

文章编号: 1001-6112(2009)01-0087-05

威林斯顿盆地奥陶系 白云岩储层同位素与成岩作用分析

李伟^{1,2}, 蒲仁海³, 卿海若⁴

(1. 中国地质大学 资源学院, 武汉 430074; 2. 中国石化 中原石油勘探局钻采处, 河南 濮阳 457001;
3. 西北大学 地质系, 西安 710069; 4. 里加纳大学 地质系, 里加纳, 萨斯克切温省, SK S4S 0A2, 加拿大)

摘要:威林斯顿(Williston)盆地上奥陶统红河群灰岩由于不同期次的白云岩化作用,形成了4种不同产状类型的白云石:纹层状微晶白云石、生物钻孔充填白云石、基质白云石、马鞍状白云石,只有基质白云石因具晶间孔而成为储层。4种白云石的氧、碳、锶同位素组成均与晚奥陶世的海水同位素组成有较大区别。岩石学和地化研究表明,前2种白云石的白云岩化流体应来自晚奥陶世海水,但今天的同位素组成反映了后期的改造或重构;储层白云石形成的温度稍高,时间可能稍晚,白云岩化流体可能来源于志留纪海水、或寒武—早中奥陶世海水、或深部热液;马鞍状白云石的形成应与深部热液有关。白云岩化成层状发生可能与薄的富含有机质的Kukersite页岩有关。

关键词:白云岩化流体;同位素;成岩作用;储层;奥陶系;威林斯顿盆地;加拿大

中图分类号:TE122.221

文献标识码:A

ANALYSIS OF ISOTOPES AND DIAGENESIS OF ORDOVICIAN DOLOMITE RESERVOIR IN THE WILLISTON BASIN

Li Wei^{1,2}, Pu Renhai³, Qing Hairuo⁴

(1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan, Hubei 430074, China; 2. Drilling and Oil Production Engineering Department, Zhongyuan Petroleum Exploration Bureau, SINOPEC, Puyang, Henan 457001, China; 3. Department of Geology, Northwest University, Xi'an, Shaanxi, 710069, China; 4. Department of Geology, University of Regina, Regina, Saskatchewan, SK S4S 0A2, Canada,)

Abstract: As a result of different stages of dolomitization, four types of dolomite rocks occurred in the Upper Ordovician Red River limestones of Williston Basin. Within the four types of dolomite rocks that are laminated micro-crystalline dolomite, burrow filled dolomite, matrix dolomite and saddle dolomite, only the matrix dolomite serves as reservoir with inter-crystalline pores. The composition of oxygen, carbon, and strontium isotopes of the four dolomites are obviously different from that of the isotopes of Late Ordovician marine water. Petrology and geochemistry study shows that dolomitization fluid flows of the former two dolomite rocks should come from Late Ordovician marine water, but today's their isotope composition reflect lateral rebuilding or modification. Reservoir dolomite rocks formed at a slightly higher temperature, and a rather later stage, and their fluid flows of dolomitization might come from marine water of Silurian or Cambrian - Middle Ordovician epoch or from thermal fluid in depth. The formation of saddle dolomites should be associated with deep thermal fluids. Occurrences of dolomitization along certain horizons are probably related to several thin layers of Kukersite shale that contains substantial organic materials in this area.

Key words: dolomitized fluid flow; isotope; diagenesis; reservoir; Ordovician; the Williston Basin; Canada

自从1995年在萨斯克切温省东南的威林斯顿(Williston)盆地上奥陶统红河群白云岩储层中首次发现Midale油田以来,已在该区连续找到了15个以上类似的油气藏。油气主要产于红河群Yeoman组

上部(C旋回的生物钻孔充填白云岩段),少部分产自红河群Herald组Lake Alma段(C旋回的纹层白云岩段)下部(图1)。白云岩化作用在形成有效储层方面起着非常重要的作用。因此,白云岩化流体

