

# 冀中坳陷下古生界热液白云岩的识别和形成机制

闫伟<sup>1</sup>, 金振奎<sup>1\*</sup>, 姚梦竹<sup>1</sup>, 赵文龙<sup>2</sup>

1 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

2 中国石油华北油田分公司勘探开发研究院, 任丘 062552

\* 通信作者, [cjzk@cup.edu.cn](mailto:cjzk@cup.edu.cn)

收稿日期: 2018-03-06

国家科技重大专项(2016ZX05006-005)资助

**摘要** 冀中坳陷下古生界发育多种类型的白云岩, 其中热液白云岩大量发育。本文通过对白云岩的岩性、空间分布和地球化学特征的分析, 识别出了热液白云岩。热液白云岩多呈中—粗晶结构, 晶粒大小在 0.2~2 mm 之间, 晶体呈半自形或它形, 晶体间呈镶嵌结构。内部可见缝合线和残余构造。阴极发光微弱, 呈暗褐色。白云石的有序度在 0.73~0.95 之间, 平均为 0.75; CaCO<sub>3</sub> 摩尔含量在 49.667%~52.667% 之间, 平均为 50.3337%。δ<sup>13</sup>C 分布范围为 -4.669‰~0.366‰ (PDB), 平均值为 -1.734‰ (PDB)。δ<sup>18</sup>O 分布范围为 -9.289‰~-6.538‰ (PDB), 平均值为 -7.798‰ (PDB)。CaO-MgO 含量呈线性负相关, 且具有低的 Sr 含量和高的 MgO 含量。白云石中多赋存气—液两相流体包裹体, 均一化温度在 90 °C~330 °C 之间。热液白云岩在空间上呈块状分布, 且多靠近伸展断层、走滑断层和古近纪的岩浆岩。这些特征表明, 热液白云岩化作用发生在古近纪; 白云岩化流体为喜马拉雅运动早期的构造热液; 热液在构造运动的驱动下, 沿着构造断裂进入具有渗透性的石灰岩或白云岩地层中, 发生白云岩化作用。热液白云岩可以形成储集层, 好的储集层位于基底深大断裂附近, 并且靠近古近纪岩浆岩。

**关键词** 冀中坳陷; 下古生界; 中—粗晶白云岩; 热液白云岩; 白云岩化作用; 白云岩成因

## 0 引言

冀中坳陷下古生界发育多种类型的白云岩。常见的有泥—粉晶白云岩、粉—细晶白云岩和中—粗晶白云岩<sup>[1-2]</sup>。这 3 种类型的白云岩, 根据其成因, 可分别归类为准同生白云岩、回流渗透白云岩和埋藏白云岩<sup>[3-9]</sup>。前两种类型的白云岩, 在华北地台的下古生界中已有不少研究。而对于埋藏白云岩, 研究还较少, 尤其对于埋藏热液白云岩的研究还缺乏。

埋藏白云岩自 1980 年代开始受到关注以来, 已有不少埋藏白云岩化模式被广泛应用。自 2000 年以来, 世界各地又发现了大量的热液白云岩的研究实例<sup>[10-11]</sup>。

这些研究表明热液白云岩与构造断层密切相关, 且主要分布在伸展断层<sup>[12-13]</sup>、走滑断层<sup>[14]</sup>和逆掩断层<sup>[15-16]</sup>等构造断裂区域。这些构造活动不仅为热液流体的流动提供驱动力, 而且使得岩体内部产生开放的缝洞系统, 为热液流体的流动提供通道。北美地区的热液白云岩, 在平面上的分布范围从数千米到数十千米不等, 厚度上从数米到数十米不等<sup>[10]</sup>。由于埋藏热液白云岩化过程中温度较高, 且结晶过程更为缓慢, 因此形成的白云石有序度更高, 晶体也多在中晶和粗晶之间<sup>[17-18]</sup>。在埋藏白云岩化过程中 Fe<sup>2+</sup> 和 Mn<sup>2+</sup> 的富集, 使得阴极发光微弱<sup>[13-19]</sup>。热液白云岩具有更负的 δ<sup>18</sup>O 值, 含有两相的、含水的流体包裹体<sup>[20-22]</sup>。

引用格式: 闫伟, 金振奎, 姚梦竹, 赵文龙. 冀中坳陷下古生界热液白云岩的识别和形成机制. 石油科学通报, 2018, 04: 376-389

YAN Wei, JIN Zhenkui, YAO Mengzhu, ZHAO Wenlong. Identification and formation mechanisms of hydrothermal dolomite in the Lower Paleozoic, Jizhong Depression. Petroleum Science Bulletin, 2018, 04: 376-389. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.04.034

热液白云岩无论在岩性特征方面,还是在成因机理方面,均不同于泥—粉晶白云岩和粉—细晶白云岩,这使得其储集性能也与它们有差别。鉴于冀中拗陷,甚至整个华北地台,还缺乏热液白云岩的研究,在实际工作中难以准确分辨白云岩的类型和储集性能,从而难以对储层进行有针对性的开发。本文针对冀中拗陷下古生界热液白云岩进行研究,通过分析其分布形态、岩石学特征、地球化学特征等,识别出构造—热液白云岩,并研究其形成机制,从而为白云岩储层的研究提供一定的依据。

## 1 地质背景

冀中拗陷位于渤海湾盆地东部(图 1A),华北平原北部,面积约  $3.2 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。它是在华北地台基底上发育起来的一个中—新生代沉积拗陷<sup>[23]</sup>。下古生界地层厚度约 1000 m,埋深在 2000~5000 m 之间。冀中拗陷具有明显的伸展、走滑构造特征。其从太古界至下元古界,发育了一套中深变质岩系。从中元古界至下古生界,发育了一套碳酸盐岩夹碎屑岩的沉积建造。由于早元古代至晚古生代是华北地台的稳定发展时期,这个时期冀中拗陷构造运动相对缓和,沉积稳定,岩浆活动微弱。此时华北地台处于陆表海的沉积环

境,沉积基底起伏小,水体浅,形成了下古生界的沉积岩。沉积相类型主要为碳酸盐岩台地,包括潮坪亚相、局限台地亚相、开阔台地亚相和浅滩亚相等。岩石类型主要为灰泥石灰岩、颗粒石灰岩、泥—粉晶白云岩和泥页岩等。中生代发生了燕山运动,构造活动强烈,使得华北古地台解体<sup>[24]</sup>。这个时期冀中拗陷以断陷沉积为主,沉积不稳定,主要为陆相碎屑岩建造。古近纪为裂谷盆地的发育时期,岩浆活动强烈,并沉积了一套河湖相的碎屑岩。由于加里东运动以来的多期构造抬升运动,使得研究区下古生界在部分区域缺失(图 1B)。奥陶系共划分为 8 个组,即冶里组、亮甲山组,以及马家沟一组、马家沟二组、马家沟三组、马家沟四组、马家沟五组、马家沟六组(简称马一组、马二组、马三组、马四组、马五组、马六组)。上部缺少志留系和泥盆系,与上覆石炭系呈不整合接触。寒武系共划分为 8 个组,包括府君山组、馒头组、毛庄组、徐庄组、张夏组、崮山组、长山组和凤山组。其与上覆奥陶系呈整合接触,与下伏元古界呈不整合接触。

## 2 样品采集与实验分析

本次研究的样品来源于华北油田勘探开发研究院

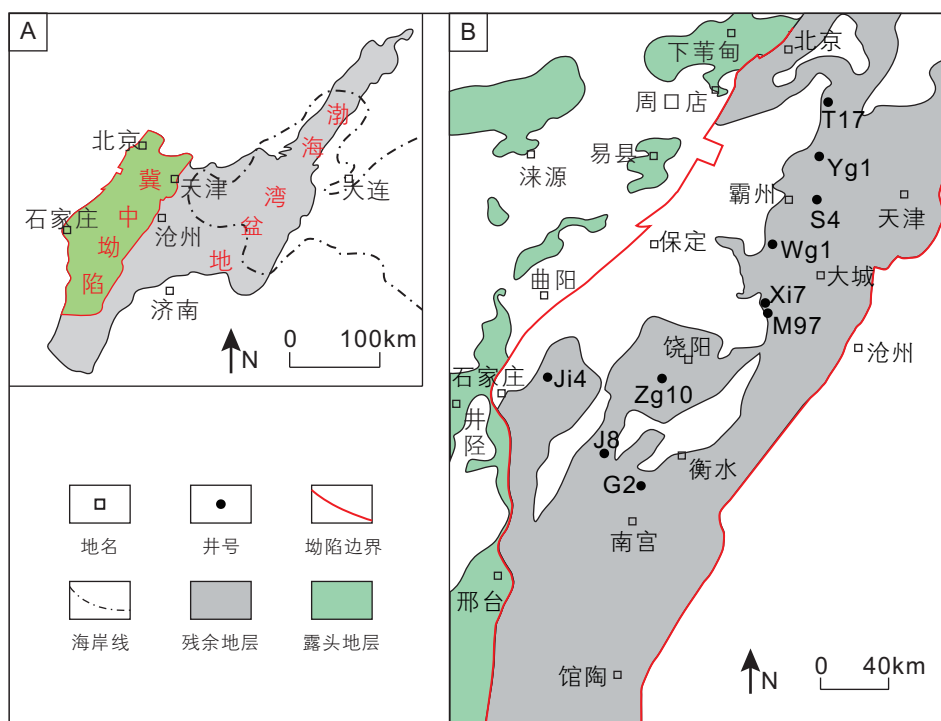


图 1 冀中拗陷区域位置(A)以及下古生界地层分布(B)

