

渤海湾盆地东营凹陷 烃源岩碳氧同位素组成及地质意义

刘庆

(中国石化胜利油田分公司勘探开发研究院, 山东东营 257015)

摘要:对渤海湾盆地东营凹陷沙河街组烃源岩层段开展了系统取样和碳酸盐碳氧同位素分析,并结合文献中的数据资料,在层位精细划分基础上,系统总结了碳氧同位素组成特征及纵向的差异,并探索分析了古湖泊环境的演变过程。沙四段下亚段 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 呈现较好的正相关,指示了断陷初始期盆地封闭性水文地质条件,但其碳氧同位素又整体相对较轻,并且具有从下部向上部逐渐变重的特征,表明盐湖水体不稳定并受到不同程度的淡水影响作用。沙四段上亚段 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 整体呈现较好的正相关且明显加重,指示了断陷加速期咸化湖泊水体环境较为稳定和封闭的特征。沙三段下亚段不同岩性碳酸盐碳氧同位素存在一定差异,其中较好反映烃源岩原始碳氧同位素组成特征的非钙片页岩,其 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布非常集中,指示断陷鼎盛期非常稳定、封闭的半咸化湖泊环境。沙三段中亚段与沙三段下亚段非钙片泥岩数据较为接近,从一定程度上继承了沙三下亚段沉积期湖泊水体的碳氧同位素特征。

关键词:碳氧同位素;闭流湖;湖相烃源岩;沙河街组;东营凹陷;渤海湾盆地

中图分类号:TE122.113

文献标识码:A

Composition and geologic significance of carbon and oxygen isotopes in hydrocarbon source rocks, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

Liu Qing

(Exploration and Development Research Institute, SINOPEC Shengli Oil Field Company, Dongying, Shandong 257015, China)

Abstract: Lacustrine hydrocarbon source rocks of the Shahejie Formation in the Dongying Sag were sampled, and the carbon and oxygen isotope composition of carbonates were analyzed. Combined with previous references and precise stratigraphic division, the isotope composition in different stratigraphic units and the evolution of ancient lacustrine environment were discussed. The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of carbonates in the lower section of the fourth member of Shahejie Formation are positively correlated, which indicated that the basin was hydrologically closed during the initial period of rifting. But the carbon and oxygen isotopes are relatively light on the whole, which indicated that the water body of the salt lake was not stable, and was frequently influenced by fresh water. The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of carbonates in the upper section of the fourth member of Shahejie Formation are relatively heavy and positively correlated, which indicated that the salt lake was closed and stable during the acceleration phase of rifting. The carbon and oxygen isotopes of carbonate rocks with different lithologies in the lower section of the third member of Shahejie Formation varied. The $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of non-calcium shale vary very little and are highly concentrated, which implied that the brackish lacustrine environment during peak rifting period was very stable and hydrologically closed. The middle and lower sections of the third member of Shahejie Formation have similar properties to the non-calcium shale, which suggested that the former may have inherited the isotope features of the latter.

Key words: carbon and oxygen isotopes; hydrologically closed lake; lacustrine hydrocarbon source rock; Shahejie Formation; Dongying Sag; Bohai Bay Basin

湖相碳酸盐碳、氧同位素分析已广泛应用于古湖泊学研究中。大量研究表明,水文条件开放的湖泊,由于水体快速更替,湖水的碳、氧同位素组分更多地反映了注入水的同位素特征,在其中形成的原

生碳酸盐碳、氧同位素组分的变化是各自独立的。而对于水体驻留时间长、封闭性的湖泊,蒸发作用对湖水的化学组成起着决定性的作用。随着蒸发作用的增强,较轻的 ^{16}O 和 ^{12}C 优先逸出,造成水体

中的 ^{18}O 和 ^{13}C 含量增加,从而使湖水的碳、氧同位素值同步增加,反映在原生碳酸盐碳、氧同位素组成的变化上,两者呈线性相关,封闭程度越高,相关系数越大^[1-2]。因此,湖相碳酸盐的碳、氧同位素可以提供古气候变化、湖泊封闭性、湖泊古盐度甚至原始有机质生产力等方面的指示信息^[3],而这些信息对于揭示湖相沉积物和湖相烃源岩成因机制具有重要意义。

