

文章编号:1001-6112(2012)02-0134-06

柴达木盆地北缘马北地区碳酸盐胶结物特征及意义

孙国强¹, 马进业², 王海峰², 陈吉^{1,3}, 张永庶², 贾艳艳^{1,3}, 张生银^{1,3}, 史基安¹

(1. 中国科学院油气资源研究重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国石油青海油田公司勘探开发研究院, 甘肃 敦煌 736202; 3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:综合运用岩石学、矿物学和地球化学等方法,对柴达木盆地北缘西段马海凸起北部下干柴沟组下段砂岩储层中碳酸盐胶结物的形成环境和物质来源进行了系统研究。结果表明,该区下干柴沟组下段砂岩储层中存在2种方解石胶结物类型,即它形泥晶方解石胶结物和半自形微晶方解石胶结物;其碳同位素值分布范围在 $-7.1‰ \sim -3.3‰$,平均为 $-4.9‰$;氧同位素值分布范围在 $-11.3‰ \sim -9.6‰$,平均为 $-10.3‰$;古盐度Z值分布范围为107.0~115.6,平均为112.1。说明研究区储层砂岩中方解石胶结物的形成与早成岩阶段的有机质脱羧基作用有关,有少量有机碳的加入,成岩流体主要是来自碎屑和大气中的淋滤淡水。

关键词:氧同位素;碳同位素;碳酸盐胶结物;下干柴沟组;马海凸起;柴达木盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Characteristics and significances of carbonate cements in northern Mahai region, northern margin of Qaidam Basin

Sun Guoqiang¹, Ma Jinye², Wang Haifeng², Chen Ji^{1,3},
Zhang Yongshu², Jia Yanyan^{1,3}, Zhang Shengyin^{1,3}, Shi Ji'an¹

(1. Key Laboratory of Petroleum Resources Research, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Exploratory Development Institute of Qinghai Petroleum Administration, PetroChina, Dunhuang, Gansu 736202, China; 3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Based on lithology, mineralogy and geochemistry, the generation environment and source for carbonate cements in sandstone reservoirs in the lower position of the Paleogene Lower Ganchaigou Formation in the north of the Mahai Uplift which located in the northern margin of the Qaidam Basin were studied systematically. Two types of calcite cements were found, including xenomorphic micrite and hypidiotopic microcrystalline. Their carbon isotope values ($\delta^{13}\text{C}$) ranged from $-7.1‰$ to $-3.3‰$ with the average of $-4.9‰$, and the oxygen isotope values ($\delta^{18}\text{O}$) ranged from $-11.3‰$ to $-9.6‰$ with the average of $-10.3‰$. The Z-values of paleosalinity ranged from 107.0 to 115.6 and the average value was 112.1. The generation of carbonate cements in sandstone reservoirs in the study area might be related to the decarboxylation of organic matters during the early diagenetic stage. A little organic carbon also participated in the reaction. Diagenetic fluids mainly came from clast and atmospheric freshwater.

Key words: carbon isotope; oxygen isotope; carbonate cement; Lower Ganchaigou Formation; Mahai Uplift; Qaidam Basin

碳酸盐胶结物是一种广泛分布于碎屑岩中的成岩产物,在我国和世界上不同类型沉积盆地的碎屑岩沉积序列中屡见不鲜^[1-6],其碳氧同位素组成可以指示成岩流体中碳的来源^[7-8],估算其沉淀时的温度^[9]等。因此碳酸盐胶结物中碳氧同位素组成可为判断其形成时的地球化学环境特征和物质来源提供重要信息^[10-15]。

研究区位于柴达木盆地北缘西段的马海凸起北部(以下简称马北地区),北面以马仙断裂与赛昆断陷相邻,西面以陵间断裂与一里坪拗陷相邻(图1)。从沉积环境来看,研究区在古近纪早期(下干柴沟组下段沉积时期)属于辫状河沉积体系,下干柴沟组下段发育大套辫状河河流相的心滩和边滩砂体,形成大面积的储集岩系^[16-18]。

收稿日期:2011-06-29;修订日期:2012-02-07。

作者简介:孙国强(1977—),男,博士,从事含油气盆地石油地质学及沉积储层研究。E-mail:sguoqiang@lzb.ac.cn。

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2011CB201104)和中国科学院油气资源研究重点实验室开放基金(KFJJ2012-05)资助。