Fig. 1 The location of the Jizhong Depression (A) and the distribution of the Lower Paleozoic strata (B)

的岩心库及冀中拗陷周缘露头。对所有样品制作了岩石薄片。在对白云岩手标本和镜下观察的基础上,选取了38个样品进行阴极发光分析,54个样品进行了X射线衍射分析,68个样品进行了全岩碳氧同位素分析,36个样品进行了流体包裹体分析。其中流体包裹体选自于中一粗晶白云岩晶体中的气液两相盐水包裹体。

阴极发光、X射线衍射、流体包裹体分析在中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室完成。阴极发光使用仪器为CL8200MK5-2阴极发光仪,测试束电压为17 kV,束电流为500  $\mu$ A。X射线衍射使用仪器为Bruker D2 Phaser,工作电压为30 kV,工作电流为10 mA,用CuK $\alpha$ 辐射波长测量,2 $\theta$ 角度扫描范围选取为4.5~50°。流体包裹体使用仪器为Linkam-350型冷热台,测温范围-196℃~350℃,温度精度0.1℃,最大加热/冷却速率为30℃/min。加热冷冻过程中设置的控温速率一般为40℃/min,相变点附近速率为4℃/min。

全岩碳氧同位素分析在中国科学院南京地质古生物研究所国家重点实验室完成。仪器为MAT-253同位素质谱仪,分析制样系统为真空前处理系列;实验室控制室温为22℃ $\pm$ 10℃;湿度为50%RH $\pm$ 5%。分析结果采用PDB标准, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度分别为0.03和0.08。

CaO含量(%),MgO含量(%),及Sr含量(ppm)数据收集自华北油田勘探开发研究院,所有样品来自于岩心。

### 3 热液白云岩识别特征

#### 3.1 岩性特征

热液白云岩主要为中一粗晶白云岩。这类白云岩的白云石晶粒大小在0.2~2.0 mm之间,颜色呈黄灰色、浅灰色,空间上多呈厚层或块状层分布。白云石晶形呈半自形或它形,晶粒多呈漂浮菱面体或松散状的镶嵌结构,重结晶作用明显(图2A)。由于热液的作用,在中一粗晶白云岩或相邻的岩层中往往形成一些特殊的矿物,如萤石、闪锌矿、重晶石、自生石英、鞍形白云石等。这些矿物分布在溶蚀孔洞或溶蚀裂缝中,多呈组合状出现,是岩石遭受热液改造的直接证据。通过镜下的观察,发现至少有以下4种矿物组合:萤石—白云石组合(图2A)、闪锌矿—白云石组合(图2B)、自生石英—闪锌矿组合(图2C)、鞍形白云石—重晶石组合(图2D)。此外还可以见到一些残余的斑状

特征(图2E)。斑状形态不规则,边界不明显且被白云石晶体切割,其内白云石晶体大小悬殊,主要呈他形。中一粗晶白云岩在电性特征方面,具有低的、较平直的自然伽马值和低电阻率值。

#### 3.2 地球化学特征

不同岩石的阴极发光具有不同的发光强度和发光颜色,它可以反映成岩流体中的一些微量元素(Mn $^{2+}$ 和Fe $^{2+}$ )含量的变化,并进而反映矿物在成岩过程中经历的热事件<sup>[25]</sup>。本次研究在阴极发光显微镜下分别观察了泥—粉晶白云岩、粉—细晶白云岩和中一粗晶白云岩的发光特性。结果表明,泥—粉晶白云岩主要发红褐色光;粉—细晶白云岩主要发橘红色、橘黄色光,并可见环带特征;中一粗晶白云岩发暗褐色光(图2E,图2F),发光强度较弱。

X射线衍射分析可以用来确定白云石有序度和CaCO $_3$ 摩尔含量。白云石有序度反映了与理想白云石(有序度为1)的接近程度<sup>[26]</sup>。通过对露头 and 取心样品的分析,冀中拗陷泥—粉晶白云岩的有序度在0.48~0.65之间,平均为0.56。粉—细晶白云岩的有序度在0.62~0.86之间,平均为0.75。中一粗晶白云岩的有序度在0.73~0.95之间,平均为0.86(图3A)。白云石的CaCO $_3$ 摩尔含量也反映了与理想白云石的接近程度。在理想白云石中,Ca $^{2+}$ 离子和Mg $^{2+}$ 离子的摩尔浓度各占50%。即白云石的CaCO $_3$ 摩尔含量越接近50%,它就越接近理想白云石。通过Goldsmith和Graff提出的公式<sup>[27]</sup>计算,泥—粉晶白云岩的CaCO $_3$ 摩尔含量为50.0004%~52.3337%,平均为51.0984%;粉—细晶白云岩的CaCO $_3$ 摩尔含量为50.0004%~52.0004%,平均为50.5560%;中一粗晶白云岩的CaCO $_3$ 摩尔含量为49.6670%~52.6670%,平均为50.3337%。分析结果表明,中一粗晶白云岩具有更高的白云石有序度,和更接近50%的CaCO $_3$ 摩尔含量。

白云岩的碳氧同位素受白云化过程中的温度和盐度的影响。其中碳同位素的变化受不同碳来源的流体和混合流体的影响;氧同位素的变化受海水盐度和埋藏成岩温度的影响。埋藏条件下,受地下淡水和高温的影响,碳氧同位素一般向偏负的方向发展<sup>[28]</sup>。全岩样品的碳氧同位素分析表明,中一粗晶白云岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 较高(图3B),分布范围为-4.669‰~0.366‰(PDB),平均值为-1.734‰(PDB)。 $\delta^{18}\text{O}$ 数值低,分布范围为-9.289‰~-6.538‰(PDB),平均值为-7.798‰(PDB)。与泥—粉晶白云岩和粉—细晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值相比,中一粗晶白云岩的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显偏负,