东营凹陷作为中国东部典型的富油凹陷,其古近系沙河街组烃源岩具有沉积序列完整、厚度大、古湖泊盐度类型齐全的特点,在渤海湾盆地具有较好的代表性。近年来,适应页岩油气和烃源岩精细评价等研究的需要,研究人员从湖泊环境、沉积岩石学、矿物学、油气地球化学及成因机制等方面对东营凹陷古近系烃源岩开展了较多的研究工作^[4-8]。但是相对来说,从碳酸盐碳氧同位素特征方面开展的研究工作相对较少^[1,9]。笔者对沙河街组主要烃源岩层段进行了系统取样和碳酸盐碳氧同位素分析,并结合前人成果,总结了不同层段碳酸盐碳氧同位素的差异及其地质意义。

1 区域地质概况

东营凹陷是中国东部渤海湾盆地中的一个典型中、新生代陆相断陷盆地,油气资源丰富。其中古近系沙河街组为一套冲积、河流—湖泊相地层,最大厚度可达 1 500 m,是凹陷的主力烃源岩层系。沙河街组可细分为 4 个亚段,习惯上由下向上分别简称为沙四段、沙三段、沙二段和沙一段。沙四段又可细分为沙四下亚段和沙四上亚段,其中沙四下亚段为一套盐湖沉积,岩性组合以厚层的盐岩、膏岩和含膏泥岩沉积为主;沙四上亚段为一套咸化湖沉积,岩性以富含有机质的纹层泥页岩、灰质泥页岩为主。沙三段通常划分为 3 个亚段,其中沙三下亚段为一套半咸—微咸湖相沉积,岩石组合以纹层页岩、钙质纹层页岩、钙片页岩为主;沙三中、上亚段为一套微咸—淡水湖相沉积,岩性以块状泥岩和粉砂质泥岩为主。沙二段沉积期以河流相为主,至沙一段又形成一套半咸化湖相沉积,岩性以纹层泥页岩为主。纵向上沙四段、沙三下—沙二下、沙二上—沙一段分属 3 个不同的二级层序,各自形成于断陷初期—加速期、断陷鼎盛期—稳定期以及断陷衰退期 3 个不同的盆地演化阶段^[10]。最新的石油地质研究和勘探实践表明,沙四上亚段、沙三下亚段是区内的主力烃源岩层系,沙四下亚段是近期新证实的有效烃源岩层系,沙三中亚段有一定成藏

贡献,但尚未发现工业性油流油藏,而其上的其他层段成熟度较低,为非有效烃源岩层系^[11]。

2 样品采集与实验

考虑到本次研究的主要目的是深化沙河街组烃源岩古湖泊学和成因机制研究,所以样品采集的重点是沙四上、下亚段和沙三下亚段。这些层段烃源岩均含有较为丰富的碳酸盐^[12],可以保证测定结果的可靠性。所采集样品均为岩心样品,主要位于盆地的洼陷带和下斜坡带,总计 42 块。其中沙四下亚段共采集样品 11 块,包括丰深 2 井样品 5 块,岩性以深灰色膏质纹层泥岩和纹层泥岩为主,为盐湖中心相带沉积;郝科 1 井样品 6 块,岩性为紫红色砂质泥岩,为干泥坪相(盐湖边缘相)沉积,层位上郝科 1 井样品位于丰深 2 井样品之下。干泥坪相样品属于非烃源岩,取样的目的是为了与盐湖中心相样品进行对比,以综合分析盐湖不同环境碳氧同位素的组成差异。在手标本和岩石薄片,沙四下亚段样品均未发现明显的碳酸盐重结晶现象,因此分析结果能很好地反映原始沉积时期碳酸盐碳氧同位素的组合特征。沙四上亚段样品共 14 块,埋藏深度 2 450.5~4 090.9 m,岩性以深湖相纹层泥页岩为主,其中浅部样品中碳酸盐以泥晶结构为主,深部部分样品发生轻微的重结晶,以微亮晶为主^[12],考虑到泥页岩较强的封闭性且重结晶作用较弱,认为仍能较好地反映原始沉积时期碳酸盐碳氧同位素的组成面貌。沙三下亚段采集样品 16 块,岩性以深灰色泥页岩和钙片页岩为主,均为深湖相沉积。其中泥页岩中碳酸盐重结晶较弱,可以较好地反映碳酸盐原始碳氧同位素组成特征;而钙片页岩存在较强的重结晶,为生烃超压作用下形成的成岩碳酸盐^[11,13],因此对全岩样品、泥质纹层样品和成岩方解石层进行了分别取样,以考察 2 类样品的碳同位素组成差异以及成岩过程对碳酸盐同位素是否产生影响。沙三中亚段采集样品 1 块,为灰色块状泥岩。样品基本地质特征描述见表 1。

