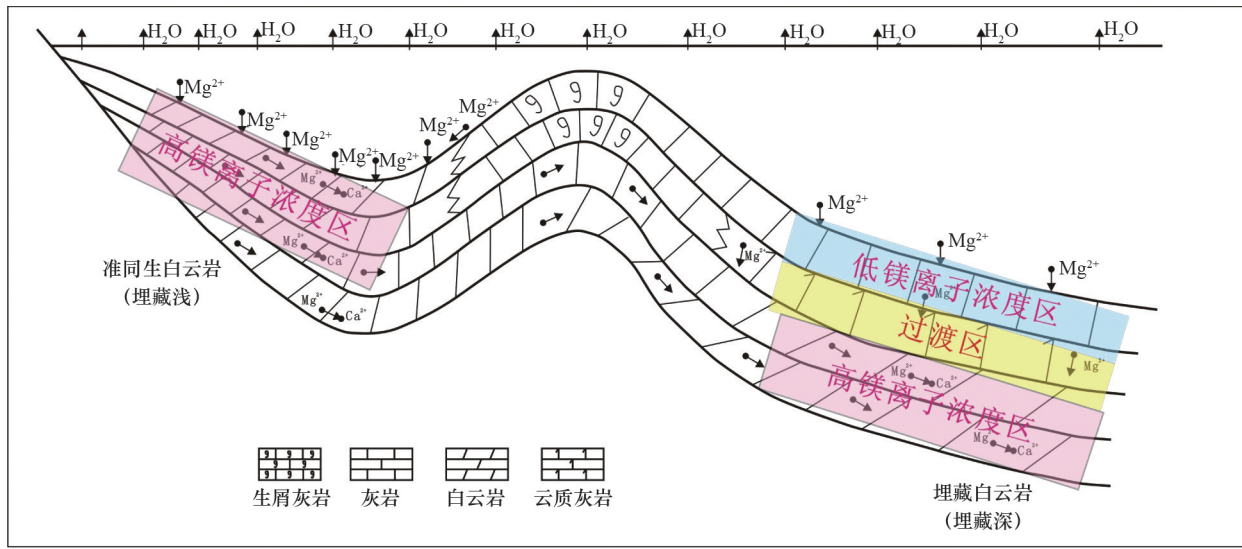


图7 歧口凹陷沙一下亚段湖相白云岩成因模式

Fig. 7 Dolomite genetic mode in research area

4.2 埋藏交代成因白云岩

很多白云岩形成于石灰岩层被埋藏的过程中,但是对这能否导致整个碳酸盐地普遍深入的白云岩化仍存在争议。有研究认为,这种模式中的驱动力是深部沉积的泥岩的压实作用和富 Mg^{2+} 的流体对台地边缘的石灰岩的侵入作用。认为 Mg^{2+} 来源于粘土矿物和湖相孔隙水,但物质平衡的计算结果表明,这些 Mg^{2+} 对大规模的白云岩化作用是远远不够的。

参考已有研究对湖相白云岩形成条件及成因机理研究的基础,本文结合研究区白云岩形成环境的分析,认为部分的 Mg^{2+} 来源于高镁方解石颗粒。埋藏环境较高的温度使得白云石沉淀作用得以顺利进行,在埋藏环境中具有持续不断的流体供给来源。热液流体可以循环流动(尤其是通过裂缝、断层和节理),从而形成白云石脉。在许多石灰岩中,沿缝合面、岩溶缝发育的分散的、菱形白云胶结物和晚期白云胶结物是埋藏白云岩存在的普遍形式。

在赵家堡一周清庄一六间房地区,白云岩形成于石灰岩层被埋藏的过程中,在上覆地层压实作用下,富镁流体主要通过裂缝、断层和节理进入灰岩岩层中,该区碳酸盐岩的分布以白云岩—灰质白云岩—灰岩的过渡分布特征表明,随着埋深加大,地温升高,白云岩化程度逐渐增加。