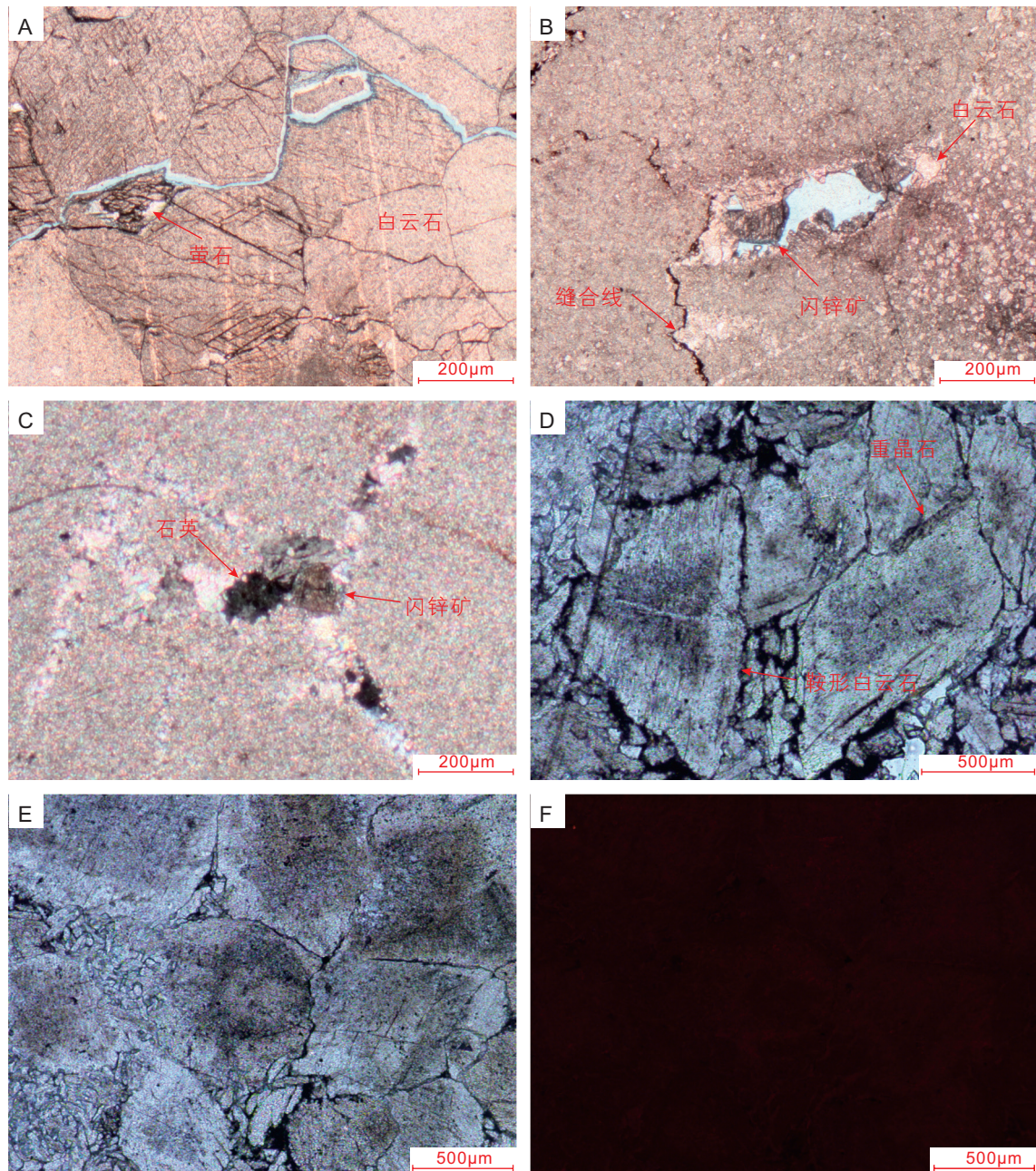


图2 冀中拗陷下古生界热液白云岩的岩石学、矿物学及阴极发光特征

(A) 呈镶嵌结构的中—粗晶白云岩，含有萤石矿物；永清地区Y16井，3235 m，马四组；(B) 泥晶灰岩中具有缝合线和溶蚀孔，在溶蚀孔中发育有闪锌矿和白云石；苏桥地区S4-6井，4826.5 m，马四组；(C) 泥晶白云岩的溶蚀裂缝中充填有石英和闪锌矿；苏桥地区S4-6井，4681.5 m，马六组；(D) 中—粗晶白云岩中发育有鞍形白云石和重晶石；无极地区Ji4井，2901 m，亮甲山组；(E) 粗晶白云岩中具有残余斑状特征；Ji4井，2901 m，亮甲山组；(F) 粗晶白云岩的阴极发光特征（视域同E）

**Fig. 2 Petrology, mineralogy and cathodoluminescence of hydrothermal dolomite in the Lower Paleozoic, Jizhong Depression**  
 (A) With the mosaic structure of medium-coarse-sized crystalline dolomite containing fluorite; Y16 well in Yongqing area, 3235 m, Majiagou IV formation; (B) Stylolites and vugs developed in the micrite limestone, and sphalerite and dolomite developed in the vugs; S4-6 well in Suqiao area, 4826.5 m, Majiagou IV formation; (C) Quartz and sphalerite distributed in the channels of mud-sized crystalline dolomite; S4-6 well in Suqiao area, 4681.5 m, Majiagou VI Formation; (D) Saddle dolomite and barite developed in medium-coarse-sized crystalline dolomite; Ji4 well in the Wuji area, 2901 m, Liangjiashan Formation; (E) Residual porphyritic structures developed in coarse-sized crystalline dolomite; Ji4 well, 2901 m, Liangjiashan Formation; (F) Cathodoluminescence of coarse -sized crystalline dolomite (Same view as E)

表明受温度的影响较大。

CaO含量(%)和MgO含量(%)关系图可以反映白云岩的成因<sup>[29]</sup>。如白云岩各个样品的CaO含量和MgO含量呈线性正相关,则反映白云石是沉积成因的;如呈线性负相关,则反映白云石是交代成因的。从图中(图3C)可以看出泥—粉晶白云岩的CaO和MgO含量呈线性正相关,且CaO含量较低,显示其是沉积成因的;粉—细晶白云岩的CaO和MgO含量呈线性负相关,且CaO含量较高,显示其是交代成因的;中—粗晶白云岩的CaO和MgO含量呈线性负相关,且CaO含量中等,表明其是交代成因的,发生了重结晶。

Sr元素主要富集在海水中,当其蓄积在沉积物中后,随着成岩作用的强度增加,Sr元素会不断的流失,使得Sr含量(ppm)降低<sup>[30]</sup>。Sr与MgO含量关系图可以反映成岩作用的强度。冀中拗陷下古生界的碳酸盐岩整体经历了较强的成岩改造,在部分石灰岩和白云岩中均具有低的Sr含量。相对其他碳酸盐岩,中—粗晶白云岩具有最低的Sr含量和最高的MgO含量,显示经

历了较强的热液蚀变。

流体包裹体可以反映流体被捕获时的环境信息,即主晶矿物在形成和演化过程中的物理化学条件和流体环境信息。如伴生蒸气泡的气液二相流体包裹体是在高温(>50℃)高压的环境下形成的,单相流体包裹体是在低温(<50℃)的环境下形成的<sup>[31]</sup>。对白云岩晶体中的流体包裹体显微测温,可以获得关于白云岩形成过程中的温度和流体性质的信息。冀中拗陷下古生界中—粗晶白云岩的流体包裹体中,多赋存气—液两相流体包裹体。包裹体在白云石晶体和白云石生长边中均有分布。包裹体大多在5~10 μm之间,边界清晰,形态不一。包裹体清澈透明,里面的气泡不见明显的布朗运动。均一化温度在90℃~330℃之间(图4)。

本次研究还收集到了碳酸盐岩中方解石脉的盐水流体包裹体数据,数据来源于华北油田勘探开发研究院。对包裹体均一化温度的统计,显示包裹体均一化温度主要在60℃~120℃之间,部分温度达到了240℃,显示部分样品中包裹体的形成环境具有异常高温。

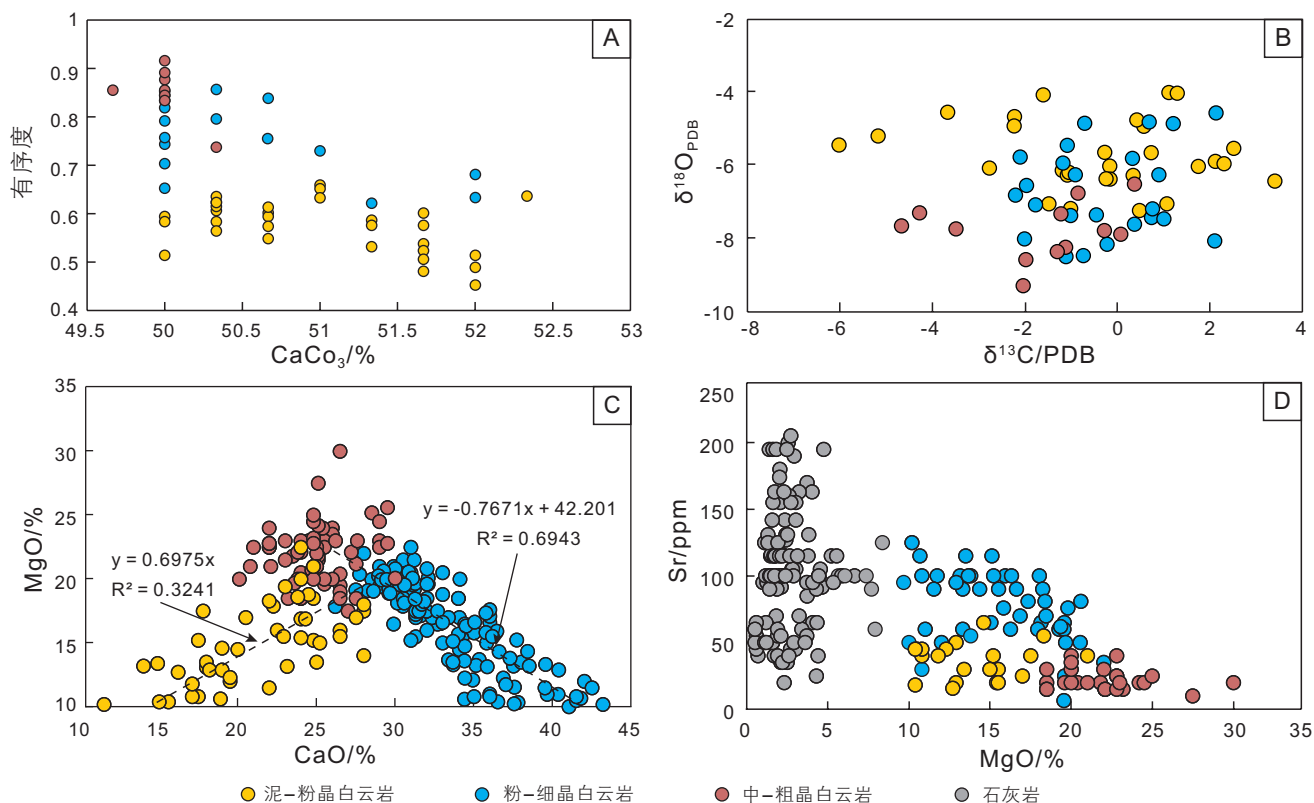


图3 冀中拗陷下古生界白云岩地球化学特征

(A) 白云石有序度及CaCO<sub>3</sub>摩尔含量(N<sub>CaCO<sub>3</sub></sub>/% )平均值分布图; (B) 白云岩碳氧同位素投点图; (C) MgO—CaO交会图; (D) Sr (ppm)和MgO含量(%)交会图

Fig. 3 Geochemical characteristics of the Lower Palaeozoic dolomite in the Jizhong Depression