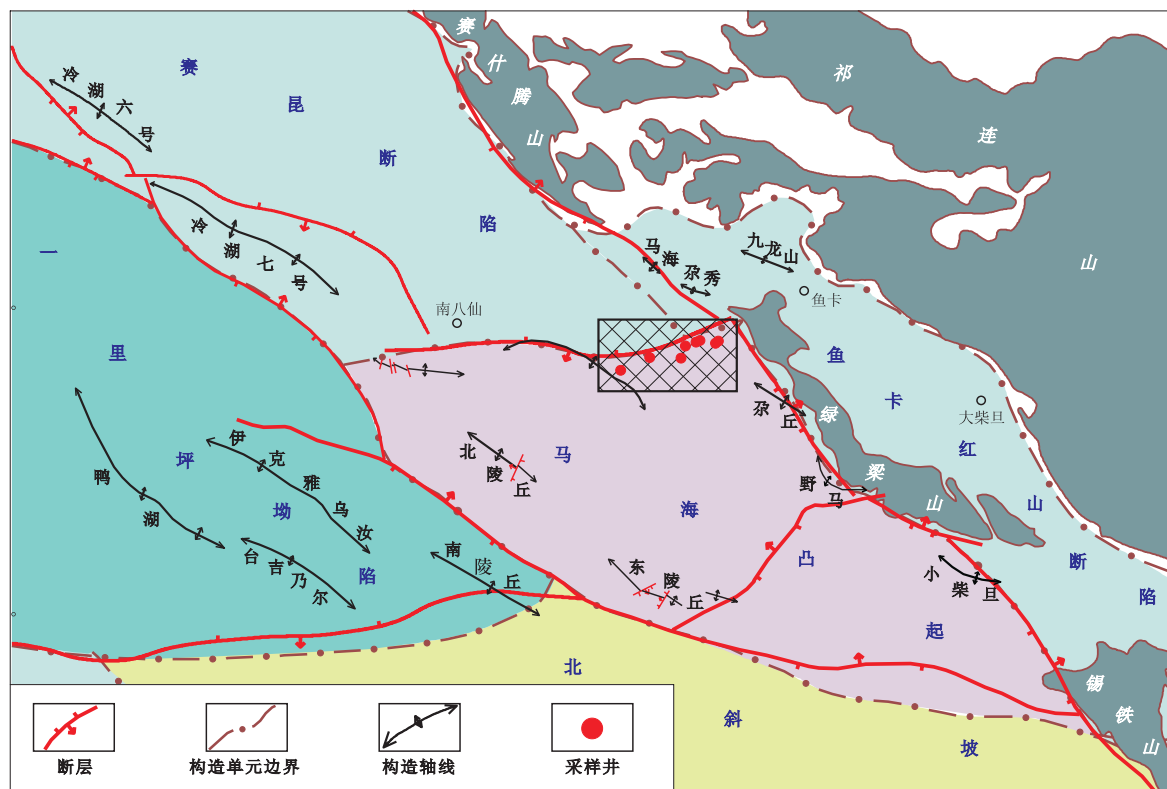


图1 柴达木盆地北缘断块带构造特征

Fig. 1 Structural features of fault blocks in northern margin of Qaidam Basin

1 样品与实验

青海油田近些年在马海地区的油气勘探取得重要突破,马北1井和马北3井在古近系砂岩中均获得商业油气流^[19]。因此本项研究主要采集研究区钻井岩心中古近系下干柴沟组下段的砂岩。采样前对砂岩岩心的原始沉积构造和含油性进行了仔细的观察和描述,同时用1%的稀盐酸溶液滴试样品,根据气泡的剧烈程度来初步确定砂岩中的碳酸盐胶结物含量和主要成分。通常情况下以方解石胶结为主的砂岩反应剧烈,气泡丰富^[14]。在此基础上,对砂岩样品进行了扫描电镜分析及电子探针X射线显微分析,以确定选择含单一碳酸盐胶结物的砂岩样品来分析碳氧同位素组成^[20]。

样品中碳酸盐胶结物主要为方解石和铁方解石。首先将样品粉碎至小于100目的粉末,分析方法主要采用Al-Aasm等(1990)的选择性酸抽提法,即在常温下(25℃)与磷酸充分反应4h收集提纯CO₂气体。同位素分析利用Finnigan MAT252型稳定同位素质谱仪,同位素比值以PDB标准的δ千分率偏差给出。重复实验采用实验室内部标准完成,氧碳同位素分析精度0.02‰。上述分析测试工作均在中国科学院气体地球化学重点实验室完成。