样品分析遵照国标 SY/T5238-2008 进行^[14]:取 5~20 mg 样品首先用玛瑙研钵研碎,与 100%的正磷酸在恒温(25 ℃)、真空条件下充分反应,根据岩性和碳酸盐矿物组成的差异确定反应时间为 4~16 h,纯化并用冷阱收集生成的 CO_2 ,最终在 Finnigan-MAT 公司的 MAT-252 型稳定同位素质谱仪上完成碳、氧同位素组成测定,标准为 PDB,允许误差分别小于 $\pm 0.2\text{‰}$ 和 $\pm 0.3\text{‰}$ 。实验在胜利油田勘探开发研究院成藏地球化学实验室完成,样品分析结果见表 1。

表 1 渤海湾盆地东营凹陷沙河街组烃源岩样品碳氧同位素分析

Table 1 Carbon and oxygen isotopes of carbonates in source rocks of Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

井号	井深/m	岩性	层位	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{PDB}/\text{‰}$	井号	井深/m	岩性	层位	$\delta^{13}C_{PDB}/\text{‰}$	$\delta^{18}O_{PDB}/\text{‰}$
梁 28	2 846.1	灰色块状泥岩	沙三中	2.3	-8.6	官 110	2 450.5	钙质页岩	沙四上	5.4	-4.2
梁 241	2 825.1	深灰色弱纹层泥岩	沙三下	2.8	-10.4	王 7	2 665.2	油页岩	沙四上	3.7	-7.9
河 130	3 232.2	深灰色纹层灰质泥岩	沙三下	3.7	-8.8	莱 105	2 670.0	钙质页岩	沙四上	3.0	-8.6
河 130	3 224.0	灰黑色油页岩	沙三下	4.0	-10.2	丰深 1	3 440.0	纹层泥岩	沙四上	3.1	-8.9
河 130	3 228.7	钙片页岩(泥质纹层为主部分)	沙三下	2.7	-9.5	丰深 1	3 686.6	纹层泥岩	沙四上	3.1	-9.1
河 130	3 228.7	钙片页岩(成岩方解石层)	沙三下	5.2	-12.0	丰深 1	3 762.8	纹层泥岩	沙四上	2.7	-9.5
河 130	3 228.7	钙片页岩(成岩方解石层)	沙三下	4.9	-13.4	丰深 1	3 819.0	纹层泥岩	沙四上	3.7	-8.5
河 130	3 265.3	钙片页岩(泥质纹层为主部分)	沙三下	3.4	-10.7	坨 764	4 087.9	纹层泥岩	沙四上	3.6	-9.5
河 130	3 265.3	钙片页岩(成岩方解石层)	沙三下	4.3	-12.1	坨 764	4 090.9	深灰色油页岩	沙四上	2.3	-12.0
河 130	3 265.3	钙片页岩(成岩方解石层)	沙三下	4.7	-11.6	牛 11	3 607.5	灰色页岩、油页岩	沙四上	0.6	-11.3
樊 1	3 076.9	钙片页岩(泥质纹层为主部分)	沙三下	4.6	-11.8	郝科 1	3 759.5	紫色砂质泥岩	沙四下	-6.6	-9.3
王 31	2 448.0	深灰色纹层泥岩	沙三下	2.8	-8.4	郝科 1	4 013.2	紫色砂质泥岩	沙四下	-6.7	-11.8
王 57	3 408.5	钙片页岩(岩石全岩)	沙三下	5.0	-12.8	郝科 1	4 503.5	紫色砂质泥岩	沙四下	-7.8	-13.2
王 57	3 408.5	钙片页岩(泥质纹层为主部分)	沙三下	4.6	-12.3	郝科 1	5 103.4	紫色砂质泥岩	沙四下	-8.1	-14.9
王 57	3 405.0	深灰色油页岩	沙三下	4.5	-12.0	郝科 1	5 104.4	紫色砂质泥岩	沙四下	-7.0	-14.5
王 57	3 418.0	成岩方解石层	沙三下	4.9	-12.1	郝科 1	5 108.3	褐色泥岩	沙四下	-7.8	-15.6
王 78	3 736.0	深灰色页岩	沙三下	3.6	-9.6	丰深 2	3 970.4	膏质纹层泥岩	沙四下	-4.5	-7.0
纯 372	2 640.0	油页岩	沙四上	0.6	-5.4	丰深 2	3 972.3	膏质纹层泥岩	沙四下	-5.8	-5.7
王 31	2 489.0	页岩	沙四上	4.5	-5.9	丰深 2	4 295.3	深灰色纹层泥岩	沙四下	-5.5	-8.1
利 89	3 387.0	深灰色页岩	沙四上	-1.6	-10.1	丰深 2	4 298.0	深灰色纹层泥岩	沙四下	-5.4	-9.7
王 78	3 907.0	深灰色页岩	沙四上	3.8	-9.0	丰深 2	4 500.5	深灰色弱纹层泥岩	沙四下	-4.0	-9.0