(A) Cross-plot of the ordering of dolomite and the molar percentage of CaCO<sub>3</sub>; (B) Cross-plot of Carbon and oxygen isotope values; (C) Cross-plot of MgO(%) and CaO(%); (D) Cross-plot of Sr (ppm) and MgO(%)

### 3.3 白云岩分布

热液白云岩的空间分布形态与其他类型的白云岩明显不同。泥—粉晶白云岩和粉—细晶白云岩多呈层状分布，且多与潮上坪的地层伴生。而热液白云岩不同，其多呈块状，在下古生界的各个地层中均有分布。与前两种类型的白云岩相比，其垂向厚度大，可连续分布超过 500 m。平面分布范围相对较小，多小于 5 km，井间难以追踪。如廊固凹陷的 T17 井，其张夏组以下近 200 m 的地层中，石灰岩均被白云化(图 5)，且奥陶系马四组和马五组有厚达 300 m 的白云岩(图 6)。类似还有无极地区的 Ji4 井(图 5，图 6)。Ji4 井自奥陶系马二组中部以下 570 m 均为白云岩地层(寒武系未钻穿，白云岩未见底)。对取心样品分析表明，其岩性主要为中—粗晶白云岩。

热液白云岩在发育位置方面也与其他类型白云岩存在差别。发育有热液白云岩的井均分布在深大断裂附近(图 7)，这些深大断裂均为燕山期和喜马拉雅期以来形成的伸展、走滑断裂<sup>[32]</sup>。此外，白云岩的上下地层往往可见有岩浆岩，尤其是在白云岩层上部的古近纪的地层中。

### 3.4 热力学背景

印支运动以后，华北地台解体，进入裂谷盆地的发展阶段。在燕山运动、喜马拉雅运动的影响下，冀中拗陷的构造活动以拉张运动为主，形成伸展断层和走滑断层<sup>[32]</sup>，并在断层附近形成断层—节理裂缝系统。有研究表明，华北地台新生代玄武岩的 K-Ar 法同位素年龄范围为 28.5~71.1 Ma<sup>[33]</sup>，时代为古近纪，表明古近纪岩浆活动剧烈。尤其始新世地层中的岩浆岩

发育最多，表明这个时期是岩浆活动最强烈的时期。

冀中拗陷的岩浆岩在拗陷各个区域均有分布(图 7)，但单个活动范围局限<sup>[34]</sup>。整体来说，岩浆活动规模较小，强度不一，岩浆岩单层厚度一般小于 10 m。岩石类型以玄武岩为主，其次为安山岩。由于岩浆活动产生的强烈热对流以及岩浆对地层的烘烤作用，使得附近地层和流体被加热。在构造活动和温度差的影响下，深部流体沿着断层—裂缝系统向上运移，对周围岩层产生热液蚀变作用。

强烈的热液作用还表现在古近纪的地温场上，尤其是不同区域的大地热流值方面。基于华北油田勘探开发研究院收集的系统稳态测温数据、试油温度以及岩心测定的岩石热导率，根据前人总结的方法<sup>[35-37]</sup>，对冀中拗陷古近纪的大地热流值进行了计算，并绘制了大地热流值等值线图(图 7)。由于古近纪以后，区域构造格局基本稳定，大地热流值缓慢降低，因此古近纪的地温场格局与现代相似<sup>[38]</sup>。从图中可以看出，古近纪大地热流值较高的区域，不仅是深大断裂交汇部位和构造活动强烈区域，还是岩浆岩和热液白云岩分布的区域。

## 4 成因分析

### 4.1 原岩类型

热液白云岩的晶体粗大，白云石的有序度高，表明其形成于高温的环境。高的  $\delta^{18}\text{O}$  值，也表明其形成于高温环境。在空间分布形态上，与泥—粉晶白云岩和粉—细晶白云岩相比，其岩体切穿层位；垂向分布范围大；平面分布范围小，井间难以追踪(5 km 的井

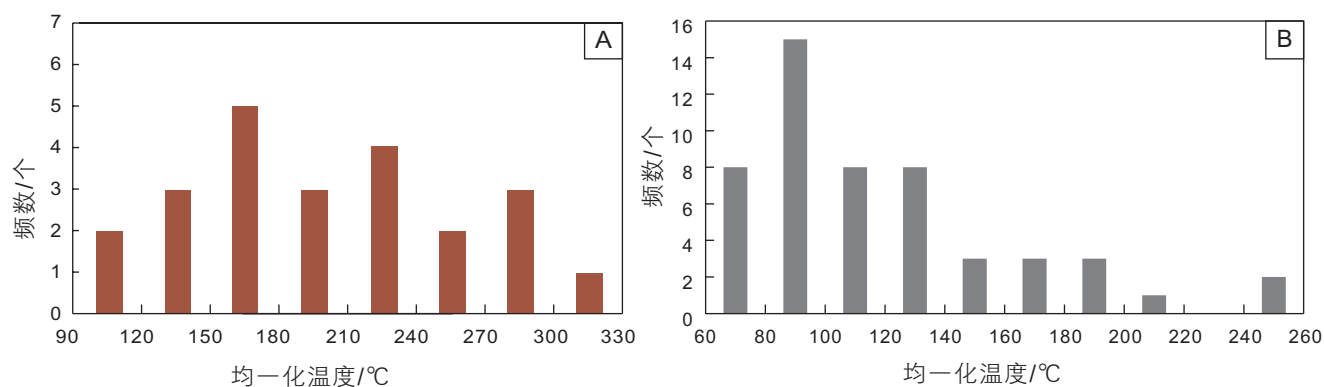


图 4 冀中拗陷下古生界中—粗晶白云岩流体包裹体(A)和方解石脉流体包裹体(B)均一化温度—频数分布图

Fig. 4 Homogenization temperature histogram of fluid inclusions from medium-coarse-sized crystalline dolomites (A) and calcite vein (B) of the Lower Paleozoic, Jizhong Depression

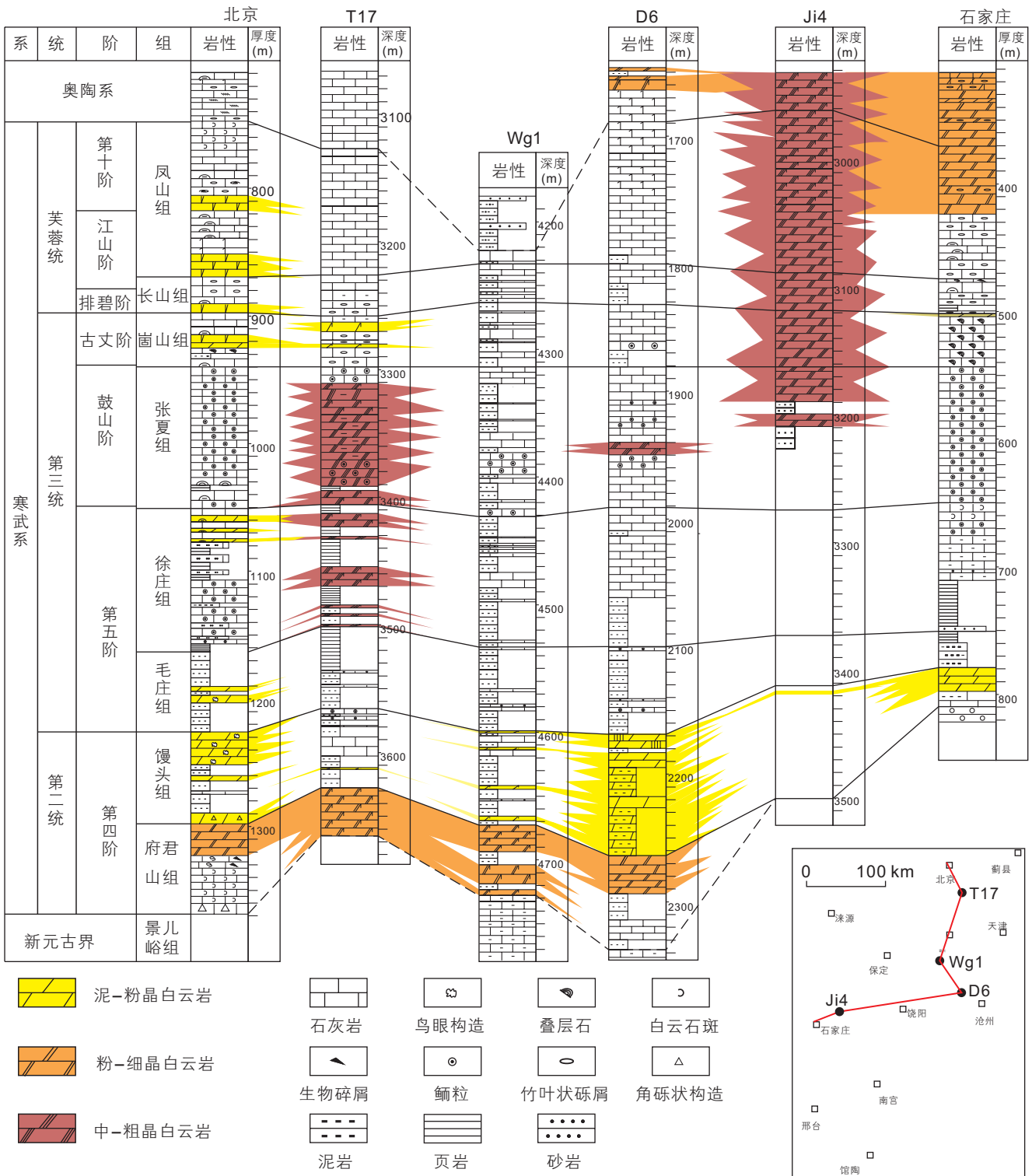


图 5 冀中拗陷寒武系白云岩垂向分布

Fig. 5 The distribution of dolomites in the Cambrian in the Jizhong Depression

间距离); 靠近断裂带; 不伴生潮上环境的成因标志。这些特征表明, 它的分布不受地层限制, 其成因不受沉积环境的控制。原岩可能是泥-粉晶白云岩或粉-细晶白云岩, 或者是未发生白云化的石灰岩。