2 结果与讨论

2.1 碳酸盐胶结物类型

马北地区下干柴沟组下段发育有大量河流相沉积(包括河床、心滩和边滩等)的砂岩,这些砂岩中常含有丰富的碳酸盐类胶结物。由于形成于不同的成岩时期,其胶结物的类型和特征也各不相同。通过岩石和矿物学观察,发现样品中主要存在2种方解石胶结物类型,即它形泥晶方解石和半自形微晶方解石(图2)。

它形泥晶方解石胶结物主要充填于砂岩颗粒周围及粒间孔隙中或粒间孔隙边缘。该类方解石形成于早成岩阶段早期,从富含钙离子的孔隙水中沉淀而成。由于其形成时间早,可使储集砂岩固结程度增强,有效抵御压实作用对储层物性的破坏,而且其结晶程度低,成岩中晚期较易发生溶蚀或蚀变。

半自形微晶方解石胶结物则主要充填于砂岩残余粒间孔隙中。该类方解石形成时间稍晚,主要形成于早成岩阶段晚期或中成岩阶段早期,这时成岩温度相对较高,孔隙水流动速度较慢,因此形成的方解石胶结物结晶程度往往较好,以半自形微晶或粉晶为主,大量发育对储层的物性影响较大。

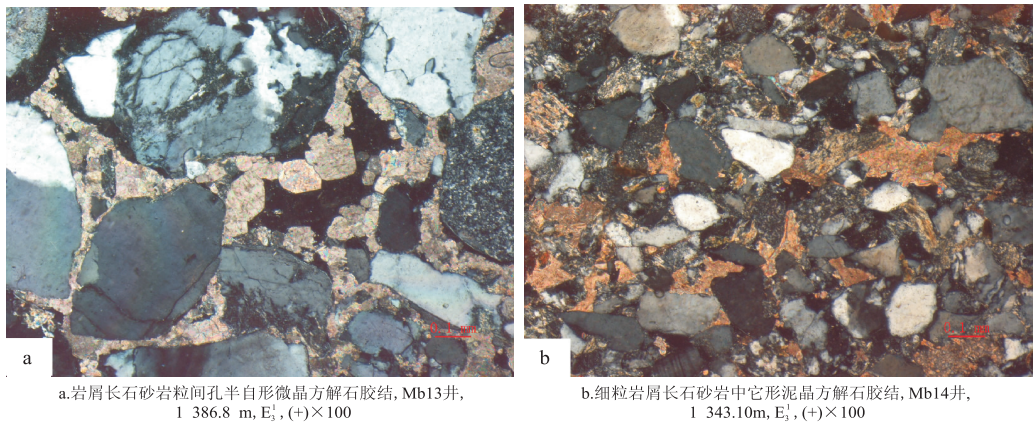


图2 柴达木盆地马北地区下干柴沟组下段碳酸盐胶结物特征

Fig.2 Characteristics of carbonate cements in lower position of Paleogene Lower Ganchaigou Formation, north of Mahai Uplift, Qaidam Basin

2.2 粘土矿物特征

马北地区古近系储集砂岩虽然形成时代较轻,但是埋藏深度变化比较大,埋藏最深的可达10 000 m以上,储集砂岩埋藏深度在1 500~4 000 m。因此,砂岩所经历的成岩作用改造强度及所处的成岩阶段差异也比较大。但是根据砂岩的碎屑颗粒接触关系、自生矿物类型等特征,结合相似年代和埋藏深度的泥质岩中有机质成熟度,基本可以确定柴北缘地区古近系储集砂岩目前所处的成岩阶段主要为早成岩阶段的B期。少量埋藏深度超过4 000 m且地层时代比较老的储集砂岩,所处的成岩阶段可能达到了晚成岩阶段的A期。

马北地区古近系下干柴沟组(E_3^2 和 E_3^1)砂砾岩的埋藏深度分别在779~1 840 m(E_3^1)和396~1 578 m(E_3^2),砂岩埋藏深度较浅。显微薄片和铸体薄片观察结果表明,砂岩中碎屑颗粒大都以点接触为主,部分颗粒为线接触(图3),但常见许多塑性岩屑或云母碎片已经发生塑性变形(图4),可见