3 实验结果讨论

除了本次测试数据外,笔者还对文献中的数据进行了收集,并根据其埋藏深度和测井资料经精细层位划分以后进行了重新整理。其中包括王冠民等^[15]用同样非在线分析方法测定的 7 块沙三下亚段样品;刘传联等^[1]用在线分析方法分别分析了东营凹陷沙四段 24 块样品的方解石和白云石碳氧同位素数据。上述资料的收集使本次研究的样品数量、层位和分布范围得到有效扩大,提高了分析结果的代表性和涵盖面。蔡观强等^[9]对沙河街组部分层段的样品也进行了分析,尤其是其沙三段分析数据与本次分析及王冠民等^[15]分析结果存在一定差异,但由于其数据缺少探井的深度资料,无法判定其层位划分与本文是否一致,故未加详细讨

论。总体来看,东营凹陷不同层段烃源岩中碳酸盐碳氧同位素特征表现出明显的差异(图 1)。

3.1 沙四下亚段

沙四下亚段碳酸盐 $\delta^{13}C_{PDB}$ 介于 $-8.1\text{‰} \sim -4.0\text{‰}$, 平均值为 -6.3‰ , $\delta^{18}O_{PDB}$ 值介于 $-15.6\text{‰} \sim -5.7\text{‰}$, 平均为 -10.8‰ , $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 呈现明显的正相关, 相关系数为 0.65, 且所有数据点均处于坐标轴上的第 III 象限(图 1); 碳氧同位素数值存在明显的相关性, 表明其沉积时期古湖泊为封闭性水文地质条件, 这与该层段富含石膏、石盐等蒸发盐矿物的盐湖相岩性组合是一致的。然而, 根据对现代不同类型湖泊中碳酸盐碳氧同位素的组成特征研究发现, 封闭型咸水、半咸水湖泊 $\delta^{13}C$ 和 $\delta^{18}O$ 数据大多位于 I、IV 象限, 而开放型淡水湖泊数据一般位于第 III 象限^[1,16]。而沙四下亚段数据点均处于第 III 象限,

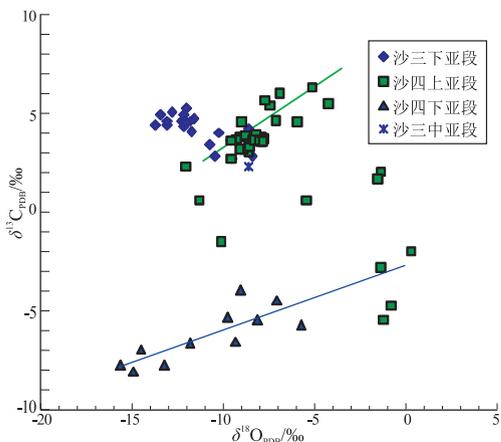


图 1 渤海湾盆地东营凹陷沙河街组烃源岩碳酸盐碳氧同位素组成特征

Fig.1 Carbon and oxygen isotope compositions of carbonates in source rocks of Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

