

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.460>



辽河盆地西部凹陷沙河街组砂岩碳酸盐胶结物特征

朱芳冰^{1,2}, 周红^{1,2}

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学构造与油气资源教育部重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 碳酸盐胶结物中氧碳同位素组成研究是分析成岩过程中流体-岩石相互作用的重要技术方法. 综合运用岩石学、矿物学和地球化学方法, 对辽河盆地西部凹陷沙河街组砂岩中碳酸盐胶结物的化学组成和碳酸盐胶结物及成岩流体同位素组成特征进行系统分析. 研究表明, 研究区碳酸盐岩主要为方解石和白云石, 胶结物主要类型为嵌晶式胶结、孔隙式胶结、斑块状胶结和星点状胶结. 碳、氧稳定同位素组成能有效地反映成岩-成矿流体及其他物质的来源, 碳酸盐胶结物与现今浅层地下水氧同位素组成差异巨大而与变质水同位素组成具有相似性, 反映了盆地演化过程中活动热流体对成岩作用的影响. 包裹体的氢、氧同位素组成可表征成矿溶液的演化特征, 砂岩碳酸盐胶结物包裹体更富集氢的轻同位素和氧的重同位素, 表明发生了明显的“氧-18 漂移”. 碳酸盐胶结的成矿溶液表现出“受热水”的同位素组成特征, 反映了深源活动热流体对成岩作用的影响.

关键词: 辽河盆地; 沙河街组; 碳酸盐胶结物; 同位素地球化学; 石油地质.

中图分类号: P618

文章编号: 1000-2383(2022)12-4724-07

收稿日期: 2021-11-01

Characteristics of Carbonate Cements in Sandstone of Shahejie Formation in Western Depression, Liaohe Basin

Zhu Fangbing^{1,2}, Zhou Hong^{1,2}

1. School of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Key Laboratory of Tectonics and Petroleum Resources, Ministry of Education, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The study of oxygen and carbon isotopic compositions of carbonate cements is an important technical method to analyze fluid-rock interaction during diagenesis. By means of petrology, mineralogy and geochemistry, the chemical composition and isotopic composition of carbonate cements and diagenetic fluids in sandstones of Shahejie Formation in western depression of Liaohe basin are systematically analyzed. The results show that the carbonate rocks in the study area are mainly calcite and dolomite, and the main types of cementation are inlaid cementation, pore cementation, patchy cementation and star-point cementation. The stable isotopic composition of carbon and oxygen can effectively reflect the origin of diagenetic and ore-forming fluids and other materials. The oxygen isotopic composition of carbonate cements is very different from that of shallow groundwater but similar to that of metamorphic water, which reflects the influence of active thermal fluid on diagenesis during basin evolution. The hydrogen and oxygen isotopic compositions of the inclusions can represent the evolution characteristics of the ore-forming solutions. The inclusions of the sandstone carbonate cements are enriched with light isotopes of hydrogen and heavy

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(No.41690130).

作者简介: 朱芳冰(1966-), 女, 副教授, 主要从事石油地质与油藏工程的教学与科研工作. ORCID: 0000-0002-7707-7159. E-mail: zhufb66@163.com

引用格式: 朱芳冰, 周红, 2022. 辽河盆地西部凹陷沙河街组砂岩碳酸盐胶结物特征. 地球科学, 47(12): 4724-4730.

Citation: Zhu Fangbing, Zhou Hong, 2022. Characteristics of Carbonate Cements in Sandstone of Shahejie Formation in Western Depression, Liaohe Basin. *Earth Science*, 47(12): 4724-4730.

isotopes of oxygen, indicating the obvious "oxygen-18 drift". The carbonate cemented ore-forming solution shows the isotopic composition of "heated rain", which reflects the influence of deep active thermal fluid on diagenesis.

Key words: Liaohe basin; Shahejie Formation; carbonate cement; isotopic geochemistry; petroleum geology.

1 地质背景

辽河盆地位于辽宁省南部下辽河地区.在大地构造上,辽河盆地处于华北板块的东北部.盆地基底岩性复杂,包括太古界、元古界和中生界.主要岩性包括混合花岗岩、混合岩、变粒岩、片麻岩及斜长角闪岩等.根据第三系底面起伏、主要断裂构造特征及盆地沉降—沉积特点,将辽河盆地划分为7个次级构造单元:沈北凹陷、大民屯凹陷、西部凸起、西部凹陷、中央凸起、东部凹陷和东部凸起(图1).

