

碳、氧、锶同位素在深部油气勘探中的应用

——以胜利油区渤南洼陷为例

吴富强¹⁾ 鲜学福¹⁾ 李后蜀²⁾ 胡 雪²⁾ 刘家铎³⁾

(1) 重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室, 四川 重庆, 400044;

2) 重庆市地质矿产勘查开发总公司, 四川 重庆, 400039 3) 西南石油学院, 四川 成都, 610059)

摘 要 本文尝试对胜利油区渤南洼陷深部储层沙四段碎屑岩中碳酸盐胶结物的 C、O、Sr 同位素进行测定, 将三者有机地结合起来(相互补充、相互约束、相互印证), 客观、科学地分析三者所反映的构造、沉积、成岩、成烃信息, 揭示深部储层成岩及孔隙演化规律, 探讨 C、O、Sr 同位素分析技术在深部油气勘探中的应用。

关键词 渤南洼陷 深部储层 C、O、Sr 同位素

The Application of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ to the Deep Reservoir ——A Case Study of Bonan Depression in Shengli Oilfield

WU Fuqiang¹⁾ XIAN Xuefu¹⁾ LI Houshu²⁾ HU Xue²⁾ LIU Jiaduo³⁾

(1) Key Lab for the Exploitation of Southwestern Resources and Environmental Engineering in Chongqing University,

Ministry of Education, Chongqing, Sichuan, 400044 2) Chongqing General Corporation of Geology for Exploration and

Development of Mineral Resources, Chongqing, Sichuan, 400039 3) Southwest College of Petroleum, Chengdu, Sichuan, 610059)

Abstract The authors try to determine the $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ values of the upper part of the Shasi Member in Bonan subdepression, analyzes objectively and scientifically the information they contain, reveal the diagenetic characteristics of the deep reservoir, and discuss the application of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ to the deep reservoir.

Key words Bonan subdepression deep reservoir $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ $\delta^{13}\text{C}$ $\delta^{18}\text{O}$

由于深部储层成岩及孔隙演化与物源、沉积相、温度及水介质条件变化等因素有关, 因此有必要采取特殊的分析方法了解深部储层的潜在信息。本文尝试对渤南洼陷深部储层沙四段碎屑岩中碳酸盐胶结物 C、O、Sr 同位素进行测定, 将三者有机地结合起来(相互补充、相互约束、相互印证), 客观、科学地分析三者所反映的构造、沉积、成岩、成烃信息, 揭示深部储层成岩及孔隙演化规律, 探讨 C、O、Sr 同位素分析技术在深部油气勘探中的应用。

1 地质背景

渤南洼陷是胜利油区的一个三级负向构造单元, 由陡坡带、缓坡带、洼陷带 3 个部分组成。洼陷带由孤西向斜、四扣向斜组成, 其充填序列为下第三系的孔店组、沙四段、沙三段、沙二段、沙一段、东营

组, 上第三系的馆陶组、明化镇组及第四系的平原组。

该洼陷为一富油洼陷, 自 1964 年开始勘探、1970 年发现第一口千吨井以来, 在其周围已发现渤南、罗家、义东、埕东、孤岛、垦西、陈家庄 7 个大、中型油气田, 探明含油气面积约 100 km², 石油地质储量 1 亿多吨。

2 Sr、C、O 同位素

2.1 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 同位素

2.1.1 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 从 20 世纪 60 年代末以来, 由于 Sr 同位素具有独特的地球化学性质使其在海洋研究中得到了广泛的应用:

(1) Sr 在周期表上是第二族的主族元素, 原子序数为 38, 离子半径为 1.13 Å, Sr 可置换 Ca²⁺ 离子而进入斜长石中, 因此斜长石和磷灰石是主要的含

Sr 矿物。Rb 在元素周期表中为第一族主族元素,原子序数为 37,离子半径为 1.48 Å,可置换造岩矿物中的 K,而富集于云母和钾长石类矿物中。总之,在岩浆分异过程中,Rb 富集在残留的岩浆中,最后进入含钾矿物,而 Sr 富集在早期形成的斜长石中。

(2)⁸⁷Sr 为放射性元素⁸⁷Rb 衰变而来,⁸⁷Rb 富集于酸性和碱性系列火成岩中,即大陆硅铝壳中,而在基性岩、深部幔源中贫乏,⁸⁷Sr 是稳定同位素,⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 为常数,因此体系的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值可以较好地反映陆源和幔源物质的相对比例。