$\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均相对偏轻,尤其是碳同位素为所有层段中最轻的,与前人研究存在一定的不吻合性。这种差异可以从郝科 1 井和丰深 2 井样品的碳氧同位素组成差异得到较好的解释。如图 2 所示,郝科 1 井紫红色泥岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 较丰深 2 井深灰色含膏泥岩相对均偏轻。作为断陷初始期沉积,沙四下亚段从早到晚整体经历了水体范围逐渐加大和湖水逐渐加深的过程。郝科 1 井紫红色泥岩形成于较早的间歇性盐湖阶段,湖水分布非常局限,因此湖水的浓缩时间较短,其碳氧同位素可能更多地反映流域内河流注入水的性质,因而碳氧同位素相对较轻;而丰深 2 井深灰色含膏泥岩沉积略晚,此时该井所处的北部深洼陷带开始形成永久性盐湖,湖水驻留时间和蒸发浓缩时间相对变长,因而碳氧同位素组成较前者略重。因此,沙四下亚段碳氧同位素组成

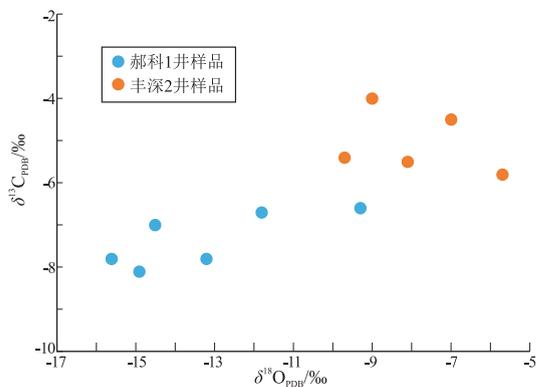


图 2 渤海湾盆地东营凹陷沙四下亚段泥岩的碳酸盐碳氧同位素组成特征

Fig.2 Carbon and oxygen isotope compositions of carbonates in mudrocks of the lower section of the fourth member of Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

总体偏轻的现象,反映了盐湖水体相对较小、淡水碳氧同位素组成对湖泊水化学影响较大的特点,其他如水体中富含硫酸盐引发的细菌硫酸盐降解等,也可能对碳氧同位素负偏移产生重要影响。

3.2 沙四上亚段

根据本次分析,沙四上亚段烃源岩碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值介于 $-1.6\text{‰} \sim 5.4\text{‰}$,平均值为 2.8‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值介于 $-12.0\text{‰} \sim -4.2\text{‰}$,平均为 -8.6‰ 。与沙四下亚段相比,碳氧同位素均相对变重,其中尤以碳同位素变重明显(图 1,图 3)。在坐标轴上,大多数数据点落在第 II 象限, $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 整体呈现较好的正相关,仅有 2 个数据点表现的比较离散。上述相关性特征表明,该沉积时期古湖泊具备较好的封闭性水文地质条件。据蔡进功等^[17]分析,沙四上亚段湖水古盐度较高,为 $33\text{‰} \sim 21\text{‰}$,也与闭流湖泊的特征相吻合。与沙四下亚段相比,沙四上亚段的氧同位素组成整体相对变重,则进一步指示该时期具备稳定的湖泊水体环境、较强烈的蒸发作用和湖水较长的驻留时间。而 2 个数据点的异常可能指示了局部湖泊环境的特殊性,如接近淡水注入区等,进而影响到局部水体的碳氧同位素组成。

刘传联等^[1]对沙四上亚段也开展过一系列分析,其数据表现出一定的离散变化,与本次分析存在一定差异:其上部层段的样品,无论是方解石还是白云石数据,均与本次数据集中分布在同一回归曲线附近,表现出较好的一致性;但其下部层段的白云石样品数据, $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 平均为 -3.79‰ , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 平均为 -0.69‰ ,尤其是氧同位素较本次全岩分析的结果偏重。这种差异的原因尚难断定,可能是白云石和方解石从湖水中沉淀时分馏系数不同造成的。如 Sheppard 和 Schwarcz^[16]通过白云石—水分馏实