砂岩的成岩作用是在一定的水化学条件下进行的,因此,砂岩成岩作用特别是胶结物的类型及其沉淀时的流体构成分析是地层水化学场演化研究的有效手段.为了研究流体活动史、揭示地层水化学组成对油气组成和性质的影响,作者选取欢喜岭上台阶沙河街组砂砾岩中碳酸盐胶结物进行成岩作用和流体历史分析.

欢喜岭上台阶砂岩的骨架颗粒组成变化不大,以长石砂岩和岩屑长石砂岩为主.砂岩的孔隙度变化较大,受埋藏深度的明显控制.砂岩的渗透率变化明显,与孔隙度呈正相关关系.其砂岩中碳酸盐胶结物发育,储层成岩作用研究重要内容之一是对碳酸盐矿物的评价(曾濞辉等,2008;孙致学等,2010).碳酸盐胶结物具有分布广、形成期次多和成因多样等特点(Carlos *et al.*,2001;孙国强等,2012;刘四兵等,2014).根据研究区地质特点,作者对研究

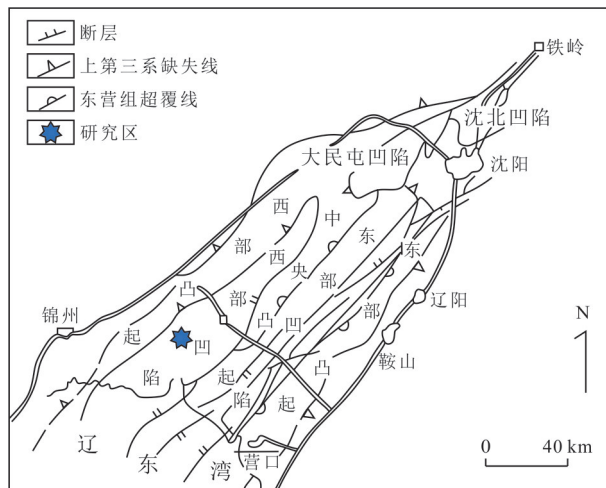


图1 辽河盆地构造分区图

Fig.1 Regional location map of Liaohe basin

区沙河街组砂岩中碳酸盐胶结物的化学组成和成岩流体的同位素组成特征的分析,研究储层的成岩作用.

2 碳酸盐胶结物的化学组成

碳酸盐是辽河盆地欢喜岭上台阶砂岩的重要胶结物类型,对储层的物性具有明显的控制作用(图2).

通过对部分样品进行电子探针分析研究碳酸盐胶结物的化学构成及成岩史(尤丽等,2012;谭先

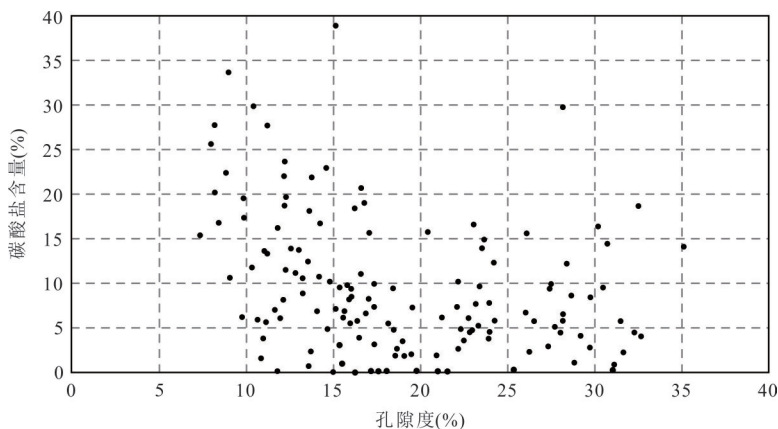


图2 辽河盆地欢喜岭上台阶砂岩中碳酸盐含量与孔隙度的关系

Fig.2 Relationship between carbonate content and porosity in Huanxiling area, Liaohe basin