5 结论

通过对研究区白云岩的薄片观察,总结出研究区主要发育的白云岩类型有泥晶白云岩、微晶白云岩、泥质白云岩、灰质白云岩和砂质白云岩。结合研究区阴极发光、氧同位素及稀土元素测试分析结果,综合分析认为研究区不同地区的白云岩经历了不同的白云岩化阶段。黄骅地区和齐家务地区主要发育准同生白云岩,周清庄和赵家堡地区主要发育埋藏成因白云岩。

参考文献 (References)

- [1] 张国栋. 中国东部早第三纪海侵和沉积环境[M]. 北京: 地质出版社, 1987.
Zhang Guodong. Early Tertiary transgressive and sedimentary environment of eastern China [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1987.
- [2] 王英华, 周书欣, 张秀莲. 中国湖湘碳酸盐岩[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 1998.
Wang Yinghua, Zhou Shuxin, Zhang Xiulian. China Hunan carbonate [M]. Xuzhou: China University of Mining Press, 1998.
- [3] 陈永权, 周新源, 赵葵东, 等. 塔里木盆地中寒武统泥晶白云岩红层的地球化学特征与成因探讨[J]. 高校地质学报, 2008, 14(4): 583-592.
Chen Yongquan, Zhou Xinyuan, Zhao Kuidong, et al. Geochemical