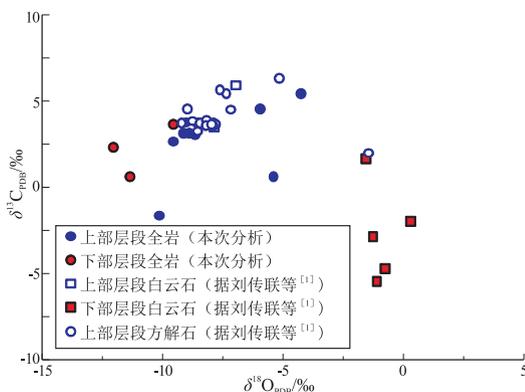


图 3 渤海湾盆地东营凹陷沙四上亚段烃源岩碳酸盐的碳氧同位素组成特征

Fig.3 Carbon and oxygen isotope compositions of carbonates in source rocks of the upper section of the fourth member of Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

验发现白云石较方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 重 $4\% \sim 7\%$; 另外一些学者观察到全新世白云石较方解石重 $2\% \sim 4\%$ 。也可能由于白云石较方解石溶解困难, 在线和非在线分析方法差异对测定结果产生了一定的影响。

3.3 沙三下亚段

沙三下亚段数据源自本次及王冠民等^[15]分析, 其中碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 值介于 $2.3\% \sim 5.2\%$, 平均值为 4.0% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 值介于 $-13.7\% \sim -8.4\%$, 平均为 -11.0% (图 1)。与沙四上亚段相比, 碳酸盐氧同位素略轻, 碳同位素略重, 前者可能与该时期气候逐渐变得湿润、蒸发作用变弱有关, ^{18}O 富集程度不够; 而后者可能与该时期具有较高的湖泊生产率以及水体中 CO_2 因消耗量大, ^{13}C 逐渐富集有关。沙三下亚段碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布呈现一定的负相关, 与开放式和封闭式湖盆均表现出一定的差异, 表面上看表现出一定的特殊性。但进一步分析发现 (图 4), 这种差异与样品岩性和类型明显相关: 其中非钙片页岩和 2 块钙片页岩中的泥质纹层样品集中分布于右侧区域, 与沙四上亚段样品的集中分布区重合, 而钙片页岩全岩、亮晶方解石及 1 块全岩样品分布于左上区域。钙片页岩中的亮晶方解石层, 目前已经公认为后期成岩作用造成的^[5,15], 因而沙三下亚段烃源岩碳氧同位素组成的差异可通过后期的碳酸盐重结晶和成岩改造做出较好的解释。在埋藏成岩过程中, 随着温度的增高, 同位素分馏系数发生变化, 碳酸盐胶结物会逐渐贫 ^{13}C 和 ^{18}O 。根据 Erez 和 Luz (1983)^[16] 提出的计算公式, $\delta^{18}\text{O}$ 每降低 0.26% 大致对应着碳酸盐形成温度升高 $1\text{ }^\circ\text{C}$ 。由图 4 可以看出, 钙片页岩较非钙片页岩 $\delta^{18}\text{O}$ 平均降低 3.5% 左右, 发生了明显的负偏移。实际上, 由于泥页岩较强的封闭性等原因, 同位素分馏作用很难达到平衡, 故负偏移量一

般小于理论计算量。但可以肯定的是, 钙片页岩中氧同位素的负迁移主要是由较高的成岩温度造成的同位素分馏效应。不过, 在所测试样品中, 钙片页岩中的碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}$ 却普遍较其他类型的泥页岩有小幅增加, 王冠民等^[15] 认为可能与成岩过程中有机质来源碳的参与有关。

以上分析表明, 沙三下亚段钙片页岩中碳氧同位素受到了成岩改造作用的影响, 因此非钙片页岩更能体现原始泥质岩中碳酸盐的碳氧同位素组成特征。从非钙片泥岩的数据分布特征来看, 沙三下亚段碳酸盐的碳氧同位素数值差异较小, 数据集中分布, 表明该时期湖泊水化学环境非常稳定。结合该层段为半咸化湖相沉积, 湖水尚具有一定的盐度的认识, 综合认为沙三下亚段沉积时期湖泊为稳定的闭流湖沉积, 且具有较高的有机质原始生产力。

3.4 沙三中亚段

沙三中亚段本次仅分析样品 1 块, 岩性为灰色块状泥岩, 其碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 为 2.3% , $\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ 为 -8.6% , 与沙三下亚段非钙片泥岩数据较为接近。但由于样品量较少, 不便对其湖泊环境进行讨论, 但总体来说从一定程度上延续了沙三下亚段时期的湖泊水化学特征。