(3)⁸⁷Rb→⁸⁷Sr 的半衰期长,Sr 在海水、湖水中滞留时间(4 Ma)也长于海水、湖水混匀时间(0.001 Ma),因此尽管不同地质时期海相碳酸盐的 Sr 同位素组成是变化的,而在时限很短的同一地质时期内又表现出相对恒定性。

(4)海水、湖水是一个开放体系,海水⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值主要受下列因素制约:①全球火山造成幔源物质输入量的剧增,是导致海洋 Sr 同位素组成降低的主要原因;②沿洋中脊的热对流系统内,海水与热玄武岩的相互作用有利于海水 Sr 和幔源 Sr 的混合、同位素的交换,其结果不仅可以引起海水、湖水 Sr 同位素组成降低,而且可以加速这种作用进行;③来自古老的克拉通硅铝质岩石,尤其是前寒武纪花岗片麻岩大量风化剥蚀,通过水循环带入到海水、湖水中,造成壳源 Sr 大幅度增加,致使海洋、湖水 Sr 同位素组成升高;④不同时期碳酸盐的重溶或成岩再循环,也是海水、湖水 Sr 的来源之一,但影响较

小,对整个海水的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 贡献约为海水的 1/50,对湖相影响更小。某一地质时期海洋、湖水 Sr 的同位素组成,实际上是不同来源的 Sr 在海水、湖水所占比例大小的一种动态平衡的结果,一旦出现全球性事件,原先建立的这种动态平衡就受到破坏,继而在新的地质条件下去建立新的平衡。

(5)选定成岩期碳酸盐胶结物来测定⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 是因为由于 Rb 的晶体化学特性,Rb 很难进入碳酸盐矿物,因此碳酸盐胶结物中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 不受或极少受地质历史中 Rb 衰变形成的 Sr,即放射性成因锶的影响,可较好地保存了成岩环境下湖水 Sr 同位素组成的纪录。这也正是笔者尝试把 Sr 同位素分析技术应用于陆相深部储层研究之中的依据所在。

2.1.2 样品的采集及测试 样品采自渤南洼陷沙四段义 160 井、义 170 井、义 17 井、渤深 4 井、渤深 5 井沙四段,共 19 块样,其中 14 块属沙四上亚段,5 块属沙四下亚段。沙四下亚段岩性为紫红色中粗粒岩屑长石(杂)砂岩,沙四上亚段岩性为(深)灰色(岩屑)长石砂岩,含斑泥质粉砂岩、粉砂质泥岩等。样品均用高纯度 2 mol/L 的盐酸提取内含的碳酸盐,按国际通用规范,经阳离子交换柱分离纯化;Sr 同位素比值用 MAT261 同位素质谱计测定,对美国国家标准局标准样品 NBS987 的测定误差小于 0.02‰。

表 1 为测试结果,19 块样品⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 总体上低于 0.710,平均 0.70829,仅有 3 个样品高于 0.710。通过对 3 块样品复检发现,B₅₂、B₆₃样品中含有寒武-

表 1 渤南洼陷碳酸盐胶结物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 同位素分析数据
Table 1 ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr analytical result of carbonate cement from Bonan subsag

样品	井号	深度/m	层位	胶结物	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	幔源 Sr/%	壳源 Sr/%
B-58	义 17	3430.9	Es ₄	铁方解石	0.7123	48.12	51.88
B-56	义 17	3515.7	Es ₄	铁方解石	0.70957	65.19	34.81
B-8	义 160	3579.49	Es ₄	铁方解石	0.70712	80.5	19.5
B-9	义 160	3582.2	Es ₄	方解石	0.70854	71.63	28.37
B-11	义 160	3594.4	Es ₄	白云石	0.70967	64.56	35.44
B-12	义 160	3595.5	Es ₄	方解石	0.7075	78.12	21.88
B-14	义 160	3598.47	Es ₄	方解石	0.70814	74.12	25.88
B-26	义 160	3607	Es ₄	方解石	0.70707	80.81	19.19
B-28	义 160	3610	Es ₄	方解石	0.70706	80.87	19.13
B-30	义 160	3612.12	Es ₄	铁白云石	0.70683	82.31	17.69
B-34	义 160	3678.69	Es ₄	方解石	0.70629	85.69	14.31
B-35	义 160	3679.29	Es ₄	方解石	0.70716	80.25	19.75
B-37	义 160	3680.09	Es ₄	方解石	0.70687	82.06	17.94
B-39	义 160	3682	Es ₄	方解石	0.70828	73.25	26.75
B-52	义 170	3811.87	Es ₄	铁白云石	0.71024	61	39
B-40	义 170	3825	Es ₄	铁白云石	0.70704	81	19
B-61	渤深 5	4760	Es ₄	铁方解石	0.70764	77.25	22.75
B-62	渤深 5	5138	Es ₄	铁方解石	0.70986	63.37	36.63
渤深 4	渤深 4	5447	Es ₄	方解石	0.71038	60.12	39.88