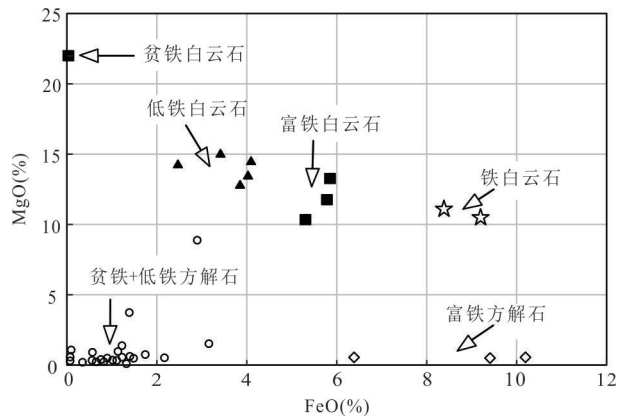


图3 辽河盆地欢喜岭上台阶砂岩主要碳酸盐胶结物类型
Fig.3 The main types of carbonate cements in the upper bench sandstones of Huanxiling, Liaohe basin

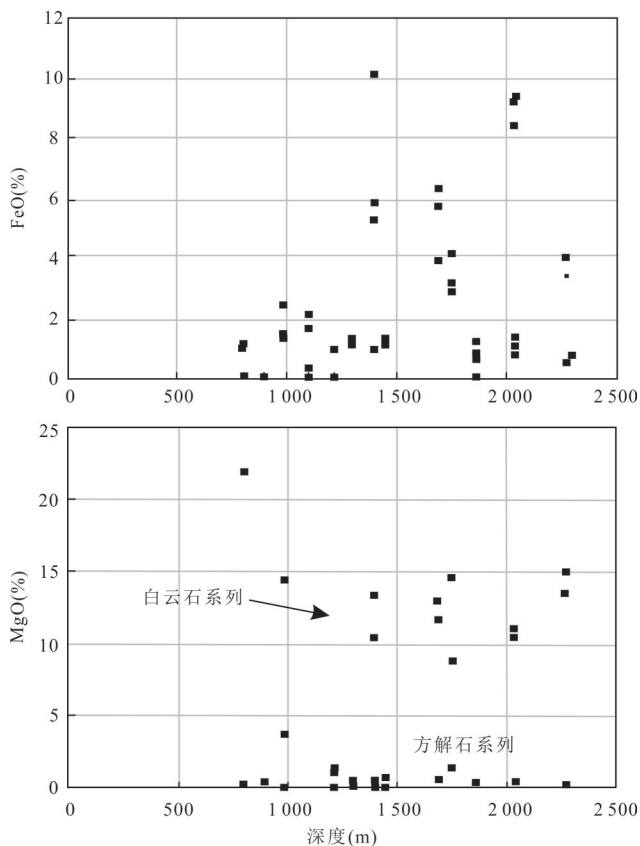


图4 辽河盆地欢喜岭上台阶砂岩碳酸盐胶结物中FeO和MgO含量随深度的变化

Fig.4 Variation of FeO and MgO contents in carbonate cements of Huanxiling upper bench sandstone with depth in Liaohe basin

锋等, 2015), 综合铸体染色、电子探针、阴极发光等分析, 确认本区碳酸盐岩主要为方解石和白云石。按含铁量进一步划分为贫铁方解石、低铁方解石、贫铁白云石、富铁白云石和铁白云石(图3), 在染色

铸体片中还发现极少量的方解石。随深度增大, Fe离子含量呈逐渐增大之势, 而Mg离子含量变化不明显(图4)。上述胶结物表现出4种胶结类型:(1)嵌晶式胶结, 颗粒呈点接触或漂浮状, 粒间孔隙完全被方解石或白云石充填。胶结物含量一般大于20%, 高者达40%以上, 矿物类型以贫铁方解石、贫铁白云石为主;(2)孔隙式胶结, 颗粒间以点—线接触为主, 胶结物的含量为15%~20%, 矿物类型以低铁方解石、贫铁白云石为主;(3)斑块状胶结, 碳酸盐矿物发生局部的胶结、交代, 其含量小于10%。这类胶结物多为低铁方解石、富铁白云石, 虽然其含量不高, 但分布广泛, 是研究区砂岩中常见的胶结类型;(4)星点状胶结, 胶结物为富铁方解石和铁白云石, 含量一般低于5%, 这类胶结类型仅局部可见。贫铁方解石的氧化铁含量小于0.5%, 染色结果为鲜红色, 阴极发光色为黄色, 电子探针证实分子式为CaCO₃, 含少量的Mn²⁺及微量的Fe²⁺、Mg²⁺离子。该类方解石一般含量较高, 呈泥晶、粉晶状, 局部富集有机质斑块或条带; 几乎充填所有的粒间孔隙, 高者达40%以上。在上述钙质胶结砂岩中, 碎屑颗粒具港湾状边缘, 局部可见方解石交代长石残余。