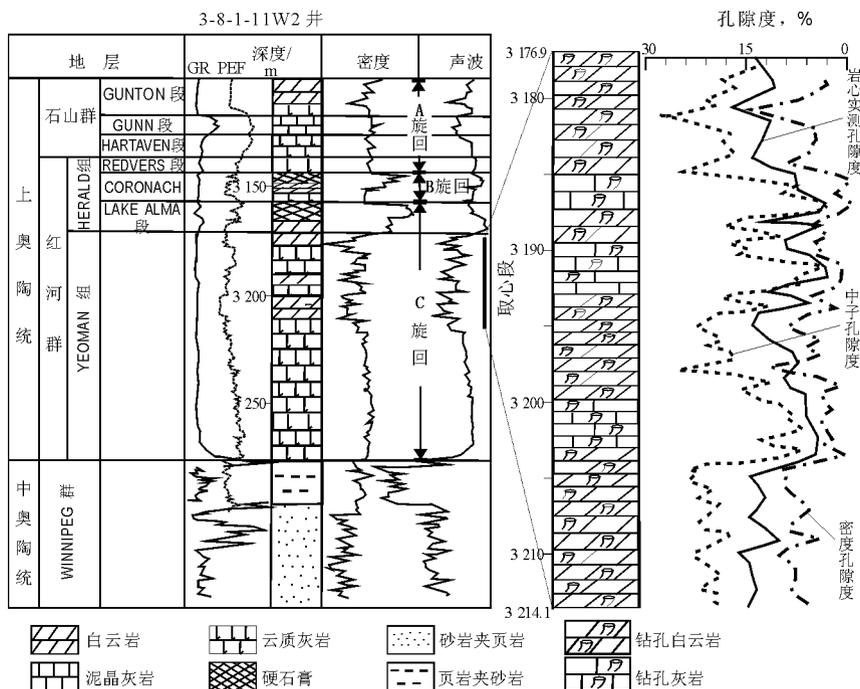


图 1 威林斯顿盆地 3-8-1-11W2 井取心段的奥陶系红河群地层综合图

Fig.1 The general stratigraphy of Ordovician Red River carbonates with summary of lithology of cores from Well 3-8-1-11W2 in the Williston Basin

的来源、白云岩化发生的时间等成岩过程的研究对理解白云岩储层的连通性、空间展布和非均质性、寻找新的白云岩勘探靶区、实施有效的勘探手段等都有一定意义。

Yeoman 组的特征是在粒泥灰岩、泥粒灰岩和泥晶灰岩的基质中含约 35%~50% 的 *Thalassinoides* 生物钻孔。Yeoman 组的顶部白云岩化后孔隙通常较为发育^[1,2]。Midale 油田的红河群产层段主要位于 Yeomen 组顶部的生物钻孔白云岩内。

1 白云岩类型与白云岩化模式

根据原岩的结构和白云岩化程度与成因,红河群的碳酸盐岩可分为 4 种类型的白云岩化作用:

1) 完全白云岩化,即 *Thalassinoides* 生物钻孔和非钻孔的基质均为白云岩,但钻孔和基质具明显不同的结构特征,钻孔部分晶体一般较小,多为大小不等的粉—细晶,它形,无晶间孔;基质部分则为大小较均一细或中晶自形晶体,发育晶间孔(图 2a, b, c)。2) 选择性白云岩化,即 *Thalassinoides* 生物钻孔部分白云岩化,但基质仍残余为灰岩;白云石晶体多为它形粉晶或粉—细晶,致密无晶间孔。3) 少量的马鞍状(saddle)白云石,是一种在晚成岩作用期较高温度下在溶孔、溶洞和裂缝中形成的零星的白云石,晶体粗大,可达数毫米,自形(图 2a),尽管其对溶蚀孔洞的充填使孔隙度减小,但由于其