#### 4.2 白云化时间

白云岩中可见残余斑状结构(图 2E), 根据这些斑块的形态判断, 这些斑状结构为云斑发生二次白云化

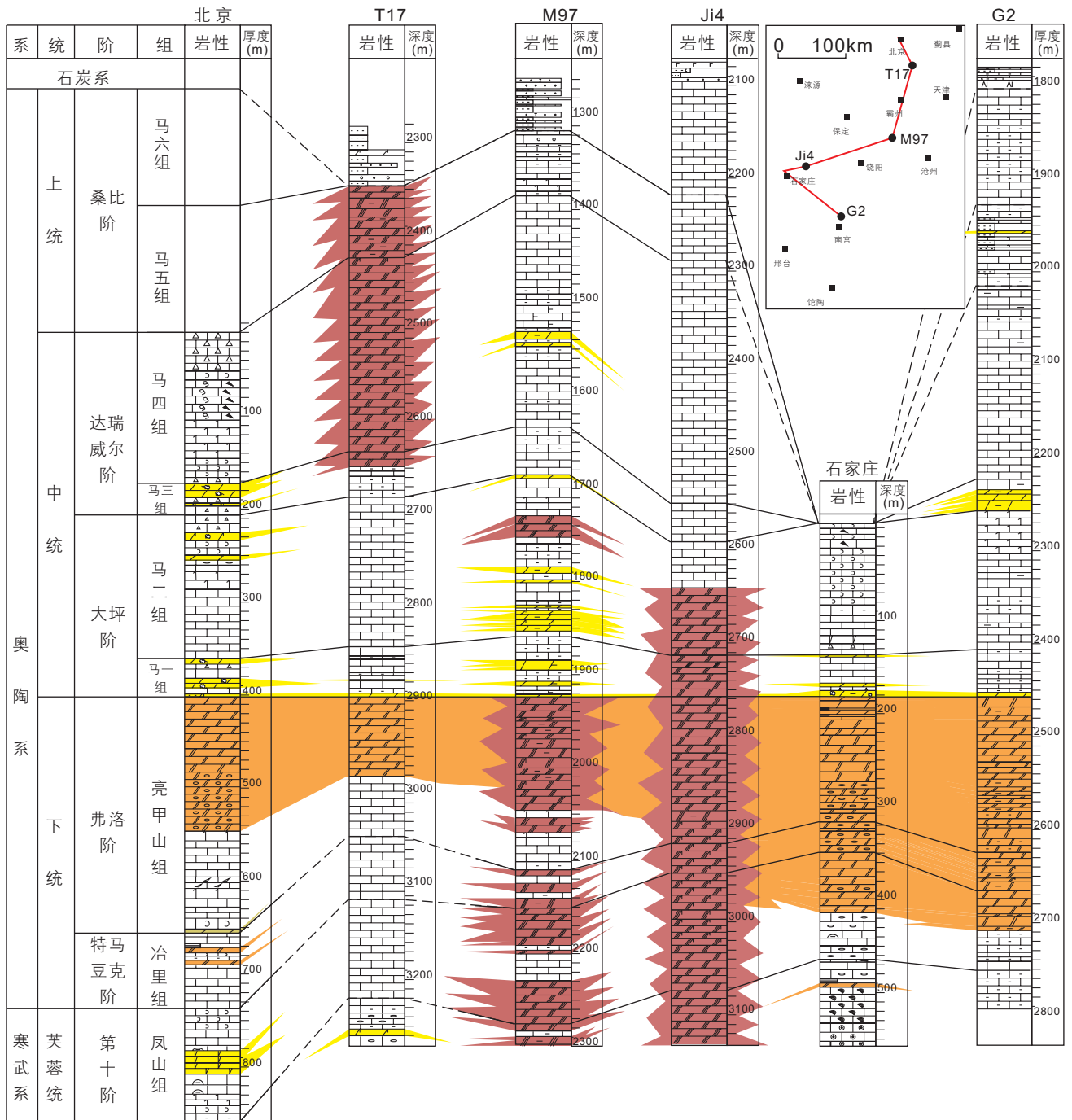


图 6 冀中坳陷奥陶系白云岩垂向分布 (图例见图 5)

Fig. 6 The distribution of dolomites in the Ordovician in the Jizhong Depression (legend is shown in Fig. 5)

作用而形成。这表明白云化时间发生在固结成岩之后。白云岩的碳氧同位素偏负, 也表明在埋藏成岩期, 岩石受到了淡水流体和温度的影响。此外, 还可见到缝合线被中一粗晶白云石切割的现象, 表明白云化时间发生在岩石深埋藏之后。发育中一粗晶白云岩的部位均在深大断裂和岩浆岩附近, 表明白云化作用与构造活动和岩浆活动密切相关。而这些深大断裂和岩浆岩

主要形成于喜马拉雅运动早期, 因此判断白云化时间发生在古近纪。

### 4.3 白云化流体

下古生界现今埋藏深度多在 2000 m 以下。以无极地区的 Ji4 井为例, 其奥陶系目前埋藏深度在 3500 m 左右, 为沉积期以来的最大埋深。按地温梯度计算其



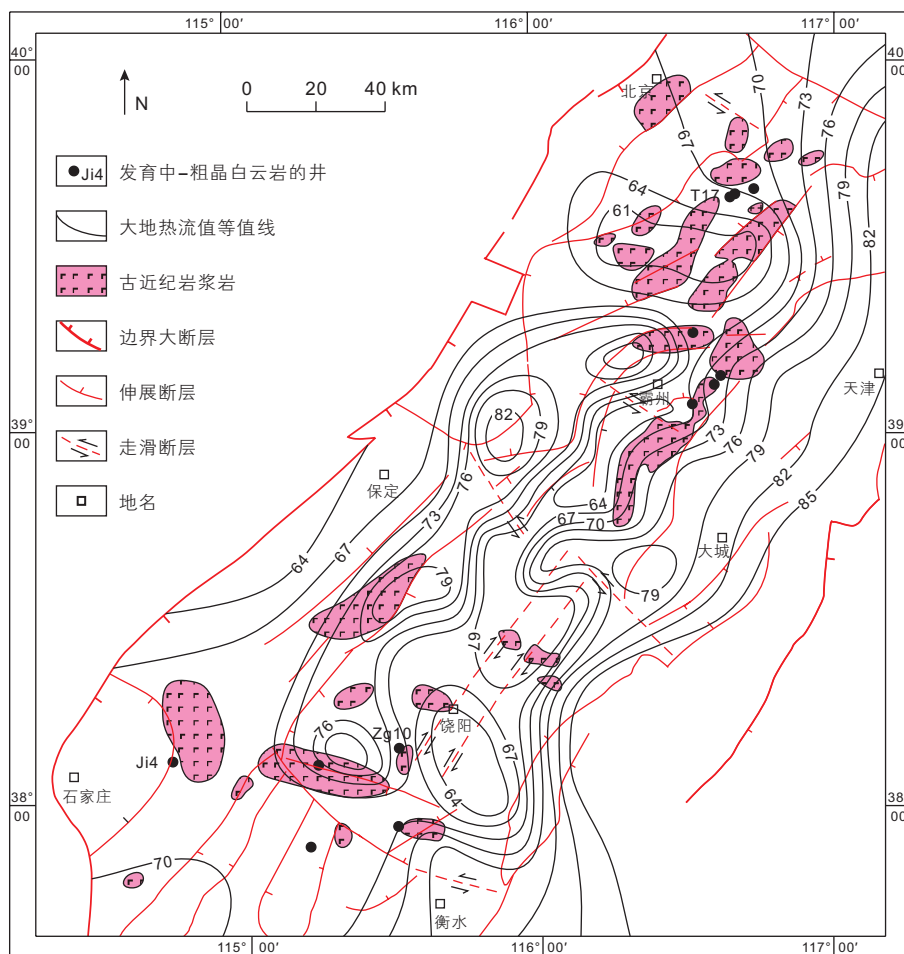


图7 冀中坳陷下古生界中一粗晶白云岩分布图(注:岩浆岩分布数据来自于彭宁等(2010)<sup>[34]</sup>)

Fig. 7 The distribution of medium-coarse-sized crystalline dolomites in the Lower Paleozoic, Jizhong Depression