3 碳酸盐胶结物及成岩流体的同位素组成特征

同位素地球化学在地质研究领域可用于地质过程物理化学条件和环境分析、地质年代的测定以及地球化学示踪(邓声保, 2016)。

砂岩中胶结物的碳、氧稳定同位素组成能够有效地反映成岩—成矿流体及其他物质的来源。不同的成岩环境其碳酸盐氧碳同位素组成具有差异明显, 因而碳酸盐胶结物中氧碳同位素组成可以反映胶结物形成时的地球化学环境和物质来源等信息, 有助于阐明成岩过程中流体—岩石相互作用机制和孔隙流体演化等基本地质问题(Macaulay and Haszel, *et al.*, 1993; Morad *et al.*, 1998; Mostafa *et al.*, 2001; 王琪等, 2010; 姚泾利等, 2011)。

表1为辽河盆地欢喜岭上台阶沙河街组砂岩碳酸盐胶结物的碳、氧同位素组成。从表1中可以看出, 该区砂岩碳酸盐胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值介于11.61‰~28.37‰, $\delta^{13}\text{C}$ 值介于-5.313‰~16.08‰。

不同来源的碳酸盐具有不同的同位素组成。图5和图6是西部凹陷欢喜岭上台阶沙三段砂岩碳酸

表 1 欢喜岭上台阶沙河街组砂岩中碳酸盐胶结物的碳氢同位素组成

Table 1 Hydrocarbon isotopic compositions of carbonate cements in sandstones of Shahejie Formation, Huanxiling upper bench

井号	深度(m)	层位	岩性	$\delta^{18}\text{O}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)
H127	1 090.62	S ₃	粉砂岩	28.37	4.818
Q5	1 442.90	S ₄	平行层理砂岩	13.92	8.872
Q91	1 207.69	S ₁₊₂	蜂窝状砂岩	22.13	0.429
Q5	1 395.13	S ₄	平行层理砂岩	15.65	12.309
HG3	797.85	S ₁₊₂	粉砂岩	17.94	10.538
Q214	890.23	S ₃	生物碎屑砂岩	19.24	-0.355
Q91	1 748.79	S ₄	粉砂岩	22.35	0.298
D150	980.37	S ₁₊₂	粗砂岩	21.69	16.077
Q18	2 032.99	S ₄	细砂岩	11.61	7.046
Q80	2 269.13	S ₄	块状中砂岩	13.84	-5.313
Q91	1 686.50	S ₄	块状砂砾岩	17.17	10.647
D150	1 858.83	S ₄	水平纹理粉砂岩	15.07	1.701
Q91	1 210.75	S ₁₊₂	块状中砂岩	21.37	1.981
D150	1 859.08	S ₄	中砂岩	14.37	4.742

盐胶结物的同位素分布与自然界常见含氧、含碳物质的比较.从同位素的组成及其变化范围来看,碳酸盐胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值与变质岩和变质水的同位素组成相似(图 5), $\delta^{13}\text{C}$ 值与热液碳酸盐具有相对较好的相似性(图 6).尽管由于碳酸盐沉淀过程中较为

复杂的同位素分馏作用,其同位素组成与发生沉淀的溶液具有较大的差别,但碳酸盐胶结物与现今浅层地下水氧同位素组成的巨大差异与变质水同位素组成的相似性反映了盆地演化过程中活动热流体对成岩作用的影响.

成矿溶液本身(包裹体)的氢、氧同位素组成(表 2)可以反映成矿溶液的演化特征.由于包裹体中的氧同位素可与周围含氧矿物进行同位素交换,因此包裹体中的氧同位素组成并不代表成矿溶液的原始同位素组成.为了更好地揭示成矿溶液的同位素组成,采用同位素平衡温度计算法,通过测试碳酸盐岩的氧同位素,应用经验公式计算碳酸盐岩形成温度.利用方解石中的氧同位素组成推算包裹体的原始同位素组成.即根据原生盐水包裹体的均一温度和碳酸盐岩的氧同位素,计算形成时的流体氧同位素.同时由于方解石中的氢含量比水中的氢含量低得多,同位素交换对包裹体水的氢同位素组成影响很小,因此我们直接测量了包裹体中水的氢同位素(表 2).