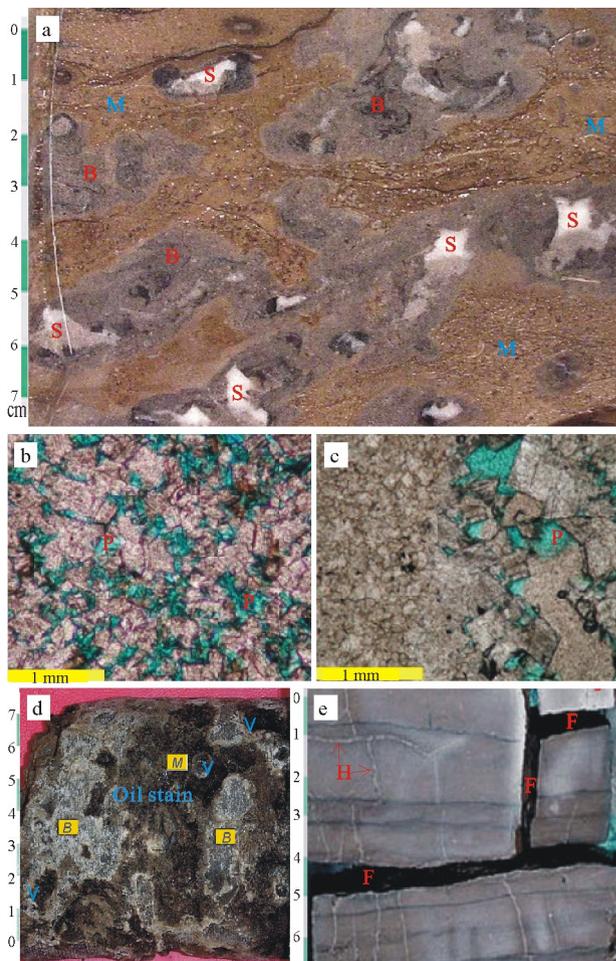
含量很少,所以对储层改造不大。4) 硬石膏段之下紧邻的 Lake Alma 组纹层状白云岩段(图 2e),由泥晶灰岩白云岩化而成,多为无孔隙微晶白云岩,少量为含孔隙的细晶白云岩。

Yeomen 组中下部大部分岩石为未发生白云岩化的生物钻孔微晶灰岩、粒泥灰岩,一般为无孔隙的致密岩石。所以储层只发育在完全白云岩化的(1)类岩石中。储集空间除白云岩晶间孔外,储层段还常发育溶孔和裂缝(图 2d, e)。

Yeoman 组顶部的白云岩一般有 3~4 层,各层在横向上分布稳定。Kendal 等^[3,4]认为这种沿 4 个特定层位发生的白云岩化可能与 4 层薄的富含有机质的库克页岩(kickersite)排放的有机酸的溶蚀有关,并根据岩石学观察提出两种可能的白云岩化模式。一为成岩早期的渗滤回流模式,即 Lake Alma 段潮坪硬石膏沉淀时,由于钙离子的析出,残余的高 Mg^{2+}/Ca^{2+} 的回流海水在鲕滩下渗滤沿 Yeoman 组内的库克页岩层位发生白云岩化(图 3)。另一为成岩晚期的深部热水对流模式,即含镁离子的深部热水上渗沿 Yeoman 组内的库克页岩层位发生白云岩化(图 4),至少马鞍状白云石的形成可能与后者有关。

2 白云岩化流体的同位素分析

总共采集分析了 21 个 $\delta^{18}O$ 和 $\delta^{13}C$ 样品,9 个



图中字母: B. 生物钻孔充填白云石; M. 基质白云石; S. 马鞍状白云石; P. 孔隙; V. 溶孔; F. 裂缝; H. 发丝状裂缝。

图 2 威林斯顿盆地红河群白云岩储层的取心和显微特征

a. 生物钻孔白云岩岩心光面, 见 3 种类型的白云石; b. 铸体薄片钻孔白云岩的基质部分, 见自形白云石晶间孔; c. 铸体薄片, 左半部分为钻孔充填部分, 为较小它形白云石, 无晶间孔; 右半部分为基质白云石, 呈较大的自形晶体, 具晶间孔; d. 油浸白云岩岩心, 基质上含溶孔; e. 纹层状白云岩岩心光面, 见开启的相互垂直的两组构造裂缝和被浅色物质充填的发丝状裂缝