奥陶系来源的具较高 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 碳酸盐碎屑,而溶样时将其误认为胶结物,结果造成样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值偏高(但仍低于0.720)。由于碳酸盐碎屑中的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 并不能反映沉积成岩时介质环境,故应将其剔除;黄思静(1997)认为这3块样品 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏高,可能与溶样时,无法排出混入具高 ^{87}Sr 含量绿泥石等铝硅酸盐矿物有关,剔除是合理的。剔除后沙四段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为0.7077,沙四下亚段为0.70715,沙四上亚段为0.708003。

2.2 C、O同位素

2.2.1 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 对 $\delta^{13}\text{C}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的研究为认识地质历史时期的气候变化,海水(湖水)原始C、O同位素的组成,陆地和海洋生物盛衰的长期变化,以及利用C、O同位素组成来重建地质历史海洋(湖盆)的温盐环流特征等一些重大问题提供了科学依据。

(1) $\delta^{13}\text{C}$ 受成岩作用影响较小,能较好地保存其沉积时原始环境中 $\delta^{13}\text{C}$ 值、较好地反映原始介质特征,一般来说 ^{13}C 的富集程度随碳原子氧化程度的增加而增强, $\delta^{13}\text{C}$ 偏负的程度是环境闭塞程度和还原强度的标志。前人研究表明3点:①来源于地幔气或岩浆者偏重,把幔源碳的变化范围定为 $-4.7\text{‰} \sim -8.0\text{‰}$,Taylor(1986)把岩浆和幔源碳的变化范围定为 $-3\text{‰} \sim -9\text{‰}$,且有证据表明,在相对封闭体系中,岩浆和地幔脱气产生的 CO_2 与固体相比在C同位素组成上差别很小;②来源于有机碳者偏轻, $\delta^{13}\text{C}$ 平均为 -22‰ ;③来源于沉积岩中碳酸盐岩分解或含盐卤水与泥质相互作用者,其中海相碳酸盐 $\delta^{13}\text{C}=0$,淡水浮游生物 $\delta^{13}\text{C}=-27\text{‰} \sim -32\text{‰}$,陆生植物为 -25‰ 。

(2) $\delta^{18}\text{O}$ 受成岩作用影响较大,既具有“年代效应”,又具有“成岩效应”。年代效应表现为 $\delta^{18}\text{O}$ 是地质时代的函数,即 $\delta^{18}\text{O}$ 组分随地质时代变化的效应,时代愈老, $\delta^{18}\text{O}$ 愈小(张理刚,1985),反映海水同位素组分本身随地质年代的变化。成岩效应表现为:①与大气淡水发生同位素交换,且年代愈老,交换机会愈多,导致碳酸盐中 $\delta^{18}\text{O}$ 值降低,致使碳酸盐 $\delta^{18}\text{O}$ 值负向漂移;②碳酸盐岩沉积后发生重结晶和新生变形作用,文石变为方解石,高镁方解石转变为低镁方解石等使 $\delta^{18}\text{O}$ 降低;③随埋深加大、地温增高、成岩作用增强,使 $\delta^{18}\text{O}$ 降低;但随盐度的升高, $\delta^{18}\text{O}$ 相应地增大;④有机组份的加入,也降低 $\delta^{18}\text{O}$ 值;⑤大气降水初始值 $\delta^{18}\text{O}=-16\text{‰}$,海水

$\delta^{18}\text{O}=0$,岩浆水为 $6\text{‰} \sim 9\text{‰}$,变质水为 $5\text{‰} \sim 25\text{‰}$;碳酸盐胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 低值域与海平面下降对应,高值域与最大海泛面对应;⑥由于O同位素变化范围较大,具漂移特征,因此在研究过程中应考虑水-岩相互作用过程中同位素交换效应。