西部凹陷地层水 δD 的值为 $-57\text{‰}\sim-71\text{‰}$, $\delta^{18}\text{O}$ 值为 $-9.9\text{‰}\sim-1.1\text{‰}$,地层水的同位素组成受样品深度控制,深度小于 1 500 m 的地层水分布于 Graigh 降水线附近,反映了浅部地层水受地表水的影响;较深处地层水的同位素组成发生氧-18 漂移,如锦 288 井沙一段的深度 1 358.2~1 385.1 m 的

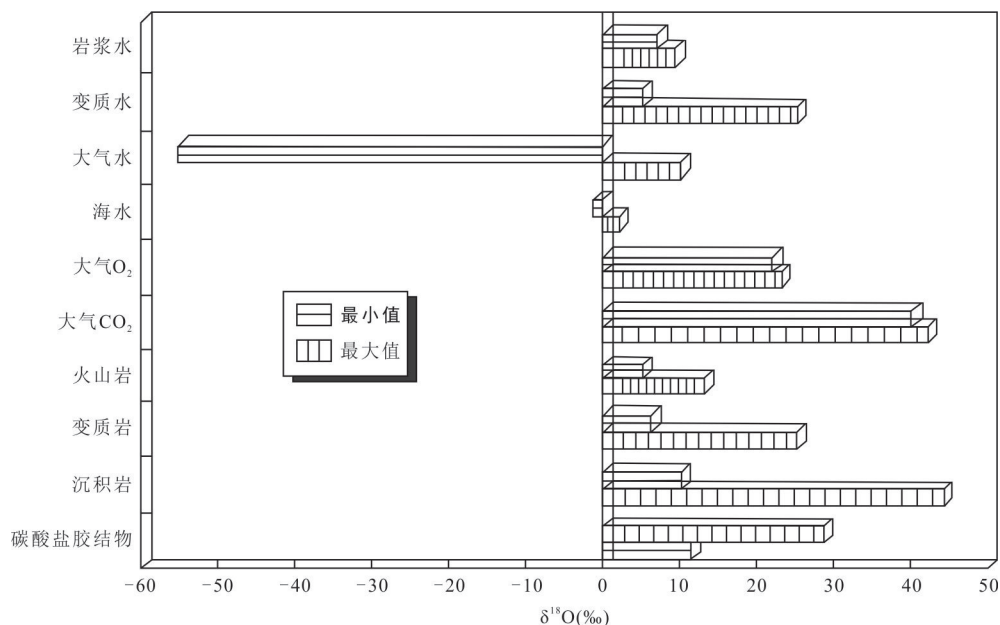


图 5 辽河盆地欢喜岭上台阶砂岩中碳酸盐胶结物与天然含氧物质的 $\delta^{18}\text{O}$ 值的对比

Fig.5 Comparison of $\delta^{18}\text{O}$ values between carbonate cements and natural oxygen-bearing materials in the upper bench sandstone of Huanxiling, Liaohe basin