Fig.2 Core and micrographic photographs of Red River dolomite in the Williston Basin

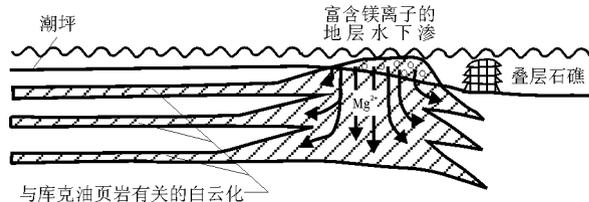


图 3 储层白云岩的回流渗滤模式成因
Fig.3 Model of reflux seepage for dolomitized reservoir formation

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 样品, 多数样品采自萨斯克切温省东南 3-8-1-11W2 井的红河群碳酸盐岩中 (图 1)。选 3-8-1-11W2 井作为分析对象是因为它的红河群岩心含有完整的成岩矿物组合, 尤其是它含有可能

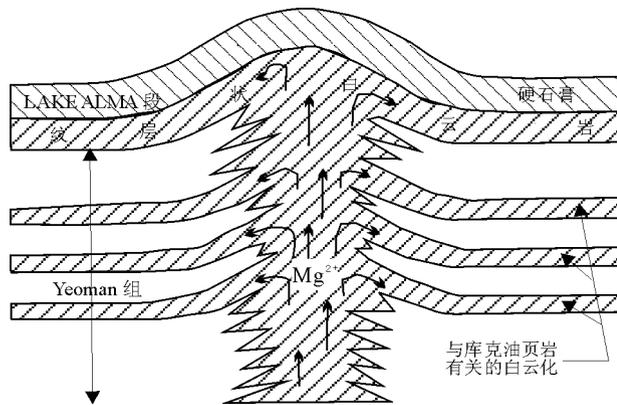


图 4 深部热水沿断层裂缝系统上窜对流形成白云岩储层的模式

Fig.4 Model of dolomitized reservoir formation as hydrothermal fluids moved up along fault and fracture systems due to the “thermal” convection

为热液成因的马鞍状白云石。

2.1 *Thalassinoides* 生物钻孔中的交代白云石

3-8-1-11W2 井岩心上的生物钻孔宽度介于 0.5 ~ 2 cm, 大部分约 1 cm。把钻孔充填物和基质隔开的钻孔边界 (壁) 不规则, 与基质相比, 钻孔充填物为含较少颗粒和或生屑的灰色碳酸盐沉积物 (图 2)。在 *Thalassinoides* 孔内部通常还含有更小 (直径 0.2~0.3 cm) 色更暗的次一级钻孔, 次一级钻孔局部可直接伸到基质中, Kendall^[3] 将其称为二期虫孔。3-8-1-11W2 井取心段所有 *Thalassinoides* 钻孔均被白云岩化, 在铸体薄片上可看出, 钻孔白云岩的孔隙度小于基质白云岩的孔隙度。采自钻孔的 7 个 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (采用 PDB 标准, 下同) 介于 -5.9‰ ~ -7.8‰ 之间, 平均 -6.7‰; $\delta^{13}\text{C}$ 值则变化于 0.1‰ ~ 0.7‰ 之间, 平均 0.33‰ (图 5)。3 个样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于 0.708 4 与 0.708 8 之间, 平均 0.708 6 (图 6)。