压实作用对研究区砂砾岩产生了一定的影响,但并不是很大。

砂岩物性分析结果表明,储集砂岩物性普遍较好,储集空间以原生粒间孔隙为主,次生孔隙主要发育于部分颗粒边缘或易溶颗粒间。砂砾岩中碳酸盐类胶结物常见,多以它形泥晶方解石胶结为主,在研究区广泛发育;其次是半自形微晶或粉晶方解石,仅在部分储集砂岩中发育。在砂砾岩的粒间孔隙中粘土矿物也比较发育,其中最常见粘土矿物是蒙脱石、伊利石和绿泥石等。

通过对马北地区 Mb13 井和 Mb14 井下干柴沟组下段砂岩的 X 衍射分析可见,砂岩中粘土矿物的含量通常可达10%~20%以上,主要的粘土矿物类型为蒙脱石、伊利石、绿泥石以及混层粘土矿物(表1)。其中蒙脱石含量最高可达50%~90%,其次为绿泥石和伊利石,高岭石粘土矿物含量很少。混层粘土矿物主要为伊蒙混层,混层比例变化较大。

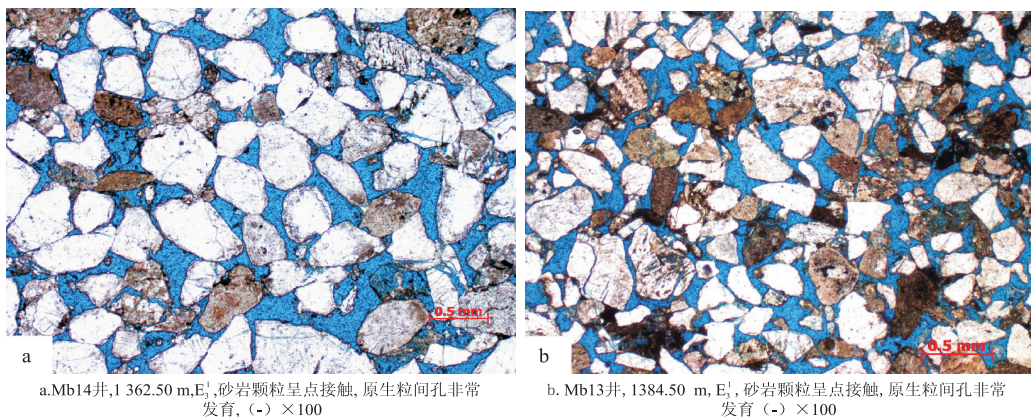


图3 柴达木盆地马北地区下干柴沟组下段砂岩中原生粒间孔隙发育特征

Fig.3 Characteristics of primary intergranular pores in sandstones in lower position of Paleogene Lower Ganchaigou Formation, north of Mahai Uplift, Qaidam Basin

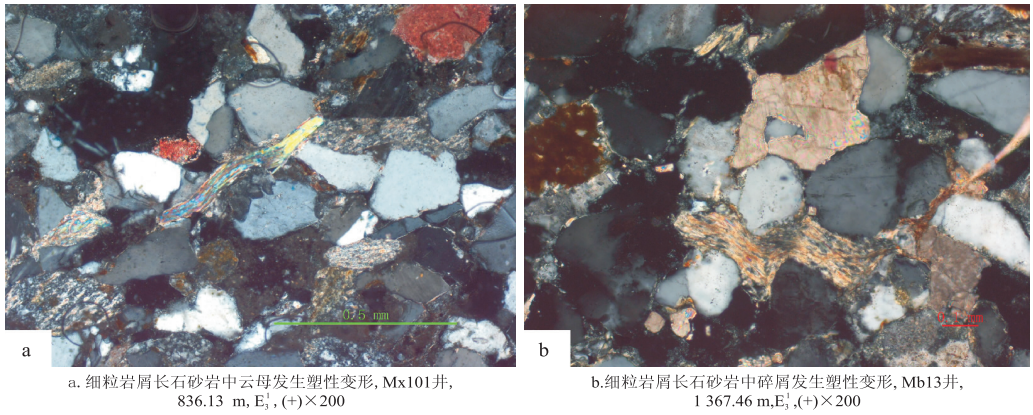


图 4 柴达木盆地马北地区下干柴沟组下段砂岩中碎屑塑性变形特征

Fig. 4 Characteristics of plastic deformation in sandstones in lower position of Paleogene Lower Ganchaigou Formation, north of Mahai Uplift, Qaidam Basin