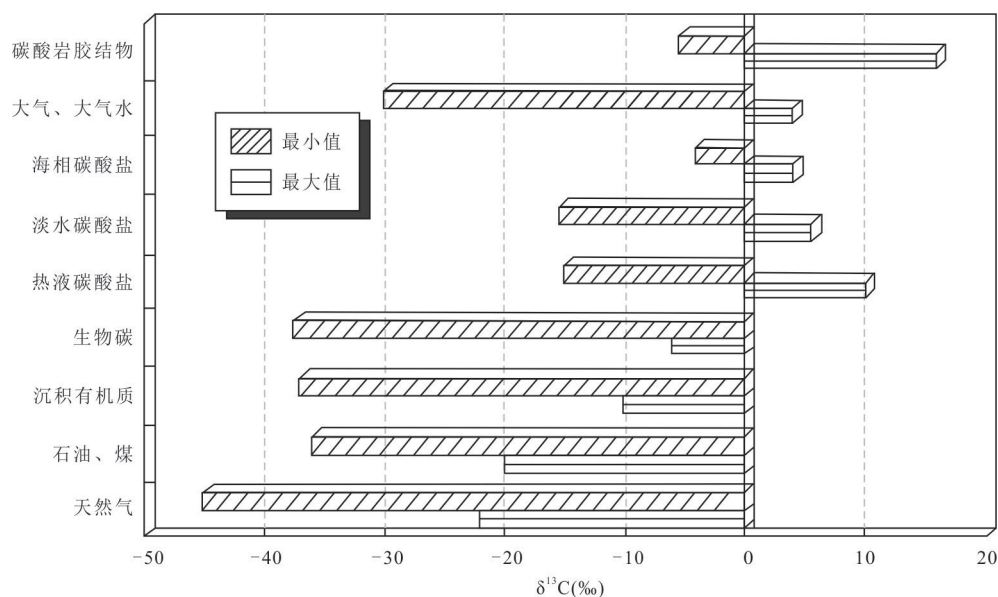


图 6 辽河盆地欢喜岭上台阶砂岩中碳酸盐胶结物与天然含氧物质的 $\delta^{13}\text{C}$ 值的对比

Fig.6 Comparison of $\delta^{13}\text{C}$ values between carbonate cements and natural oxygen-bearing materials in the upper bench sandstone of Huanxingling, Liaohé basin

表 2 欢喜岭上台阶沙河街组砂岩中方解石沉淀时成矿热液的氢、氧同位素组成

Table 2 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of ore-forming hydrothermal fluids during calcite precipitation in sandstones of Shahejie Formation in the upper step of Huanxingling

井号	深度(m)	层位	胶结物	$\delta^{18}\text{O}_{\text{CaCO}_3}$ *	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ **	$\delta^{16}\text{D}_{\text{H}_2\text{O}}$
				(‰)	(‰)	(‰)
H127	1 090.62	S ₃	贫铁方解石	23.87	8.87	-122.7
Q5	1 442.90	S ₄	低铁方解石	13.92	0.92	-71.7
Q91	1 207.69	S ₁₊₂	低铁方解石	22.13	7.63	-154.7
Q5	1 395.13	S ₄	低铁方解石	15.65	1.15	-166.3
HG3	797.85	S ₁₊₂	低铁方解石	17.94	3.54	120.7
Q214	890.23	S ₃	贫铁方解石	19.24	4.24	-99.4
Q18	2 032.99	S ₄	低铁方解石	11.61	8.61	-109.8
Q80	2 269.13	S ₄	低铁方解石	13.84	0.84	-65.2
Q91	1 686.50	S ₄	低铁方解石	17.19	4.19	-163.2
D150	1 858.83	S ₄	低铁方解石	15.07	2.07	-75.3
Q91	1 210.75	S ₁₊₂	低铁方解石	21.37	6.87	-134.9
D150	1 859.08	S ₄	低铁方解石	14.37	1.37	-100.1

注: *相当国际标准 SMOW 之值, **包裹体的 $\delta^{18}\text{O}$ 值通过同位素平衡温度计算求得。

$\delta^{18}\text{O}$ 为 -8.8‰ , 而双 91 井沙一段 3 313.8~3 437.8 m 的 $\delta^{18}\text{O}$ 为 -1.1‰ , 表明漂移程度与深度相关。与辽河盆地西部凹陷地层水相比, 砂岩碳酸盐胶结物包

裹体更富集氢的轻同位素 (δD 更小) 和氧的重同位素 ($\delta^{18}\text{O}$ 值更大), 即与地层水相比 (朱芳冰等, 2015), 发生了更明显的“氧-18 漂移”。图 7 为欢喜岭上台阶砂岩中碳酸盐胶结物包裹体的氢氧同位素组成及其与不同来源水同位素组成的比较, 从图 6 中可以看出碳酸盐胶结的成矿溶液多表现出“受热水”的同位素组成特征, 反映了深源活动热流体对成岩作用的影响。

4 结论

综合运用矿物学、岩石学和地球化学方法, 特别是碳酸盐胶结物中氧碳同位素地球化学示踪, 对辽河盆地西部凹陷沙河街组砂岩中碳酸盐胶结物特征系统研究, 探讨成岩过程中流体-岩石相互作用, 研究表明:

(1) 研究区碳酸盐岩主要为方解石和白云石, 胶结物主要类型为嵌晶式胶结、孔隙式胶结、斑块状胶结和星点状胶结。

(2) 碳、氧稳定同位素组成能够有效地反映成岩一成矿流体及其他物质的来源, 碳酸盐胶结物与现今浅层地下水氧同位素组成的巨大差异而与变质水同位素组成的相似性反映了盆地演化过程中活动热流体对成岩作用的影响。