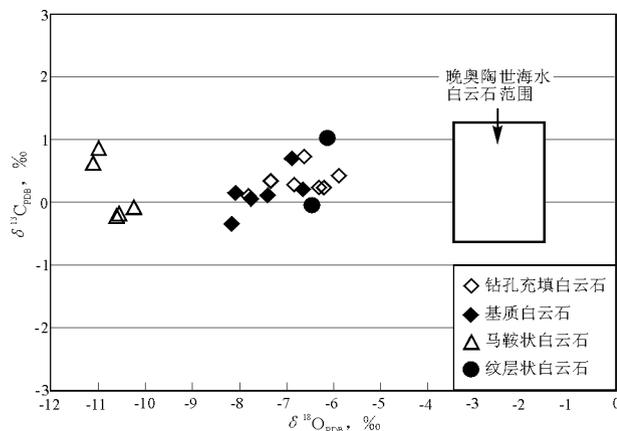


图 5 威林斯顿盆地红河群碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值交会图
Fig.5 Cross plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^{13}\text{C}$ values for Red River carbonates in the Williston Basin

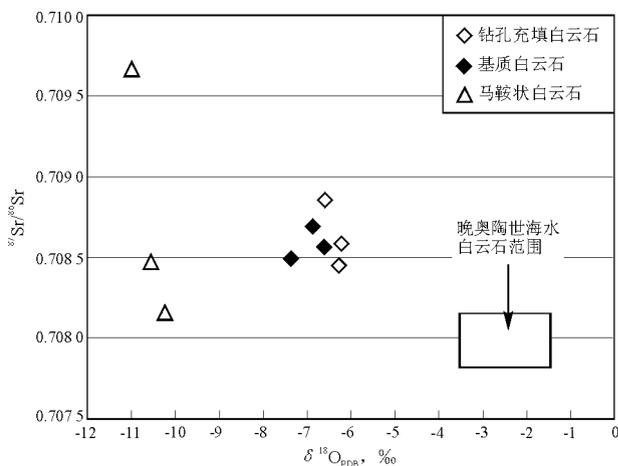


图 6 威林斯顿地红河群碳酸盐岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值交会图

Fig.6 Cross plot of $\delta^{18}\text{O}$ and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ for Red River carbonates in the Williston Basin

2.2 基质碳酸盐岩中交代白云石

Yeoman 组上部基质碳酸盐岩一般为浅褐色,明显浅于钻孔充填物的颜色。基质主要为生屑泥粒岩、粒泥岩,局部可变为颗粒岩或泥晶灰岩。与钻孔充填碳酸盐岩相比,基质部分通常含较多的生屑和较粗的颗粒。3-8-1-11W2 井取心段中上部的基质中局部有一点残余灰岩外,其余取心段均发生了白云岩化(图 2)。基质白云石的 7 个 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于 -6.6‰ ~ -8.1‰ 之间,平均 -7.4‰ ; $\delta^{13}\text{C}$ 值则介于 0.7‰ ~ 0.4‰ 之间,平均 0.16‰ (图 5)。3 个样品的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 $0.7085\sim 0.7087$,平均 0.7086 (图 6)。

2.3 马鞍状白云石胶结物

白色的马鞍状白云石胶结物见于溶孔和裂缝中,局部选择性沉淀在 *Thalassinoides* 生物钻孔充填物的溶孔中,或充填在示底构造的上部,示底构造下部充填为白云石砂屑,这些砂屑可能为埋藏环境下热液对局部基质的溶蚀所形成。溶孔中的马鞍状白云石呈不规则、或方形或矩形, $0.5\sim 1.5\text{ cm}$ (图 2A)。5 个样品的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值为 -10.2‰ ~ -11.1‰ ,平均 -10.7‰ ; 碳同位素 $\delta^{13}\text{C}$ 值 0.9‰ ~ -0.2‰ ,平均 0.2‰ (图 5); 3 个样品的锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值为 $0.7085\sim 0.7097$,平均 0.7088 (图 6)。