Note: the distribution data of magmatic rocks are derived from Peng(2010)<sup>[34]</sup>

地层温度在  $120^{\circ}\text{C}$  左右(图 8A)。而从该井中一粗晶白云岩中获取的流体包裹体的均一化温度平均为  $173^{\circ}\text{C}$ , 远大于正常地温梯度下的地层温度。与此相似的还有苏桥地区的 S4 井(图 8B), 目前奥陶系埋深在 4500 m 左右, 按地温梯度计算其地层温度在  $160^{\circ}\text{C}$  左右, 与其包裹体均一化温度的  $235^{\circ}\text{C}$  相差甚远。这些特征表明, 白云化作用有热液的参与。白云岩的厚度达 300 m(T17 井), 甚至达到 570 m(Ji4 井), 这不仅需要足够大的流体通道, 更需要足够多的白云化流体, 因此可判断这种白云化流体主要是构造热液。并且在裂缝和溶蚀孔洞中分布的萤石、闪锌矿、重晶石、鞍形白云石、自生石英等矿物组合, 更是热液活动的标志。

综上所述, 热液白云化作用受构造运动的影响, 形成于喜马拉雅运动早期, 即古近纪。在深埋藏阶段, 由于镁离子的富集而发生白云化作用。镁离子主要来源于热液流体。热液流体在温度差异和构造活动的影

响下, 沿着深大断裂运移。在运移过程中进入周围渗透性地层, 使得地层中的碳酸盐岩发生白云化作用。在距离热液区和深大断裂较远的部位, 热液流体的可进入性差, 白云化作用就弱。

## 5 油气储层地质意义

热液白云岩在世界各地的油气田中广泛存在, 并能形成有效的储层。北美地区的碳酸盐岩储层中有一部分就是热液白云岩储层<sup>[39-43]</sup>。国内在塔里木盆地、四川盆地和鄂尔多斯盆地也有热液白云岩储层的报道<sup>[44-48]</sup>。这些热液白云岩的研究表明, 在热液白云化的过程中, 较高的地层温度使得白云石过度生长, 形成的中一粗晶白云石呈镶嵌状接触, 晶间孔发育较差。但是热液白云岩由于靠近断裂, 且白云岩脆性大, 因此裂缝发育程度高, 会促进岩溶作用的进行。冀中坳陷的中一粗晶白云岩相对于其他类型的白云岩而言,

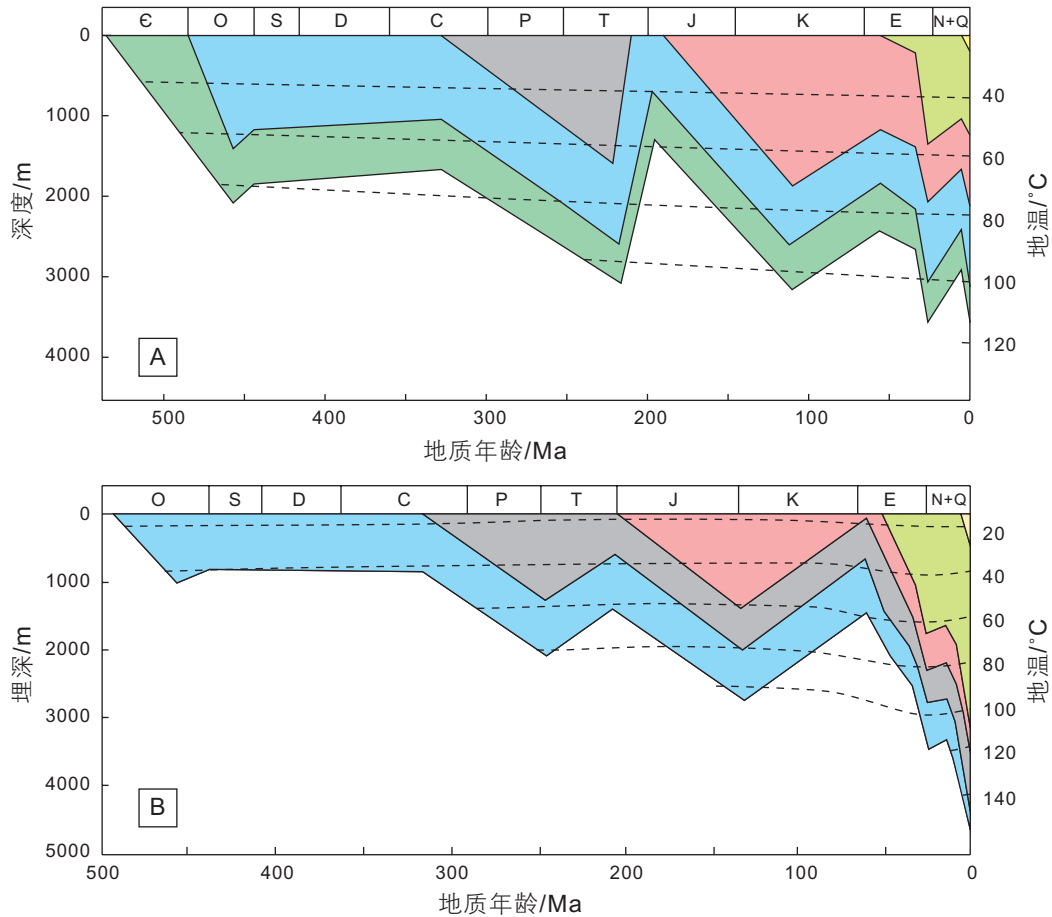


图 8 冀中坳陷 Ji4 井 (A) 与 S4 井 (B) 下古生界地层埋藏史

Fig. 8 Burial history of the Lower Paleozoic in Ji4 well (A) and S4 well (B), Jizhong Depression

表 1 冀中坳陷下古生界不同类型白云岩物性对比

Table 1 Physical Properties of different types of dolomites in the Lower Paleozoic, Jizhong Depression

井号	岩性	层位	平均孔隙度 /%	平均渗透率 / $(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	孔隙度中值 /%	渗透率中值 / $(10^{-3}\mu\text{m}^2)$	样品数量
S1-5	泥—粉晶白云岩	马四组 马五组	3.32	1.84	2.00	0.16	23
S4	泥—粉晶白云岩	马五组	1.23	0.85	1.30	0.59	8
R89	粉—细晶白云岩	亮甲山组	1.70	0.05	0.70	0.03	27
B23	粉—细晶白云岩	亮甲山组	2.01	—	2.10	—	7
S1-4	中—粗晶白云岩	马四组	4.96	6.45	2.60	2.90	9
S1-5	中—粗晶白云岩	马四组	3.53	0.71	3.50	0.50	38
J6	中—粗晶白云岩	马四组	3.98	4.08	2.70	0.23	27

具有较高的孔隙度和渗透率(表 1)。

热液白云岩周围还往往伴生有热液淋滤石灰岩,并形成高产的油气藏<sup>[10]</sup>。热液淋滤石灰岩与热液白云岩具有相联系的成因,同样分布在基底的伸展断层、走滑断层附近。加拿大西部泥盆系的热液淋滤灰岩往往优先分布于热液白云岩之上或其两侧<sup>[10]</sup>。总体来

说,石灰岩中的热液溶蚀作用主要是对原有孔隙的继承和调整<sup>[49-52]</sup>。热液在石灰岩中的作用范围,受岩石中已有孔、洞、缝分布范围的控制。

国内外的研究表明热液储层的分布与基底深大断裂有关,尤其是深大断裂的负花状构造附近。负花状构造形成构造低谷,而非构造高部位,因此在油气勘

探中往往被忽视。此外,在断层相交的部位,会形成一个扇形的转换拉伸或挤压区域,有利于热液蚀变的发生。对于冀中拗陷来说,热液白云岩还分布在古近纪的岩浆岩附近。其在平面上呈小范围的点状分布,在垂向上呈大厚度的块状层分布。在油气勘探过程中,不仅需要对这些部位重点勘查,还可能需要一系列水平钻井来更为高效的寻找这类储层<sup>[53]</sup>。

## 6 结论

冀中拗陷下古生界发育有热液白云岩。这种热液白云岩主要是中—粗晶白云岩,且发育有缝合线和热液矿物组合。相对于其他类型的白云岩,其垂向厚度

大,平面范围小,分布不受地层的控制,成因与沉积环境无关。此外,在分布位置上与构造活动密切相关,位于拉伸断裂、走滑断裂和古近纪岩浆岩附近。

热液白云岩的白云化时间为古近纪,白云化流体为构造热液。来源于深部的热液流体受温度差和构造运动的驱动,进入渗透性的碳酸盐岩地层中,从而发生白云化作用。碳酸盐岩距离断裂越远,白云化作用就越弱。

热液白云岩储层往往分布于负花状构造附近,它是一个构造低谷,在油气勘探中容易被忽视。热液淋滤灰岩与热液白云岩伴生,其溶蚀作用主要是对已有孔渗系统的继承和调整。热液白云岩及热液淋滤灰岩是有利的储集层。