表 1 柴达木盆地马北地区岩心砂岩中粘土矿物的 X 衍射分析数据

Table 1 X-ray diffraction analysis of clay minerals in sandstones of core samples from northern Mahai Uplift, Qaidam Basin

分析号	深度/m	岩性	粘土矿物相对含量/%					混层比/%		粘土矿物总含量/%	
			S	I/S	I	K	C	C/S	I/S		C/S
Mb13-1	1 370.20	砂岩	83	-	10	-	7	-	-	-	19.7
Mb13-4	1 372.25	砂岩	93	-	4	-	3	-	-	-	28.0
Mb13-6	1 382.70	砂岩	69	-	13	-	18	-	-	-	28.0
Mb13-8	1 381.75	砂岩	80	-	-	-	20	-	-	-	25.3
Mb13-10	1 383.80	砂岩	72	-	6	-	22	-	-	-	31.3
Mb13-11	1 385.50	砂岩	92	-	3	-	5	-	-	-	19.1
Mb13-15	1 389.80	砂岩	93	-	5	-	1	-	-	-	20.2
Mb13-16	1 390.30	砂岩	72	-	10	-	18	-	-	-	24.9
Mb13-17	1 390.95	砂岩	84	-	4	-	12	-	-	-	20.8
Mb13-25	1 399.70	砂岩	85	-	-	-	15	-	-	-	19.4
Mb13-32	1 407.10	砂岩	92	-	-	-	8	-	-	-	20.1
Mb13-42	1 421.80	砂岩	34	-	14	-	52	-	-	-	25.5
Mb13-50	1 451.20	砂岩	61	-	19	-	20	-	-	-	12.0
Mb14-1	1 344.90	砂岩	68	-	6	-	3	23	-	52	21.9
Mb14-2	1 344.50	砂岩	68	-	10	-	9	13	-	28	28.7
Mb14-3	1 353.74	砂岩	33	-	-	-	34	33	-	31	24.8
Mb14-4	1 355.25	砂岩	71	-	-	-	13	16	-	11	19.0
Mb14-5	1 357.10	砂岩	52	-	10	-	16	22	-	43	25.3
Mb14-6	1 357.88	砂岩	46	-	8	-	19	27	-	43	19.1
Mb14-7	1 358.55	砂岩	52	-	8	-	13	27	-	34	14.0
Mb14-8	1 359.22	砂岩	57	-	-	-	20	23	-	52	10.6
Mb14-9	1 362.50	砂岩	40	-	6	-	41	13	-	61	18.7
Mb14-1	1 344.90	砂岩	68	-	6	-	3	23	-	52	21.9

注:分析采用标准为 SY/T5163-1995;S 代表蒙脱石, I/S 代表伊/蒙混层, I 代表伊利石, K 代表高岭石, C 代表绿泥石, C/S 代表绿/蒙混层, 混层比表示伊/蒙或绿/蒙混层中蒙脱石的含量。S+I/S+I+K+C+S=101 或 99 为小数修约所致, 非数据偏差。按有关标准规定, 将混层比大于 70% 的 I/S 划入蒙脱石。

综合上述成岩特征和自生矿物发育特点, 可以确定柴北缘马北地区古近系下干柴沟组下段砂岩目前所处的成岩阶段主要为早成岩阶段的 B 期。

2.3 碳氧同位素组成及物质来源

马北地区古近系下干柴沟组下段砂岩样品的井

位、岩性特征及碳氧同位素分析结果列于表 2。从碳氧同位素分析结果来看, 方解石的碳同位素 ($\delta^{13}C$) 相对较轻, 为 $-7.1\text{‰} \sim -3.3\text{‰}$, 平均 -4.9‰ ; 氧同位素 ($\delta^{18}O$) 也相对较轻, 为 $-11.3\text{‰} \sim -9.6\text{‰}$, 平均 -10.3‰ ; 古盐度的 Z 值为 $107.0 \sim 115.6$, 平均

表2 柴达木盆地马北地区砂岩碳酸盐胶结物碳氧同位素分析

Table 2 Carbon and oxygen isotopes of carbonate cements in sandstones from northern Mahai Uplift, Qaidam Basin