4 结论

东营凹陷沙河街组烃源岩中碳酸盐碳氧同位素组成存在明显差异。沙四下亚段碳氧同位素均相对较轻, 其数值均落在坐标轴上第 III 象限, 并呈现较好的正相关, 指示断陷早期整体封闭性水文条件, 水体规模较小且受周边注入淡水影响较大; 沙四上亚段碳氧同位素均相对变重, 其中尤以碳同位素变重明显, 大部分尤其是上部层段样品 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数值主要处于第 II 象限, 且整体呈现较好的正相关, 指示断陷加速期封闭和较为稳定的湖泊水体环境以及较强烈的蒸发作用; 沙三下亚段钙片页岩由于碳酸盐重结晶等作用, 与非钙片页岩相比, 碳酸盐碳氧同位素发生了一定的偏移。其非钙片泥岩的碳氧同位素数值差异较小, 整体分布在沙四上亚段数据集中分布区, 指示了断陷鼎盛期非常稳定、封闭的半咸化湖泊环境以及可能较高的原始有机质生产率特征。湖泊水文的上述演变可对烃源岩的发育产生重要影响。

参考文献:

- [1] 刘传联. 东营凹陷沙河街组湖相碳酸盐岩碳氧同位素组分及其古湖泊学意义[J]. 沉积学报, 1998, 16(3): 109-114.

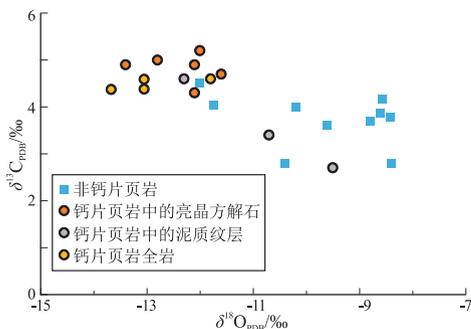


图 4 渤海湾盆地东营凹陷沙三下亚段烃源岩的碳酸盐碳氧同位素组成特征

Fig.4 Carbon and oxygen isotope compositions of carbonates in source rocks of the lower section of the third member of Shahejie Formation, Dongying Sag, Bohai Bay Basin