## 参考文献

- [1] 金振奎,冯增昭.华北地台东部下古生界白云岩的类型及储集性[J].沉积学报,1993,11(02):11-18. [JING Z K, FENG Z Z. Types and reservoiring performance of dolostones of the Lower Paleozoic in the eastern North China platform. Acta Sedimentologica Sinica[J], 1993, 11: 11-18.]
- [2] FENG Z Z, ZHANG Y S, JIN Z K. Type, origin, and reservoir characteristics of dolostones of the Ordovician Majiagou Group, Ordos, North China platform[J]. Sedimentary Geology, 1998, 118(1-4): 127-140.
- [3] 冯增昭.华北地台早古生代岩相古地理[M].北京:地质出版社,1990. [FENG Z Z. Lithofacies paleogeography of early Paleozoic of North China platform[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.]
- [4] WARREN J. Dolomite: Occurrence, evolution and economically important associations[J]. Earth-Science Reviews, 2000, 52(1): 1-81.
- [5] 李凤杰,杜凌春,赵俊兴,等.鄂尔多斯盆地苏东地区马家沟组五段5亚段白云岩成因[J].石油学报,2016,37(3):328-338. [LI F J, DU L C, ZHAO J X, et al. Dolomite genesis in Member Ma55 of Majiagou Formation, Sudong area, Ordos Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2016, 37(3): 328-338.]
- [6] ADABI M H. Multistage dolomitization of upper Jurassic Mozduran formation, Kopet-Dagh Basin, Iran[J]. Carbonates and Evaporites, 2009, 24(1): 16-32.
- [7] WIDODO R W, LAYA J C. Controls on diagenesis and dolomitization of peritidal facies, early Cretaceous Lower Edwards Group, central Texas, USA[J]. Facies, 2017, 63(4): 23-32.
- [8] 刘红光,刘波,吴双林,等.塔里木盆地玉北地区蓬莱坝组白云岩类型及成因[J].岩石学报,2017,33(4):1233-1242. [LIU H G, LIU B, WU S L, et al. The types and origin of the Penglaiba Formation dolomite in the Yubei area, Tarim Basin[J]. Acta Petrologica Sinica, 2017, 33(4): 1233-1242.]
- [9] 张静,张宝民,单秀琴.中国中西部盆地海相白云岩主要形成机制与模式[J].地质通报,2017,36(4):664-675. [ZHANG J, ZHANG B M, SHAN X Q. Major formation mechanisms and models of marine dolomite in middle and western basins of China[J]. Geological Bulletin of China, 2017, 36(4): 664-675.]
- [10] DAVIES G R, SMITH J L B. Structurally controlled hydrothermal dolomite reservoir facies: An overview[J]. AAPG Bulletin, 2006, 90(11): 1641-1690.
- [11] 陈代钊,钱一雄.深层—超深层白云岩储集层:机遇与挑战[J].古地理学报,2017,19(2):187-196. [CHEN D Z, QIAN Y X. Deep or super-deep dolomite reservoirs: Opportunities and challenges[J]. Journal of Palaeogeography, 2017, 19(2): 187-196.]
- [12] JACQUEMYN C, DESOUKY H E, HUNT D, et al. Dolomitization of the latemar platform: fluid flow and dolomite evolution[J]. Marine and Petroleum Geology, 2014, 55: 43-67.
- [13] MANSURBEG H, MORAD D, OTHMAN R, et al. Hydrothermal dolomitization of the Bekhme formation (Upper Cretaceous), Zagros Basin, Kurdistan Region of Iraq: Record of oil migration and degradation[J]. Sedimentary Geology, 2016, 341: 147-162.
- [14] BERGER Z, DAVIES G. The development of linear hydrothermal dolomite (HTD) reservoir facies along wrench or strike slip fault systems in the Western Canada Sedimentary Basin[J]. Canadian Society of Petroleum Geologists Reservoir, 1999, 26(1): 34-38.
- [15] LÓPEZ-HORGUE M A, IRIARTE E, SCHRÖEDER S, et al. Structurally controlled hydrothermal dolomites in Albian carbonates of the Ason Valley, Basque Cantabrian Basin, northern Spain[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(5): 1069-1092.

- [16] LAPPONI F, BECHSTÄDT T, BONI M, et al. Hydrothermal dolomitization in a complex geodynamic setting (Lower Palaeozoic, northern Spain)[J]. *Sedimentology*, 2014, 61(2): 411–443.
- [17] 江青春, 胡素云, 汪泽成, 等. 四川盆地中二叠统中—粗晶白云岩成因[J]. *石油与天然气地质*, 2014, 35(4): 503–510. [JIANG Q C, HU S Y, WANG Z C, et al. Genesis of medium-macro-crystalline dolomite in the Middle Permian of Sichuan Basin[J]. *Oil and Gas Geology*, 2014, 35(4): 503–510.]
- [18] PEYRAVI M, RAHIMPOUR-BONAB H, NADER F H, et al. Dolomitization and burial history of lower Triassic carbonate reservoir-rocks in the Persian Gulf (Salman offshore field)[J]. *Carbonates and Evaporites*, 2015, 30(1): 25–43.
- [19] 伊海生, 陈志勇, 季长军, 等. 羌塘盆地南部地区布曲组砂糖状白云岩埋藏成因的新证据[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 737–746. [YI H S, CHEN Z Y, JI C J, et al. New evidence for deep burial origin of sucrosic dolomites from Middle Jurassic Buqu Formation in southern Qiangtang Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30(3): 737–746.]
- [20] MACHEL H G, LONNÉE J. Hydrothermal dolomite—A product of poor definition and imagination[J]. *Sedimentary geology*, 2002, 152(3): 163–171.
- [21] AZMY K, LAVOIE D, KNIGHT I, et al. Dolomitization of the Lower Ordovician Aguathuna formation carbonates, Port au Port Peninsula, western Newfoundland, Canada: Implications for a hydrocarbon reservoir[J]. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 2008, 45(7): 795–813.
- [22] 张涛, 苏玉山, 余刚, 等. 热液白云岩发育模式——以扎格斯盆地白垩系A油田为例[J]. *石油与天然气地质*, 2015(3): 393–401. [ZHANG T, SU Y S, SHE G, et al. A study on the genetic model of hydrothermal dolomitization in Taq oilfield, Kurdistan region, Iraq—taking oilfield A in the Cretaceous in Zagros Basin as an example[J]. *Oil and Gas Geology*, 2015, 36(3): 393–401.]
- [23] 易士威, 赵淑芳, 范炳达, 等. 冀中拗陷中央断裂构造带潜山发育特征及成藏模式[J]. *石油学报*, 2010, 31(3): 361–367. [YI S W, ZHAO S F, FAN B D, et al. Development characteristics of buried hill and reservoir forming pattern in central faulted structural belt of Jizhong Depression[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2010, 31(3): 361–367.]
- [24] 翟国国. 克拉通化与华北陆块的形成[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(8): 1037–1046. [ZHAI M G. Cratonization and the Ancient North China Continent: A summary and review[J]. *Science China Earth Sciences*, 2011, 41(8): 1037–1046.]
- [25] MACHEL H G. Application of cathodoluminescence to carbonate diagenesis[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000: 271–301.
- [26] DEFYEYES K S, LUCIA F J, WEYL P K. Dolomitization of recent and Plio-Pleistocene sediments by marine evaporite waters on Bonaire, Netherlands Antilles[J]. *Special Publications*, 1965, 13: 71–88.
- [27] GOLDSMITH J R, GRAFF D R. Structural and compositional variations in some natural dolomites[J]. *Journal of Geology*, 1958, 66(6): 678–693.
- [28] HIRD K. The composition of carbonate and oxygen isotope in the ancient dolomite[J]. *AAPG Bulletin*, 1987, 34(4): 156–232.
- [29] 赵文智, 沈安江, 胡素云, 等. 塔里木盆地寒武—奥陶系白云岩储层类型与分布特征[J]. *岩石学报*, 2012, 28(3): 758–768. [ZHAO W Z, SHEN A J, HU S Y, et al. Types and distributional features of Cambrian-Ordovician dolostone reservoirs in Tarim Basin, northwestern China[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2012, 28(3): 758–768.]
- [30] 贺训云, 寿建峰, 沈安江, 等. 白云岩地球化学特征及成因——以鄂尔多斯盆地靖西马五段中组合为例[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(3): 375–384. [HE X Y, SHOU J F, SHEN A J, et al. Geochemical characteristics and origin of dolomite: A case study from the middle assemblage of Ordovician Majiagou Formation Member 5 of the west of Jingbian Gas Field, Ordos Basin, North China[J]. *Petroleum Exploration & Development Online*, 2014, 41(3): 417–427.]
- [31] GOLDSTEIN R H. Fluid inclusions in sedimentary and diagenetic systems[J]. *Lithos*, 2001, 55(1–4): 159–193.
- [32] 杜金虎, 邹伟宏, 费宝生, 等. 冀中拗陷古潜山复式油气聚集区[M]. 北京: 科学出版社, 2002. [DU J H, ZOU W H, FEI B S, et al. Buried hill composite hydrocarbon accumulation zone of Jizhong Depression[M]. Beijing: Science Press, 2002.]
- [33] 从柏林. 岩浆活动与火成岩组合[M]. 北京: 地质出版社, 1979. [CONG B L. Combination of Magmatic activity and igneous[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1979.]
- [34] 彭宁, 崔秀梅, 崔周旗, 等. 冀中拗陷古近系—新近系火成岩岩相特征与油气成藏模式[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(2): 17–20. [PENG N, CUI X, CUI Z. Tertiary volcanic lithofacies characteristics and oil-gas reservoir accumulation model, Jizhong depression[J]. *Petroleum Geology & Recovery Efficiency*, 2010, 17(2): 17–20.]
- [35] 刘进. 盆地基底古热流求取方法[J]. *大庆石油地质与开发*, 2006, 25(6): 16–17. [LIU J. Basin basement palaeo-heat flow calculation method[J]. *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*, 2006, 25(6): 16–17.]
- [36] 常健, 邱楠生, 赵贤正, 等. 渤海湾盆地冀中拗陷现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2016, 59(3): 1003–1016. [CHANG J, QIU N S, ZHAO X Z, et al. Present-day geothermal regime of the Jizhong Depression in Bohai Bay Basin, East China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2016, 59(3): 1003–1016.]
- [37] CHANG J, QIU N, ZHAO X, et al. Mesozoic and Cenozoic tectono-thermal reconstruction of the western Bohai Bay Basin (East China) with implications for hydrocarbon generation and migration[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 160: 380–395.
- [38] 冯石, 郝石生. 饶阳凹陷和廊固凹陷的古地温演化与生油气潜力[J]. *华东石油学院学报*, 1983, 1(1): 1–10. [FENG S, HAO S S.