序号	井号	深度/m	岩性	层位	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	Z 值
1	Mb103	899.9	砂岩	E ₃ ¹	-3.6	-10.5	114.7
2	Mb103	901.7	砂岩	E ₃ ¹	-3.9	-10.1	114.3
3	Mb103	903.7	砂岩	E ₃ ¹	-3.5	-10.0	115.2
4	Mb103	905.2	砂岩	E ₃ ¹	-3.9	-10.2	114.2
5	Mb103	906.7	砂岩	E ₃ ¹	-4.0	-9.8	114.2
6	Mb103	908.4	砂岩	E ₃ ¹	-3.3	-9.9	115.6
7	Mb103	910.2	砂岩	E ₃ ¹	-4.0	-10.2	114.0
8	Mb15	1 487.8	含砾细砂岩	E ₃ ¹	-4.8	-9.9	112.5
9	Mb15	1 407.6	砂岩	E ₃ ¹	-6.0	-9.6	110.2
10	Mb17	1 364.5	砂岩	E ₃ ¹	-5.2	-9.8	111.8
11	Mb17	1 432.3	砂岩	E ₃ ¹	-6.1	-11.0	109.3
12	Mb17	1 435.0	砂岩	E ₃ ¹	-4.2	-10.3	113.5
13	Mb17	1 454.0	砂岩	E ₃ ¹	-6.6	-10.5	108.6
14	Mb18	1 507.8	砂岩	E ₃ ¹	-7.1	-11.3	107.0
15	Mb18	1 532.1	砂岩	E ₃ ¹	-5.1	-10.0	111.9
16	Mb18	1 533.4	砂岩	E ₃ ¹	-5.2	-10.7	111.3
17	Mb18	1 536.1	砂岩	E ₃ ¹	-5.0	-10.9	111.6
18	Mb18	1 538.5	砂岩	E ₃ ¹	-5.2	-10.1	111.6
19	Mb18	1 541.3	砂岩	E ₃ ¹	-6.2	-11.0	109.1

值 112.1。

自然界的碳主要有 2 个储库,即有机碳和碳酸盐,两者的碳同位素组成差别较大,前者为还原碳,亏损 $\delta^{13}\text{C}$,后者为氧化碳,富含 $\delta^{13}\text{C}$ ^[21]。在成岩作用中,沉积物的埋深、温度、压力增加,大气降水的淋滤溶解,生物有机体降解等都对 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 产生一定的影响。一般来说盐度升高 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值增大;温度升高 $\delta^{18}\text{O}$ 变轻。此外,在成岩作用中,淡水淋滤和生物降解均可使 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 变轻^[22]。根据自然界碳同位素分馏机理^[23],正常的海相碳酸盐岩和碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 分布在 $-4.0\text{‰} \sim 4.0\text{‰}$ 范围内,属于无机碳源。如果不在这个范围之内则说明这类方解石的形成明显与有机质的脱羧基作用有关,较低的 $\delta^{13}\text{C}$ 说明这类方解石中有一定数量的有机碳加入^[14]。造成这种现象的主要原因是随着碎屑沉积物的不断埋深,温度、压力升高,烃源岩中的有机质发生热脱羧并释放部分二氧化碳,这时二氧化碳的碳同位素值明显较轻,通常在 $-4.0\text{‰} \sim -35.0\text{‰}$ 之间^[24]。这类二氧化碳气体比较易于溶入烃源岩中粘土矿物经压实作用而释放出的不同类型的水中(层间水、吸附水和结构水),从而形成具有较强溶蚀能力的有机酸和碳酸溶液。当这些酸性溶液进入周围的砂岩储集层中,可以对其中的长石、易溶岩屑(如花岗岩屑、喷发岩屑和碳酸盐

岩屑等)及早期碳酸盐胶结物进行溶蚀,从而形成次生溶蚀孔隙,这时成岩环境为酸性,氧化性较强,形成温度范围在 $80 \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 之间^[25]。

马北地区下干柴沟组下段砂岩中碳酸盐胶结物碳氧同位素(表 2)分析表明,方解石的 $\delta^{13}\text{C}$ 为 $-7.1\text{‰} \sim -3.3\text{‰}$,平均 -4.9‰ ;相对较轻的碳同位素值说明它的形成与有机质的脱羧基作用有关,有少量的有机碳加入。从储集砂岩中偶见方解石充填于次生溶蚀孔隙,说明这时的成岩环境为弱酸性,具有一定的氧化性,形成温度也比较高。