- research on middle cambrian red dolostones in tarim basin: implications for dolostone genesis[J]. *Journal of Geological Sciences*, 2008, 14 (4): 583-592.
- [4] 金强, 黄醒汉. 东濮凹陷早第三纪盐湖成因的探讨——一种深水成因模式[J]. *华东石油学院学报*, 1985, 9(1): 1-13.
Jin Qiang, Huang Xinghan. Studies on the origin of the early tertiary salt lake Dongpu depression: A postulated deep water model[J]. *Journal of the East Petroleum Institute*, 1985, 9(1): 1-13.
- [5] 袁静, 赵澄林, 张善文. 东营凹陷沙四段盐湖的深水成因[J]. *沉积学报*, 2000, 18(1): 114-118.
Yuan Jing, Zhao Chenlin, Zhang Shanwen. Genetic Model of the deep water salt lake of the paleogene sha-4 member in Dongying sag[J]. *Sedimentologica Sinica*, 2000, 18 (1): 114-118.
- [6] 大港油田石油地质编辑委员会. 大港油田石油地质志[M]. 北京:石油工业出版社, 1991, 1-436.
Editorial Committee of Petroleum Geology of Dagang Oil Field. *Dagang oilfield petroleum geology*[M]. Beijing: Prtroleum Industry Press, 1991, 1-436.
- [7] 杨博, 蔡忠贤, 赵文光. 川东北飞仙关组白云岩岩石结构演化[J]. *现代地质*, 2010, 24(5): 945-950.
Yang Bo, Cai Zhongxian, Zhao Wenguang. Evolution of dolomite crystal textures in Feixianguan formation of the northeast of Sichuan Basin, China[J]. *Geoscience*, 2010, 24(5): 945-950.
- [8] 高梅生, 郑荣才, 文华国, 等. 川东北下三叠统飞仙关组白云岩成因——来自岩石结构的证据[J]. *成都理工大学学报*, 2007, 34(3): 297-304.
Gao Meisheng, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, et al. Lithological characteristics of dolomite in the Lower Triassic Feixianguan Formation of the NE Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2007, 34(3): 297-304.
- [9] 田景春, 尹观, 覃建雄, 等. 中国东部早第三纪海侵与湖相白云岩成因之关系——以东营凹陷沙河街组为例[J]. *中国海上油气地质*, 1998, 12(4): 250-254.
Tian Jingchun, Yin Guan, Tan Jianxiong, et al. The relationship between the transgression of eogene and the origin of lacustrine dolomite in eastern china—taking the shahejie formation of dongying sag as example[J]. *China Offshore Oil and Gas: Geology*, 1998, 12(4): 250-254.
- [10] 孙钰, 钟建华, 袁向春. 惠民凹陷沙河街组一段白云岩特征及其成因分析[J]. *沉积与特提斯地质*, 2007, 27(3): 78-84.
Sun Yu, Zhong Jianhuan, Yuan Xiangchun. Genesis of the dolostones from the first member of the Shahejie Formation in the Huimin depression, Shandong[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 2007, 27(3): 78-84.
- [11] 黄杏珍, 闫存凤, 等. 泌阳凹陷下第三系湖相白云岩形成条件[J]. *沉积学报*, 2001, 19(2): 207-215.
Huang Xingzhen, Yan Cunfeng, et al. Sedimentary Condition of Lacustrine Dolomite in the Lower Tertiary Biyang Depression[J]. *Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(2): 207-215.
- [12] 戴朝成, 郑荣才, 文华国, 等. 辽东湾盆地沙河街组湖相白云岩成因研究[J]. *成都理工大学学报:自然科学版*, 2008, 35(2): 187-193.
Dai Chaozheng, Zheng Rongcai, Wen Huaguo, et al. Origin of lacustrine dolomite in the Paleogene Shahejie Formation of Liaodongwan basin, China[J]. *Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition*, 2008, 35(2): 187-193.
- [13] 张永生. 鄂尔多斯地区奥陶系马家沟群中部块状白云岩的深埋藏白云石化机制[J]. *沉积学报*, 2000, 18(3): 424-434.
Zhang Yongsheng. Mechanism of deep burial dolomitization of massive dolostones in the Middle Maj iagou Group of the Ordovician, Ordos Basin[J]. *Sedimentologica Sinica*, 2000, 18(3): 424-434.
- [14] 张学丰, 胡文瑄, 张军涛, 等. 塔里木盆地奥陶系白云岩化流体来源的地球化学分析[J]. *地学前缘*, 2008, 15(2): 80-89.
Zhang Xuefeng, Hu Wenxuan, Zhang Haitao, et al. Geochemical analyses on dolomitizing fluids of Lower Ordovician carbonate reservoir in Tarim Basin[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, 15(2): 80-89.
- [15] 黄思静, 卿海若, 胡作维, 等. 川东三叠系飞仙关组碳酸盐岩的阴极发光特征与成岩作用[J]. *地球科学*, 2008, 33(1): 26-34.
Huang Sijing, Qing Hairuo, Hu Zhuowei, et al. Cathodoluminescence and diagenesis of the carbonate rocks in Feixianguan formation of triassic, eastern Sichuan basin of China[J]. *Earth Science*, 2008, 33(1): 26-34.
- [16] 郑荣才, 赵灿, 刘合年, 等. 阿姆河盆地卡洛夫—牛津阶碳酸盐岩阴极发光及其研究意义[J]. *成都理工大学学报*, 2010, 37(4): 377-385.
Zheng Rongcai, Zhao Can, Liu Henian, et al. Cathodoluminescence and its significance of the Callovian - Oxfordian carbonate rocks in Amu Darya basin, Turkmenistan[J]. *Journal of Chengdu University of Technology*, 2010, 37(4): 377-385.
- [17] 陈荣坤. 稳定氧碳同位素在碳酸盐岩成岩环境研究中的应用[J]. *沉积学报*, 1994, 12(4): 11-21.
Chen Rongkun. Application of stable oxygen and carbon isotope in the research of carbonate diagenetic environment[J]. *Sedimentologica Sinica*, 1994, 12(4): 11-21.
- [18] 刘德良, 孙先如, 等. 鄂尔多斯盆地奥陶系白云岩碳氧同位素分析[J]. *石油实验地质*, 2006, 28(2): 156-161.
Liu Deiliang, Sun Xianru, et al. Analysis of carbon and oxygen isotope on the ordovician dolostones in the ordos basin[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2006, 28(2): 156-161.
- [19] 吴仕强, 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 Shiqiang, 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.
- [20] 胡忠贵, 郑荣才, 周刚, 等. 川东邻水—渝北地区石炭系古岩溶储层稀土元素地球化学特征[J]. *岩石矿物学杂志*, 2009, 28(1): 37-44.
Hu Zhonggui, Zheng Rongcai, Zhou Gang, et al. REE geochemical characteristics of paleokarst reservoirs in Huanglong Formation of Linshui (eastern Sichuan) - northern Chongqing area[J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 2009, 28(1): 37-44.

(编辑 田恬)