- Paleotemperature evolution and petroleum generation potential of raoyang and langgu subsidences of north China Basin[J]. *Journal of the University of Petroleum China*, 1983, 1(1): 1–10.]
- [39] OING H, MOUNTJOY E. Large-scale fluid flow in the Middle Devonian Presqu'ile Barrier, Western Canada Sedimentary Basin[J]. *Geology*, 1992, 20(10): 903–906.
- [40] MIDDLETON K, CONIGLIO M, SHERLOCK R, et al. Dolomitization of Middle Ordovician carbonate reservoirs, southwestern Ontario, Canada[J]. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 1993, 41(2): 150–163.
- [41] QING H, MOUNTJOY E W. Formation of coarsely crystalline, hydrothermal dolomite reservoirs in the Presqu'ile Barrier, Western Canada Sedimentary Basin[J]. *AAPG Bulletin*, 1994, 78(1): 55–77.
- [42] PURSER B, TUCKER M, ZENGER D. Dolomites: A volume in honour of Dolomieu[M]. New Jersey: Wiley-Blackwell, 2009:231–254.
- [43] DUGGAN J P, MOUNTJOY E W, STASIUK L D. Fault-controlled dolomitization at Swan Hills Simonette oil field( Devonian), deep basin westcentral Alberta, Canada[J]. *Sedimentology*, 2001, 48(2): 301–323.
- [44] 黄思静, 兰叶芳, 黄可可, 等. 四川盆地西部中二叠统栖霞组晶洞充填物特征与热液活动记录[J]. *岩石学报*, 2014, 30(3): 687–698. [HUANG S J, LAN Y F, HHUANG K K, et al. Vug fillings and records of hydrothermal activity in the Middle Permian Qixia Formation, western Sichuan Basin[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2014, 30 (3): 687–698.]
- [45] 王玉萍, 董春梅, 陈洪德, 等. 鄂尔多斯盆地中西部奥陶纪热液活动的证据及其对储层发育的影响[J]. *海相油气地质*, 2014, 19(2): 23–31. [WANG Y P, DONG C M, CHEN H D, et al. Petrological evidence of ordovician hydrothermal activities and its geological significance to reservoir development in central and western parts of Ordos Basin[J]. *Marine Origin Petroleum Geology*, 2014, 19(2): 23–31.]
- [46] 刘伟, 黄擎宇, 王坤, 等. 深埋藏阶段白云岩化作用及其对储层的影响——以塔里木盆地地下古生界白云岩为例[J]. *天然气地球科学*, 2016, 27(5): 772–779. [LIU W, HUANG Q Y, WANG K, et al. Dolomitization and influence on reservoir development in deep-burial stage: A case study of Lower Paleozoic in Tarim Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2016, 27(5): 772–779.]
- [47] 李大军, 陈辉, 陈洪德, 等. 四川盆地中二叠统茅口组储层形成与古构造演化关系[J]. *石油与天然气地质*, 2016, 37(5): 756–763. [LI D J, CHEN H, CHEN H D, et al. Relationship between reservoir development in the Middle Permian Maokou Formation and paleostructure evolution in the Sichuan Basin[J]. *Oil & Gas Geology*, 2016, 37(5): 756–763.]
- [48] 王坤, 胡素云, 胡再元, 等. 塔里木盆地古城地区寒武系热液作用及其对储层发育的影响[J]. *石油学报*, 2016, 37(4): 439–453. [WANG K, HU S Y, HU Z Y, et al. Cambrian hydrothermal action in Gucheng area, Tarim Basin and its influences on reservoir development[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2016, 37(4): 439–453.]
- [49] 钱一雄, 陈代钊, 尤东华, 等. 塔东北库鲁克塔格地区中上寒武统白云岩类型与孔隙演化[J]. *古地理学报*, 2012, 14(4): 461–476. [QIAN Y X, CHEN D Z, YOU D H, et al. Types of dolostones and pore evolution of the Middle and Upper Cambrian in Kuruk Tag area of northeastern Tarim Basin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 14(4): 461–476.]
- [50] 胡作维, 李云, 韩信, 等. 碳酸盐岩储层中热液流体改造作用研究进展[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(5): 58–65. [HU Z W, LI Y, HAN X, et al. Reviews on the hydrothermal alteration of carbonate reservoirs[J]. *Geological Science & Technology Information*, 2015, 34(5): 58–65.]
- [51] 赵文智, 沈安江, 郑剑锋, 等. 塔里木、四川及鄂尔多斯盆地白云岩储层孔隙成因探讨及对储层预测的指导意义[J]. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44(9): 1925–1939. [ZHAO W Z, SHEN A J, ZHENG J F, et al. The porosity origin of dolomite reservoirs in the Tarim, Sichuan and Ordos basins and its implication to reservoir prediction[J]. *Science China: Earth Sciences*, 2014, 44(9): 1925–1939.]
- [52] BECKERT J. Relationship between karstification and burial dolomitization in Permian platform carbonates (Lower Khuff – Oman)[J]. *Sedimentary Geology*, 2016, 342: 165–179.
- [53] BONNAR R. Talisman Energy Inc and the Ontario oil patch: Does the shoe fit?[J]. *Ontario Oil & Gas*, 2002,1(1):8–13.

## Identification and formation mechanisms of hydrothermal dolomite in the Lower Paleozoic, Jizhong Depression

YAN Wei<sup>1</sup>, JIN Zhenkui<sup>1</sup>, YAO Mengzhu<sup>1</sup>, ZHAO Wenlong<sup>2</sup>

<sup>1</sup> College of Geosciences, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

<sup>2</sup> Research Institute of Exploration and Development, PetroChina Huabei Oilfield Company, Renqiu 062552, China

**Abstract** Many types of dolomites are developed in the Lower Paleozoic in the Jizhong Depression, and hydrothermal dolomites

are distributed in many areas. By analyzing the lithology, spatial distribution, and geochemical characteristics of dolomite, the unique characteristics of hydrothermal dolomite are identified. Hydrothermal dolomite has a medium-coarse-sized crystalline structure. The crystalline size is between 0.2~2 mm, mostly subhedral or anhedral. Stylolites and mottled residual structures are visible inside the dolomite. Cathodoluminescence is weak and dark brown. The ordering of dolomites are between 0.73~0.95, averaging 0.75. The molar concentration of  $\text{CaCO}_3$  is between 49.667%~52.667%, averaging 50.3%. The distribution range of  $\delta^{13}\text{C}$  is  $-4.669\text{‰}$ ~ $-0.366\text{‰}$  (PDB), averaging  $-1.433\text{‰}$  (PDB). The distribution range of  $\delta^{18}\text{O}$  is  $-9.289\text{‰}$ ~ $-6.538\text{‰}$  (PDB), averaging  $-7.798\text{‰}$  (PDB). The content of MgO and CaO are relatively high, and have a negatively correlation. The Sr contents (ppm) are low. There are two phase gas-liquid fluid inclusions in these dolomites. The homogenization temperature of fluid inclusions ranges between 90 °C~330 °C. The dolomites are mainly massive, and are close to the tension faults, the strike slip faults and the Paleogene igneous rocks. These features indicate that the dolomitization occurred in Paleogene. The dolomitization fluid was the tectonic hydrothermal fluid from the early Himalaya movement. The high-quality reservoirs of hydrothermal dolomite are located near the deep basal faults and the Paleogene magmatic rocks.

**Keywords** Jizhong Depression; Lower Paleozoic; medium-coarse-sized crystalline dolomite; hydrothermal dolomite; dolomitization; origin

**doi:** 10.3969/j.issn.2096-1693.2018.04.034

(编辑 付娟娟)