(3) 成矿溶液本身(包裹体)的氢、氧同位素组成可以反映成矿溶液的演化特征, 砂岩碳酸盐胶结

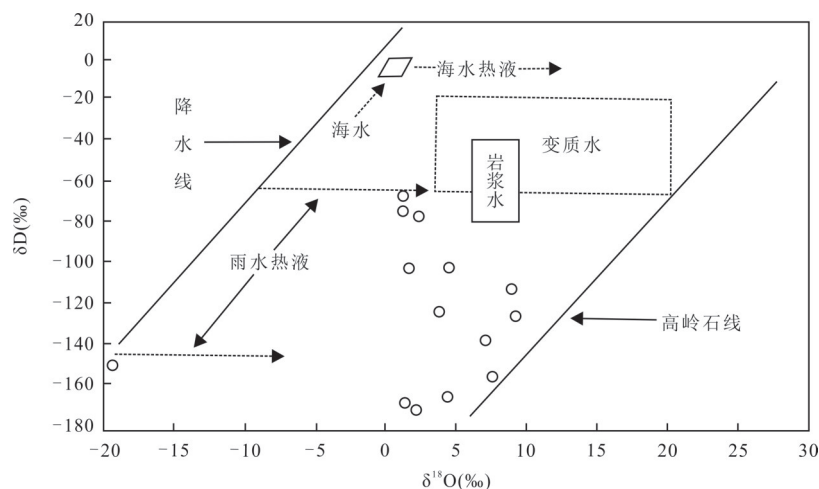


图7 欢喜岭上台阶砂岩中碳酸盐胶结物包裹体的氢氧同位素组成及其与不同来源水同位素组成的比较(底图据 Sheppard, 1977)

Fig.7 Hydrogen and oxygen isotopic compositions of carbonate cement inclusions in sandstones from Huanxingling upper bench and their comparison with water isotopic compositions from different sources (modified Sheppard, 1977)

物包裹体更富集氢的轻同位素(δD 更小)和氧的重同位素($\delta^{18}O$ 值更大),表明发生了更明显的“氧—18 漂移”.碳酸盐胶结的成矿溶液多表现出“受热雨水”的同位素组成特征,反映了深源活动热流体对成岩作用的影响.

References

- Carlos, R., Rafaela, M., Karl, R., et al., 2001. Facies-Related Diagenesis and Multiphase Siderite Cementation and Dissolution in the Reservoir Sandstones of the Khatatba Formation, Egypt's Western Desert. *Journal of Sedimentary Research*, 71(3):459–472. <https://doi.org/10.1306/d4268d38-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Deng, S.B., 2016. Application of H and O Isotopes in Isotopic Geochemistry. *West-China Exploration Engineering*, 28(10):145–147(in Chinese with English abstract).
- Liu, S. B., Huang, S. J., Shen, Z. M., et al., 2014. Diagenetic Fluid Evolution and Water-Rock Interaction Model of Carbonate Cements in Sandstone: An Example from the Reservoir Sandstone of the Fourth Member of the Xujiahe Formation of the Xiaoquan-Fenggu Area, Sichuan Province, China. *Science China: Earth Sciences*, 44(7): 1403–1417(in Chinese).
- Macaulay, C. I., Haszel, R. S., 1993. Distribution, Chemistry, Isotopic Composition and Origin of Diagenetic Carbonates: Magnus Sandstone, North Sea. *SEPM Journal of Sedimentary Research*, 63: 33–43. <https://doi.org/10.1306/d4267a82-2b26-11d7-8648000102c1865d>
- Morad, S., de Ros, L.F., Nystuen, J.P., et al., 1998. Carbonate Diagenesis and Porosity Evolution in Sheet-Flood Sandstones: Evidence from the Middle and Lower Lunde Members (Triassic) in the Snorre Field, Norwegian North Sea. *Carbonate Cementation in Sandstones*. Blackwell Publishing Ltd., Oxford, UK, 53–85. <https://doi.org/10.1002/9781444304893.ch3>
- Mostafa, F., Harrison, T.M., Grove, M., 2001. In Situ Stable Isotopic Evidence for Protracted and Complex Carbonate Cementation in a Petroleum Reservoir, North Coles Levee, San Joaquin Basin, California, USA. *Journal of Sedimentary Research*, 71(3):444–458. <https://doi.org/10.1306/2dc40954-0e47-11d7-8643000102c1865d>
- Sheppard, S.M.F., 1977. Identification of the Origin of Ore-Forming Solutions by the Use of Stable Isotopes. *Geological Society, London, Special Publications*, 7(1):25–41. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1977.007.01.04>
- Sun, G.Q., Ma, J.Y., Wang, H.F., et al., 2012. Characteristics and Significances of Carbonate Cements in Northern Mahai Region, Northern Margin of Qaidam Basin. *Petroleum Geology & Experiment*, 34(2): 134–139(in Chinese with English abstract).
- Sun, Z.X., Sun, Z.L., Lu, H.J., et al., 2010. Characteristics of Carbonate Cements in Sandstone Reservoirs: A Case from Yanchang Formation, Middle and Southern Ordos Basin, China. *Petroleum Exploration and Development*, 37(5):543–551 (in Chinese with English abstract).
- Tan, X.F., Huang, J.H., Li, J., et al., 2015. Origin of Carbon-