- Liu Chuanlian. Carbon and oxygen isotopic compositions of lacustrine carbonates of the Shahejie Formation in the Dongying Depression and their paleolimnological significance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1998, 16(3): 109-114.
- [2] 刘传联, 赵泉鸿, 汪品先. 湖相碳酸盐氧碳同位素的相关性与生油古湖泊类型[J]. *地球化学*, 2001, 30(4): 363-367.
- Liu Chuanlian, Zhao Quanhong, Wang Pinxian. Correlation between carbon and oxygen isotopic ratios of lacustrine carbonates and types of oil-producing paleolakes [J]. *Geochimica*, 2001, 30(4): 363-367.
- [3] 高玄彧, 白宪洲, 李勇, 等. 用碳氧同位素对沱沱河盆地古近纪及新近纪早期气候变化的研究[J]. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 33(1): 19-23.
- Gao Xuanyu, Bai Xianzhou, Li Yong, et al. Study of the climate change in the Tuotuo River Basin by carbon and oxygen isotopes [J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 2006, 33(1): 19-23.
- [4] 刘庆, 张林晔, 沈忠民, 等. 东营凹陷湖相盆地类型演化与烃源岩发育[J]. *石油学报*, 2004, 25(4): 42-45.
- Liu Qing, Zhang Linye, Shen Zhongmin, et al. Evolution of lake-basin types and occurrence of hydrocarbon source rocks in Dongying Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2004, 25(4): 42-45.
- [5] 姜秀芳. 济阳拗陷湖相碳酸盐岩沉积主控因素[J]. *油气地质与采收率*, 2011, 18(6): 23-27.
- Jiang Xiufang. Main controlling factors of lacustrine carbonate rock in Jiyang Depression [J]. *Petroleum Geology and Recovery Efficiency*, 2011, 18(6): 23-27.
- [6] 刘庆, 张林晔, 宋国奇, 等. 济阳拗陷古近系沙四段上亚段烃源岩沉积有机相研究[J]. *高校地质学报*, 2011, 17(4): 586-593.
- Liu Qing, Zhang Linye, Song Guoqi, et al. Sedimentary organic facies of the Palaeogene Upper E₂₋₃s⁴ source rocks in Jiyang Depression [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2011, 17(4): 586-593.
- [7] 石泉清, 关平, 毕彩芹, 等. 济阳拗陷车西洼陷古近系沙三下亚段—沙四上亚段沉积相类型及分布特征[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(S1): 28-38.
- Shi Quanqing, Guan Ping, Bi Caiqin, et al. Sedimentary facies types and distribution of sedimentary facies of Upper Sha4 to Lower Sha3 Member in Paleogene in Chexi Sag of Jiyang Depression [J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(S1): 28-38.
- [8] 张林晔, 刘庆, 张春荣. 东营凹陷成烃与成藏关系研究[M]. 北京: 地质出版社, 2005: 3-34.
- Zhang Linye, Liu Qing, Zhang Chunrong. Study on the genetic relationships between hydrocarbon occurrence and pools formation in Dongying Depression [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005: 3-34.
- [9] 蔡观强, 郭锋, 刘显大, 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.
- Cai Guanqiang, Guo Feng, Liu Xiantai, et al. Carbon and oxygen isotope characteristics and palaeoenvironmental implications of lacustrine carbonate rocks from the Shahejie Formation in the Dongying Sag [J]. *Earth and Environment*, 2009, 37(4): 347-354.
- [10] 张海峰, 刘庆, 张林晔, 等. 山东东营凹陷古近系沙河街组湖盆演化及烃源岩赋存相带[J]. *古地理学报*, 2005, 7(3): 383-397.
- Zhang Haifeng, Liu Qing, Zhang Linye, et al. Lacustrine basin evolution and favorable sedimentary facies belt for source rocks abounding in the Shahejie Formation of Paleogene in Dongying Sag, Shandong Province [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2005, 7(3): 383-397.
- [11] 张林晔, 刘庆, 徐兴友, 等. 油气地球化学与成熟探区精细勘探[M]. 北京: 石油工业出版社, 2015.
- Zhang Linye, Liu Qing, Xu Xingyou, et al. Application of petroleum geochemistry in fine exploration in mature exploration areas [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2015.
- [12] 隋风贵, 刘庆, 张林晔. 济阳断陷盆地烃源岩成岩演化及其排烃意义[J]. *石油学报*, 2007, 28(6): 12-16.
- Sui Fangui, Liu Qing, Zhang Linye. Diagenetic evolution of source rocks and its significance to hydrocarbon expulsion in Shahejie Formation of Jiyang Depression [J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2007, 28(6): 12-16.
- [13] 刘庆, 张林晔, 沈忠民, 等. 东营凹陷富有机质烃源岩顺层微裂隙的发育与油气运移[J]. *地质论评*, 2004, 50(6): 593-597.
- Liu Qing, Zhang Linye, Shen Zhongmin, et al. Microfracture occurrence and its significance to the hydrocarbons expulsion in source rocks with high organic matter abundance, Dongying Depression [J]. *Geological Review*, 2004, 50(6): 593-597.
- [14] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 有机物和碳酸盐岩碳、氧同位素分析方法: SY/T5238-2008 [S]. 北京: 石油工业出版社, 2008.
- The National Development and Reform Commission of the People's Republic of China. Analysis method for carbon and oxygen isotope of organic matter and carbonate: SY/T5238-2008 [S]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2008.
- [15] 王冠民, 任拥军, 钟建华, 等. 济阳拗陷古近系黑色页岩中纹层状方解石脉的成因探讨[J]. *地质学报*, 2005, 79(6): 834-838.
- Wang Guanmin, Ren Yongjun, Zhong Jianhua, et al. Genetic analysis on lamellar calcite veins in Paleogene black shale of the Jiyang Depression [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2005, 79(6): 834-838.
- [16] Hoefs J. Stable isotope geochemistry [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1997: 149-158.
- [17] 蔡进功, 姜秀芳, 范存堂. 东营盆地始新统沉积体系及盆地演化[J]. *沉积学报*, 1995, 13(S1): 27-37.
- Cai Jingong, Jiang Xiufang, Fan Cuntang. Basin evolution and distribution of lacustrine systems in Middle and Upper Eocene Dongying Basin [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1995, 13(S1): 27-37.

(编辑 徐文明)