2.2.2 实验样品、实验方法及测试结果 实验样品与Sr同位素样品对应,共19块。采用磷酸法分解碳酸盐矿物,利用反应生成的 CO_2 进行C、O同位素的质谱测定。样品中的硅酸盐杂质既不与磷酸也不与磷酸生成的粘稠物质反应,故不影响 CO_2 的质谱分析。采用MAT252同位素质谱计。对标准样品相对分析误差为: $\delta^{13}\text{C}:\pm 0.001\%$, $\delta^{18}\text{O}:\pm 0.002\%$,测试结果如表2所示。同样B₅₂、B₆₃号2块样品,由于含有寒武、奥陶系碳酸盐碎屑,因此在 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 分析时应谨慎。

3 C、O、Sr同位素所反映的深部储层信息

流体是无机和有机作用相互交叉和联系的纽带,是研究金属矿床成矿理论和油气藏形成理论的结合点。在地质历史中,不同时代地层内经常有热液活动,尤其与构造有关的热液活动是普遍的地质现象,如金属热液矿床;但是要发现和研究沉积、成岩期的古热液活动并非易事。本文尝试利用C、O、Sr同位素所反映的深部储层信息,探讨渤南洼陷深部储层的形成环境。

3.1 渤南洼陷深部储层信息

(1)从渤南洼陷 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 最小二乘方拟合曲线图1可知整个沙四段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值与深度相关性极差,相关系数 $R^2=0.3928$,表明沙四段内 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 不是深度的函数,仅反映碳酸盐胶结物形成时沉积介质Sr同位素组成。

(2)Faure(1986)统计了大量玄武岩、硅铝质岩 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值,它们的平均值分别为: 0.704 ± 0.002 、 0.720 ± 0.005 。该区沙四段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 平均值为0.7077,显著负偏于深部幔源锶端元,反映了该区沙四段形成时地壳运动强烈(济阳运动)、郯庐大断裂活跃、火山活动频繁剧烈。深部热液循环对流,不仅提供了能量,而且提供了物质,参与了盆地内的水-岩反应,致使渤南洼陷沙四段沉积成岩时,环境介质富幔源Sr,造成碳酸盐胶结物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 值偏低。

(3)第二条定性地说明了沙四段碳酸盐胶结物中的Sr受幔源流体的影响,下面定量计算一下幔源

表 2 渤南洼陷碳酸盐胶结物碳、氧同位素分析数据
Table 2 $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ analytical result of carbonate cement from Bonan subsag

样品	井号	深度/m	层位	胶结物	$\delta^{13}\text{C}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}/\text{‰}$	$\delta^{18}\text{O}_{\text{SMOW}}/\text{‰}$	Z	$\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}/\text{‰}$
B-58	义 17	3430.9	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁方解石	-4.99	-7.959	22.655	113	8.056
B-56	义 17	3515.7	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁方解石	-3.23	-9.208	21.368	116	6.769
B-8	义 160	3579.49	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁方解石	-2.43	-17.052	13.282	114	-1.317
B-9	义 160	3582.2	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-2.84	-11.723	18.775	116	4.176
B-11	义 160	3594.4	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	白云石	-5.3	-16.759	13.584	108	-1.015
B-12	义 160	3595.5	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-5.81	-16.222	14.137	107	-0.462
B-14	义 160	3598.47	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-7.59	-10.448	20.090	107	5.491
B-26	义 160	3607	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-6.53	-8.792	21.797	110	7.198
B-28	义 160	3610	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-6.86	-14.877	15.524	106	0.925
B-30	义 160	3612.12	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁白云石	-7.21	-15.58	14.799	105	0.200
B-34	义 160	3678.69	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-5.27	-8.877	21.709	112	7.110
B-35	义 160	3679.29	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-7.15	-17.757	12.555	104	-2.044
B-37	义 160	3680.09	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-4.38	-14.26	16.160	111	1.561
B-39	义 160	3682	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-6.22	-13.55	16.892	108	2.293
B-52	义 170	3811.87	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁白云石	-8.57	-18.691	11.592	100	-3.007
B-40	义 170	3825	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁白云石	-6.03	-14.47	15.943	108	1.344
B-61	渤深 5	4760	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁方解石	3.266	-11.043	19.476	128	4.877
B-62	渤深 5	5138	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	铁方解石	-4.43	-6.49	24.170	115	9.571
B-63	渤深 4	5447	$\text{E}_{\text{s}_4}^{\text{s}}$	方解石	-5.91	-19.596	10.659	105	-3.940