3 可能的流体来源

因为海水的氧、碳、锶同位素随着地质年代有一个长期缓慢的变化,所以在解释这些红河群白云岩同位素资料前建立一个晚奥陶世古海水的同位

素标志至关重要。

3.1 晚奥陶世海水同位素标志

红河群碳酸盐岩沉积于晚奥陶世伊登阶—里士满德阶的陆表海环境。根据对美国俄亥俄州梅斯维尔阶原始腕足壳的分析,从晚奥陶世海水中沉淀的海相方解石的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值分别介于 -6‰ ~ -4‰ 和 -1‰ ~ 1‰ [5]。Major[6]认为方解石和白云石的氧同位素分馏变化在 1.5‰ ~ 3.5‰ 之间。若取方解石和白云石的平均分馏值为 2.5‰ 的话,则从晚奥陶世正常海水中沉淀的白云石的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 值应介于 -3.5‰ ~ -1.5‰ 之间(图 5,6)。从硬石膏沉淀前的略咸化的海水中形成的白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值应略偏高 -1.5‰ 。对腕足壳、海相胶结物和牙形石的分析表明晚奥陶世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值应为 $0.7078\sim 0.7080$ [7]。因此从晚奥陶世正常海水中沉淀的白云石的锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值应为 $0.7078\sim 0.7080$ (图 6)。

3.2 *Thalassinoides* 钻孔充填物的白云石

白云岩化的 *Thalassinoides* 钻孔充填物氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 比估计的从晚奥陶世海水沉淀的白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低得多(图 6); 锶同位素 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值比估计的晚奥陶世海水高得多(图 6)。Kendal[3,8]的岩石学研究认为钻孔充填物的白云岩化是在上覆的 Lake Alma 硬石膏沉积期由蒸发盐水的回流渗滤作用形成,或由于高镁方解石的新生变形作用形成的。无论那一种情况,钻孔沉积物的白云岩化均应由较早的来自晚奥陶世海水的流体所形成,因而应具有晚奥陶世的海水特征。因此,低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值和高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比可解释为埋藏期的成岩流体对生物钻孔的改造或重构作用。

对于紧邻于 Lake Alma 硬石膏之下的纹层状微晶白云岩,也分析了 2 个氧碳同位素样品,该白云石与硬石膏在纹层状微晶结构和正常海水生物的突然减少方面的特征较接近,被认为是在硬石膏沉积前从咸水环境中同生作用形成的。纹层状白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ (-6.1‰ ~ -6.4‰) 类似于钻孔充填白云石,比晚奥陶世的正常海水或蒸发盐水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值 (-3.5‰ ~ -1.5‰) 低得多(图 5)。这说明与钻孔充填的白云岩化类似, Lake Alma 纹层状微晶白云石的同位素也在后期的成岩变化中发生了改造或重构作用。

3.3 基质白云石

基质的氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ (平均 -7.4‰) 比晚奥陶世海水的估计值低,但 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却比海水的估计值高得多(图 6); 基质白云石的 $\delta^{18}\text{O}$ 值也低于

采自同一样品的生物钻孔白云石(平均-6.7‰),但 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却与钻孔类似(图6)。基质白云石低的 $\delta^{18}\text{O}$ 可归因于较高温度的白云岩化作用。Kendall^[3,8]认为基质白云石的白云岩化流体来自中泥盆世盐岩沉积时的盐水。该盐岩之下的中泥盆世生物礁白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为0.708 0^[9],在中泥盆世海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值范围0.707 8~0.708 1之内。然而,红河群基质白云石的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值(0.708 5~0.708 7)高于中泥盆世海水的值。观察到的高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的红河群白云岩化流体可能有3种来源:1)渗流到红河群碳酸盐岩的志留纪海水(据 Veizer 等^[10], $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值介于0.708 5~0.708 8)。2)来自中奥陶世—寒武纪沉积物中的地层水,它由 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在0.708 5~0.709 0之间的中奥陶世—寒武纪海水^[10]改造而来。3)与结晶基底接触的海水,由于“热传递”他们作为一种热流体沿断层或裂缝体系向上运移^[11,12]。

关于白云岩化流体源的问题仍处在进一步的研究之中。

3.4 马鞍状白云石

马鞍状白云石的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值(-10.2‰~-11.1‰)和高的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比(0.708 5~0.709 7)(图5,6)指示了该区可能存在深部热液的影响。