一般情况下,随埋深增加方解石胶结物的 $\delta^{18}\text{O}$ 值出现负偏^[26]。马北地区所测得的氧同位素值以中低负值为特征,与样品在该区具有一定的埋深相一致。碳酸盐岩中的碳、氧同位素值与水介质盐度的变化关系为盐度越高,其 δ 值越高。Keith 和 Weber^[27]把碳、氧同位素结合起来,提出了一个区分侏罗纪和时代更新的海相灰岩和淡水灰岩的经验公式,可用来指示古盐度^[27-30],即:

$$Z = 2.048(\delta^{13}\text{C} + 50) + 0.498(\delta^{18}\text{O} + 50)$$

式中: $\delta^{13}\text{C}$ 值和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均为 PDB 标准。当 $Z > 120$ 时为海相灰岩; $Z < 120$ 时为淡水灰岩; $Z = 120$ 时为未定形灰岩。

用马北地区下干柴沟组下段储层砂岩中的方解石胶结物的碳氧同位素值计算的 Z 值最大为 115.6,最小为 107.0,平均值为 112.1,均小于 120(表 2)。结合本区地质资料,在古近纪下干柴沟组下段沉积时期,该区为河流相沉积环境^[16-18],说明下干柴沟组下段储层砂岩的方解石胶结物的成岩流体为淡水流体,主要来自碎屑和大气中的淋滤淡水。

3 结论

1) 马北地区下干柴沟组下段储集砂岩中主要存在 2 种方解石胶结物类型,即它形泥晶方解石和半自形微晶方解石。其中泥晶方解石胶结物最为发育,主要形成于早成岩阶段早期,充填于砂岩颗粒周围有利于砂体固结成岩,抵御压实作用对孔隙的破坏;部分砂岩中含有的微晶方解石胶结物形成于早成岩阶段晚期,主要充填在砂岩残余粒间孔隙,对储层物性产生一定的负面影响。

2) 马北地区古近系下干柴沟组下段砂岩中含有较丰富的粘土矿物,其含量通常可达 $10\% \sim 20\%$ 以上。粘土矿物类型为蒙脱石、伊利石和绿泥石以及较为丰富的混层粘土矿物。其中蒙脱石含量可达 $50\% \sim 90\%$,其次为伊利石和绿泥石,高岭

石粘土矿物含量很少。混层粘土矿物主要为伊蒙混层,且混层比例变化较大。说明该段砂岩目前处于早成岩阶段B期。

3) 马北地区下干柴沟组下段砂岩中碳酸盐胶结物碳氧同位素分析表明,方解石的碳同位素相对较轻,为 $-7.1‰ \sim -3.3‰$,平均 $-4.9‰$;氧同位素较轻,为 $-11.3‰ \sim -9.6‰$,平均 $-10.3‰$;古盐度Z值分布范围为 $107.0 \sim 115.6$,平均值为 112.1 。表明砂岩中碳酸盐胶结物的形成与早期有机质的脱羧基作用有关,有少量有机碳的加入,成岩流体主要来自碎屑和大气中的淋滤淡水。

参考文献:

- [1] Boles J R. Carbonate cementation in Tertiary sandstones, San Joaquin basin, California [J]. *Spec Publ Int Ass Sediment*, 1998, 26:261-284.
- [2] Antar A W, Earle F M. Origin of giant calcite cemented concretions, Temple Member, Qasr El Sagha Formation (Eocene), Faiyum depression, Egypt [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1):70-81.
- [3] 王春梅, 裴昌蓉. 利用负胶结物投点图评价西湖凹陷古近系砂岩储层 [J]. *断块油气田*, 2010, 17(1):52-54.
- [4] 张立强, 罗晓容. 准噶尔盆地高压带碳酸盐胶结层的分布及特征 [J]. *石油实验地质*, 2011, 33(4):388-391.
- [5] 孙玉善, 申银民, 徐迅. 应用成岩岩相分析法评价和预测非均质性储层及其含油性:以塔里木盆地哈得逊地区为例 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(1):55-59.
- [6] Carlos R, Rafaela M, Karl R, et al. Facies-related diagenesis and multiphase siderite cementation and dissolution in the reservoir sandstones of the Khatatba Formation, Egypt's western desert [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(3):459-472.
- [7] Macaula Y C I, Haszeldine R S, Fallick A E. Distribution, chemistry, isotopic composition and origin of diagenetic carbonates; Magnus Sandstone, North Sea [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1993, 63:33-43.
- [8] Mostafa F, Harrison T M, Grove M. In situ stable isotopic evidence for protracted and complex carbonate cementation in a petroleum reservoir, North Coles Levee, San Joaquin basin, California, USA [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(3):444-458.
- [9] Friedman I, O'Neil J R. Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest [M] // Fleisher M, ed. *Data of Geochemistry*. 6th ed. Reston, Virginia: USGS, 1977:60.
- [10] Ortoleva P J. Basin compartments and seals: AAPG Memoir 61 [M]. Tulsa: AAPG Press, 1994:477.
- [11] Rosenbaum J M, Sheppard S M F. An isotopic study of siderites, dolomites, and ankerites at high temperature [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1986, 50:1147-1150.
- [12] 黄思静. 铍同位素地层学在碎屑岩成岩研究中的应用 [J]. *沉积学报*, 2002, 20(3):359-366.
- [13] McBride E F, Parea G C. Origin of highly elongate, calcite-cemented concretions in some Italian coastal beach and dunesands [J]. *Journal of Sedimentary Research*, 2001, 71(1):82-87.
- [14] 王琪, 嵯喜准, 陈国俊, 等. 延长组砂岩中碳酸盐胶结物氧碳同位素组成特征 [J]. *天然气工业*, 2007, 27(10):28-32.
- [15] 王芙蓉, 何生, 杨兴业. 中扬子海相碳酸盐岩中方解石脉成岩环境研究 [J]. *石油实验地质*, 2011, 33(1):56-60.
- [16] 刘殿鹤, 李凤杰, 郑荣才, 等. 柴北缘西段古近系下干柴沟组沉积相特征分析 [J]. *天然气地球科学*, 2009, 20(6):847-853.
- [17] 孙国强, 谢梅, 张永庶, 等. 柴北缘马北地区下干柴沟组下段沉积特征及演化 [J]. *岩性油气藏*, 2011, 23(6):56-61.
- [18] 陈吉, 谢梅, 史基安, 等. 柴北缘马北地区下干柴沟组储层特征 [J]. *天然气地球科学*, 2011, 22(5):821-826.
- [19] 汪立群, 徐凤银, 庞雄奇, 等. 马海—大红沟凸起油气勘探成果与柴达木盆地北缘的勘探方向 [J]. *石油学报*, 2005, 26(3):21-26.
- [20] 王琪, 郝乐伟, 陈国俊, 等. 白云凹陷珠海组砂岩中碳酸盐胶结物的形成机理 [J]. *石油学报*, 2010, 31(4):554-560.
- [21] 蔡观强, 郭锋, 刘显太, 等. 东营凹陷沙河街组沉积岩碳氧同位素组成的古环境记录 [J]. *地球与环境*, 2009, 37(4):347-354.
- [22] 刘德良, 孙先知, 李振生, 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):155-161.
- [23] Hudson J D. Stable isotopes limestone lithification [J]. *Journal of Geological Society*, 1977, 133(4):637-660.
- [24] Suess E, Whiticar M J. Methane-derived CO₂ in pore fluids expelled from the Oregon subduction zone [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1989, 71(1-4):119-136.
- [25] Surdam R C, Crossey L J, Hagen E S. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis [J]. *AAPG Bulletin*, 1989, 73:1-23.
- [26] 王大锐. 油气稳定同位素地球化学 [M]. 北京:石油工业出版社, 2000:137-196.
- [27] 张秀莲. 碳酸盐岩中氧、碳稳定同位素与古盐度、古水温的关系 [J]. *沉积学报*, 1985, 3(4):17-28.
- [28] 傅启龙. 库车盆地西北缘下第三系碳氧同位素特征及成岩环境 [J]. *地层学杂志*, 1996, 20(4):280-283.
- [29] 邵龙义, 窦建伟, 张鹏飞. 西南地区晚二叠世氧、碳稳定同位素的古地理意义 [J]. *地球化学*, 1996, 25(6):575-580.
- [30] Keith M H, Weber J N. Isotopic composition and environmental classification of selected limestones and fossils [J]. *Geochim Cosmochim Acta*, 1964, 28:1787-1816.

(编辑 徐文明)