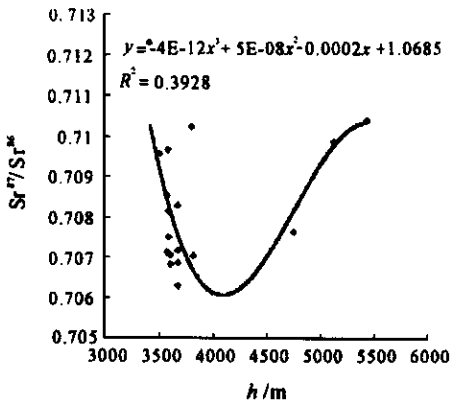


图 1 渤南洼陷沙四段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 趋势分析图
Fig.1 The trend map of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ from the Shasi member in Bonan subsag

流体的贡献。根据同位素质量平衡原理可以写出：
$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{SW}} = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{m}} \cdot M + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{V}} \cdot V + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{S}} \cdot S$$

其中 SW 、 m 、 v 、 s 分别代表海水(湖水)、碳酸盐重溶、年青火山岩、古老硅铝质岩石； M 、 V 、 S 分别代表碳酸盐重溶、年青火山岩和古老硅铝质岩石来源 Sr 的百分含量。

据此方程可估算出不同地质时期湖水(海洋) Sr 的相对数量关系,前面已论述 m 项,即碳酸盐重溶可忽略不计,则碳酸盐胶结物锶同位素质量平衡方

程可简化为：
$$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{SW}} = (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{V}} \cdot V + (^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_{\text{S}} \cdot S$$

据此方程可计算出碳酸盐胶结物中幔源锶、大陆硅铝壳所提供锶的份额。由表 1 可看出其平均值为 0.7077 时,幔源 Sr 所占的比例为 76.87%,大陆硅铝质来源 Sr 所占的比例仅为 23.13%,前者为后者的 3.3 倍,由此可见,深部热流体在沙四段沉积成岩时起到了重要的作用,即渤南洼陷沙四段沉积成岩主要受深部热流体控制,应将其纳入沉积盆地动力学研究范畴,从沉积盆地动力学角度来探讨深部储层形成机理。

(4)虽然沙四段整体上 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 偏低,其平均值为 0.7077,与深度相关系数极差,但沙四上亚段与沙四下亚段仍有差别,沙四下亚段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值为 0.70715,沙四上亚段 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 均值为 0.708003,反映了沙四下构造运动、火山运动较剧烈,形成红色类磨拉石沉积建造,而沙四上构造运动、火山运动相对较平缓,形成内陆湖相沉积建造。

3.2 C、O 同位素数据证明了深部热流体参与了成岩作用

(1)由渤南洼陷沙四段碳酸盐胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 最小二乘方拟合图 2、图 3 可知 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 与深度相关性不强,相关系数 R^2 分别为 0.4945 和 0.4548,即受深度影响较小。

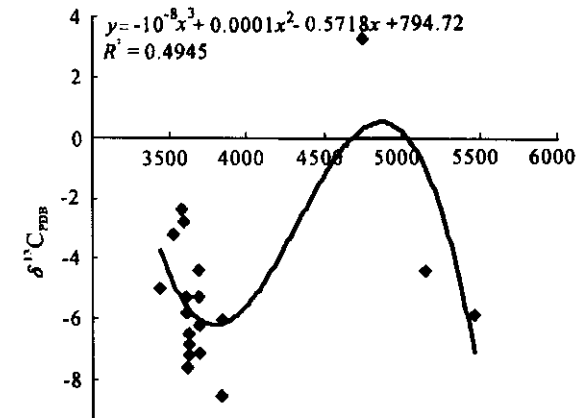


图2 渤南洼陷沙四段 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素趋势分析图
Fig.2 The trend map of $\delta^{13}\text{C}$ from the Shasi member in Bonan subsag

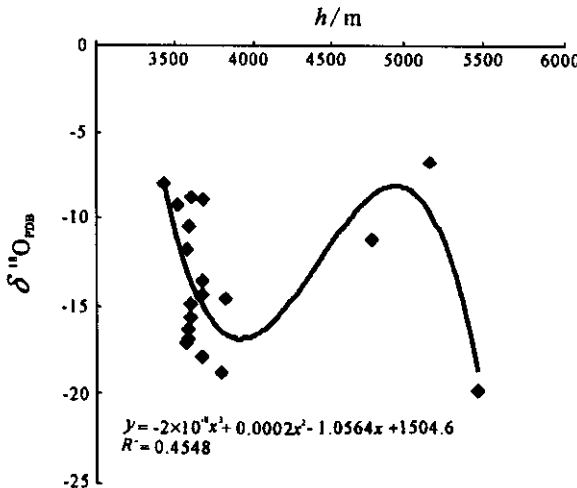


图3 渤南洼陷沙四段 $\delta^{18}\text{O}$ 同位素趋势分析图
Fig.3 The trend map of $\delta^{18}\text{O}$ from the Shasi member in Bonan subsag