4 结论

1)上奥陶统 Yeoman 组由不同阶段不同程度白云岩化的钻孔斑状泥粒灰岩、粒泥灰岩和泥晶碳酸盐岩组成,钻孔白云岩 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于估计的晚奥陶世正常海水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值;而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却远高于从晚奥陶世海水沉淀的白云石的比值。如果这些白云岩化早在晚奥陶海水作用下形成,则成岩流体一定在埋藏期对他们原始的同位素特征进行了改造或重构。

2)作为储层的基质白云石 $\delta^{18}\text{O}$ 值低于晚奥陶世海水的估计值, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却高于海水的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值。如果基质白云岩化发生在埋藏期,则比钻孔低的 $\delta^{18}\text{O}$ 值反映了其形成在较高温度条件下和较钻孔晚的时期。高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值却指示了白云岩化流体可能来自志留纪海水、或中奥陶世—寒武纪沉积物中的地层水或者与地幔对流有关的热流体。

3)马鞍状白云石的低 $\delta^{18}\text{O}$ 值和高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值说明该区可能发生过深部热液活动,但其含量很少,反映了内克拉通盆地稳定的大地构造环境。

致谢:感谢中国留学基金委、加拿大 NSERC (155012)基金、Nexen 石油公司、Regina 石油研究中心对本研究的资助和提供资料。

参考文献:

- 1 Kent D M. Geology of Ordovician Winnipeg and Red River rocks, southeast Saskatchewan[A]. In: unpublished notes for CSPG Short Course G-4, Depositional environments and reservoir potential of Lower and Middle Paleozoic rocks in Saskatchewan[G]. Calgary: Canadian Society of Petroleum Geologists, 1999.1~37
- 2 Longman M W, Haidl F M. Cyclic deposition and development of porous dolomites in the Upper Ordovician Red River Formation, Williston Basin[A]. In: Longman M W, Sonnenfeld M D, eds. Paleozoic Systems of the Rocky Mountain Region, Rocky Mount. Sec [G]. SEPM, 1996.29~46
- 3 Kendall A C. Origin of dolomite mottling in Ordovician limestones from Saskatchewan and Manitoba[J]. Bull Can Petrol Geol, 1977, 25:480~504
- 4 Kendall A C. The Ordovician carbonate succession (Bighorn Group) of southeastern Saskatchewan[R]. Sask Miner Resour Rep 180, 1976.185
- 5 Qing H, Veizer J. Oxygen and carbon isotopes of the Ordovician articulate brachiopods: implication for the isotopic composition of Ordovician seawater[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1994, 58: 4429~4442
- 6 Major R P, Lloyd R M, Lucia F J. Oxygen isotope composition of Holocene dolomite formed in a humid hypersaline setting[J]. Geology, 1992,20:586~588
- 7 Qing H, Barnes C R, Buhl D, et al. The Sr isotopic composition of Ordovician and Silurian brachiopods and conodonts: relationships to geological events and implications for coeval seawater[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1998,62(10): 1721~1733
- 8 Kendall A C. Origin and geometry of Red River dolomite reservoirs, western Williston Basin: Discussion[J]. AAPG Bulletin, 1984,68: 776~779
- 9 Mountjoy E, Qing H, McNutt R. Sr isotopic composition of Devonian dolomites, Western Canada Sedimentary Basin: significance as sources of dolomitizing fluids[J]. Applied Geochemistry, 1992,7: 57~75
- 10 Veizer J, Bruckschen P, Pawellek F, et al. Oxygen isotope evolution of Phanerozoic seawater[J]. Palaeogeogr, Palaeoclim, Palaeoecol, 1997,132:159~172
- 11 Aulstead K L, Spencer R J. Diagenesis of the Keg River Formation, northeastern Alberta: fluid inclusion evidence[J]. Bull Can Petrol Geol, 1985,33:167~183
- 12 Wendte J, Qing H, Dravis J J, et al. High-temperature saline (thermoflux) dolomitization of Devonian Swan Hills platform and bank carbonates, Wild River area, West-central Alberta[J]. Bull Canadian Petroleum Geology, 1998,46:210~265

(编辑 徐文明)