- ate Cements and the Transformation of the Reservoir in Sandstone under the Deep Burial Condition: A Case Study on Eocene Kongdian Formation in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin. *Geological Review*, 61(5):1107—1120(in Chinese with English abstract).
- Wang, Q., Hao, L.W., Chen, G.J., et al., 2010. Forming Mechanism of Carbonate Cements in Siliciclastic Sandstone of Zhuhai Formation in Baiyun Sag. *Acta Petrolei Sinica*, 31(4):553—558, 565(in Chinese with English abstract).
- Yao, J.L., Wang, Q., Zhang, R., et al., 2011. Origin and Spatial Distribution of Carbonate Cements in Yanchang Fm. (Triassic) Sandstones within the Lacustrine Center of Ordos Basin, NW China. *Natural Gas Geoscience*, 22(6): 943—950 (in Chinese with English abstract)
- You, L., Li, C., Zhang, Y.Z., et al., 2012. Distribution and Genetic Mechanism of Carbonate Cements in the Zhuhai Formation Reservoirs in Wenchang: A Sag, Pear River Mouth Basin. *Oil & Gas Geology*, 33(6):883—889, 899 (in Chinese with English abstract).
- Zeng, J.H., Wu, Q., Yang, H.J., et al., 2008. Chemical Characteristics of Formation Water in Tazhong Area of the Tarim Basin and Their Petroleum Geological Significance. *Oil & Gas Geology*, 29(2):223—229 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, F.B., Zhou, H., Liu, R., 2015. Geochemical Characteristics and Origin of Formation Water in Western Depression, Liaohe Basin. *Earth Science*, 40(11):1870—1875(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 邓声保, 2016. 同位素地球化学中 H、O 同位素应用的探讨. 西部探矿工程, 28(10):145—147.
- 刘四兵, 黄思静, 沈忠民, 等, 2014. 砂岩中碳酸盐胶结物成岩流体演化和水岩作用模式: 以川西孝泉—丰谷地区上三叠统须四段致密砂岩为例. 中国科学: 地球科学, 44(7): 1403—1417.
- 孙国强, 马进业, 王海峰, 等, 2012. 柴达木盆地北缘马北地区碳酸盐胶结物特征及意义. 石油实验地质, 34(2): 134—139.
- 孙致学, 孙治雷, 鲁洪江, 等, 2010. 砂岩储集层中碳酸盐胶结物特征: 以鄂尔多斯盆地中南部延长组为例. 石油勘探与开发, 37(5):543—551.
- 谭先锋, 黄建红, 李洁, 等, 2015. 深部埋藏条件下砂岩中碳酸盐胶结物的成因及储层改造: 以济阳坳陷始新统孔店组为例. 地质论评, 61(5):1107—1120.
- 王琪, 郝乐伟, 陈国俊, 等, 2010. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理. 石油学报, 31(4):553—558, 565.
- 姚泾利, 王琪, 张瑞, 等, 2011. 鄂尔多斯盆地中部延长组砂岩中碳酸盐胶结物成因与分布规律研究. 天然气地球科学, 22(6):943—950.
- 尤丽, 李才, 张迎朝, 等, 2012. 珠江口盆地文昌 A 凹陷珠海组储层碳酸盐胶结物分布规律及成因机制. 石油与天然气地质, 33(6):883—889, 899.
- 曾溅辉, 吴琼, 杨海军, 等, 2008. 塔里木盆地塔中地区地层水化学特征及其石油地质意义. 石油与天然气地质, 29(2):223—229.
- 朱芳冰, 周红, 刘睿, 2015. 辽河盆地西部凹陷稠油分布区地层水化学特征. 地球科学, 40(11):1870—1875.