(2) 由于碳酸盐体系是有机二氧化碳和无机二氧化碳的储存体, C 同位素的贫乏或富集是通过有机物的氧化反应或发酵反应或深部热流体的作用引起的, 因此碳酸盐矿物中的 $\delta^{13}\text{C}$ 值特征可指示 C 的来源。分析数据表明, 方解石胶结物 $\delta^{13}\text{C}$ 介于 $-8.57\text{‰} \sim 3.266\text{‰}$ 之间, 平均为 -5.13‰ , 这说明碳酸盐胶结物中有机来源碳所占比例较少, 即碳酸盐胶结物形成时仅有少量有机碳的参与, 相反主要来自于深部热流体的无机碳。因此铁碳酸盐形成时可能主要受深部热流体场控制; 或者目前碳酸盐中二价铁的存在可能是早期方解石在深埋期又经历了新的变化, 从泥岩中或从深部热流体中吸收 Fe^{2+} 、 Mg^{2+} , 形成含铁碳酸盐矿物, 而受油气的影响较小。

另外包裹体测试技术也显示, 一般以单相水包裹体为主, 很少见到有机包裹体, 盐度高达 5.25%, 也就是说碳酸盐胶结物形成时主要受深部热流体场控制, 再一次证明渤南洼陷沙四段沉积成岩作用受深部流体场左右。

(3) 根据(铁)方解石-水的 O 同位素分馏方程, 可计算出方解石胶结物沉淀时水介质的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 可直接反映当时水介质特征。根据胜利油田研究院包裹体测温资料(蔡进功, 1998)可知方解石胶结物包裹体均一温度为 $120\text{ }^\circ\text{C}$, 则依据公式:

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{方}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{水}} = -3.40 + 2.78 \times 10^6 / T^2$$

可计算出方解石沉淀时水介质 $\delta^{18}\text{O}$ 介于 $-3.940\text{‰} \sim 9.571\text{‰}$ 、平均为 2.515‰ (表 2)。式中, T 为温度。证明渤南洼陷沙四段成岩时受大气降水影响极小, 而主要受深部热流体场控制。同时渤南洼陷深层油田水以 CaCl_2 型为主, 而未发现有有机型水。

(4) 根据划分海相和淡水相灰岩的经验公式:

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

从而计算出各样品 Z 值(表 2)。除 B61 号样品为 128 外, 其余 18 个样品均小于 120, 反映为卤水浓度较高的半咸水湖相环境。

总之, 渤南洼陷早第三纪普遍存在着与亚碱性-碱性岩浆有关的沉积、成岩期热液活动, 它们不同于一般的脉状热液沉积, 而是广泛参与和控制了(一定范围内)有机质演化、孔隙演化、成岩作用, 乃至成藏作用。

参 考 文 献

陈丽华, 姜在兴. 1994. 储层实验测试技术. 北京: 石油大学出版社.
黄思静. 1997. 上扬子台区晚古生代海相碳酸盐岩碳、锶同位素. 地质学报, 71(1): 45~52.
刘季花, 陈迎蓉, 梁宏锋等. 1999. 东太平洋早中新世 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 $\text{Ca}-\text{CO}_3$ 的短周期旋回及其古海洋学意义. 沉积学报, 17(增刊): 790~793.
李心青, 万国江. 1994. 碳酸盐岩氧、碳稳定同位素地球化学研究目前面临的几个问题. 地球科学进展, 14(3): 262~266.
尹观, 王成善. 1998. 西藏南部中白垩世的锶、硫同位素组成及其古海洋地质意义. 沉积学报, 16(1): 107~111.
吴富强, 李后蜀, 胡雪等. 2002. 渤南洼陷沙四亚段含油气系统探讨. 石油勘探与开发, 29(3): 29~31.
吴富强, 鲜学福, 李后蜀等. 2003. 胜利油区渤南洼陷沙四上亚段深部储层形成机理探讨. 石油学报, 24(1): 44~48.