

文章编号:1673-5005(2008)04-0019-05

咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布

金 强¹, 朱光有², 王 娟¹

(1. 中国石油大学 地球资源与信息学院, 山东 东营 257061; 2. 中国石油勘探开发研究院, 北京 100083)

摘要:应用沉积学、地球化学理论和油源对比等方法,对我国咸化湖盆优质烃源岩的形成与分布进行了研究。结果表明,断陷湖盆和前陆湖盆优质烃源岩(有机质含量特别高的烃源岩)是与碳酸盐、硫酸盐和氯化盐等蒸发盐类矿物相伴生的,有机质沉积的有利环境是半咸水、咸水和盐水湖泊。湖水在重力作用下易形成盐度分层,表层水盐度小,适于广盐和嗜盐性浮游生物的生存;深水部位的底层水盐度大、缺乏游离氧,适于有机质的保存;表层水生物高产率区与底层水缺氧区的叠合部位就是优质烃源岩的发育区。由气候变化引起的突发性洪水会破坏分层水体,使得湖水淡化,形成有机质含量较低的烃源岩,因此咸化优质烃源岩与淡化普通烃源岩常呈互层分布,咸化沉积物数量越多,生烃潜力越大。

关键词:咸化湖泊; 分层水体; 缺氧环境; 优质烃源岩; 分布特征

中图分类号:TE 122.115

文献标识码:A

Deposition and distribution of high-potential source rocks in saline lacustrine environments

JIN Qiang¹, ZHU Guang-you², WANG Juan¹

(1. Faculty of Geo-Resource and Information in China University of Petroleum, Dongying 257061, Shandong Province, China;

2. Exploration and Development Research Institute, PetroChina, Beijing 100083, China)

Abstract: Investigations of sedimentology and geochemistry as well as oil-source correlation show that major source rocks in non-marine basins are deposited in saline lakes and interbedded with carbonates, sulfates or chlorates. The source rocks are rich in organic matter, and often called high-potential source rocks. In other words, the high-potential source rocks are deposited in semi-saline, saline or super-saline lacustrines. In these saline lacustrines, water column is stratified by gravity for salinities. The surface water is in fresh or semi-saline, and suitable for living of euryhalinous organism. The bottom water at deep part of the lake is in super-saline and anoxic status, and is the best condition for preservation of deposited organic matter. If an area in the lake meets both high productivity of organism in the surface water and anoxic condition in the bottom water, the area is an ideal for accumulation of the high-potential source rocks. When the high-potential source rocks are buried into oil-generation window, they become into real hydrocarbon kitchens and control on distribution of oil and gas in the basins.

Key words: saline lake; stratified water column; anoxic condition; high-potential source rock; distribution characteristic

50 年前,我国老一代油气地质学家提出的陆相生油论对世界石油地质理论作出了巨大贡献^[1],当时人们认为大型淡水湖泊是陆相优质烃源岩形成的有利环境^[2],并且多次被写入教科书^[3,4]。然而越来越多的研究表明,无论是东部断陷盆地还是西部

拗陷盆地,有机质丰度高(有机质丰度 $TOC > 1\%$)的烃源岩均不同程度地与碳酸盐、硫酸盐或氯化盐矿物共生,有时优质烃源岩与碳酸盐富集层或膏盐层呈互层状态分布^[5-7]。也就是说,有机质沉积、保存的环境,即优质烃源岩的形成与湖盆咸化作用或

收稿日期:2008-01-18

基金项目:国家自然科学基金项目(40572084)和国家重大基础研究项目(2001CB209102)

作者简介:金强(1956-),男(汉族),江西丰城人,教授,博士,博士生导师,从事油气地质和地球化学研究。

超盐度环境有关,而非淡水环境。例如,松辽盆地青一段和嫩一段是公认的主力烃源岩,近十多年的研究表明这两段的沉积与海侵作用有关,可能是咸化湖盆缺氧环境的产物^[8],其中有机质富集层中碳酸盐含量超过 15%,而且油页岩就是由粘土质碳酸盐纹层与富有机质的粘土纹层所组成。鄂尔多斯盆地三叠系原先被认为是大型淡水湖泊沉积,其中的延长组由 5 个段组成,延二和延三段是烃源岩集中段,也是碳酸盐含量较高的层段,应是咸化环境的沉积。实际上,中国中生代陆相盆地(渤海湾盆地、柴达木盆地、江汉盆地、苏北盆地和珠江口盆地等)除煤系沉积之外,优质烃源岩均与咸化湖盆有关。笔者对渤海湾盆地的济阳凹陷和柴达木盆地西部古近系优质烃源岩的形成与分布规律进行研究,目的在于为油气资源的预测工作提供帮助。

1 优质烃源岩的形成

实际上,除湖沼成煤环境外,许多陆相优质烃源岩均与湖盆水体的咸化有关。湖盆水体始终处于大气降水(包括河流注入)和蒸发作用的平衡体系中,如果蒸发作用大于前者,则导致水体浓缩而咸化,随着盐度的增加会在湖底产生碳酸盐-硫酸盐-氯化盐等蒸发岩序列沉积。沉积学家依据湖泊表层水的盐度不同,将湖泊分成淡水湖(盐度小于 0.1%)、半咸水湖(盐度为 0.1%~1.0%)、咸水湖(盐度为 1.0%~3.5%)和盐水湖(盐度大于 3.5%)^[9]。依据湖底沉淀的盐类化学组成和主要蒸发盐类的溶解度(表 1),可以定义出碳酸盐湖(湖底有碳酸盐沉积)、硫酸盐湖(湖底有石膏沉积)和氯化盐湖(湖底有石盐沉积)。

表 1 湖盆沉积条件下主要蒸发盐类的溶解度

碳酸盐(CaO)		石膏		石盐	
温度 $\theta/^{\circ}\text{C}$	溶解度 $\rho_{\text{碳酸盐}}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	温度 $\theta/^{\circ}\text{C}$	溶解度 $\rho_{\text{石膏}}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	温度 $\theta/^{\circ}\text{C}$	溶解度 $\rho_{\text{石盐}}/(\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$
0	1.30	0	2.17	0	35.7
15	1.22	10	2.13	10	36.2
25	1.13	20	2.04	20	36.8

实际上,有机质沉积的影响因素很多,最重要的是高(水生)生物产率和缺氧条件,两者的叠合区就是理想的优质烃源岩发育区。然而,缺氧环境(水体中游离氧含量小于 0.5 mL/L)中浮游生物是不能生存的,同时特别咸的水也不利于大多数浮游生物的生存,烃源岩一般形成于盆地稳定沉降期的较深

水部位。现代深水盐湖或咸化湖泊的研究表明,水体在重力作用下形成上下盐湖不一致的、具有相对长久的分层现象^[10],表层水盐度小(交替出现淡水和半咸水),深水部位的底层水盐度很大(达到石盐的饱和浓度),中层水体盐度变化大,称为盐跃层。表层水与大气接触溶解氧含量高,适于嗜盐性生物繁衍,而且嗜盐性藻类个体大、产率高^[22]。由于分层结构的稳定性,底层水基本不与表层水发生交换,微生物的呼吸作用使得游离氧消耗殆尽,所以是缺氧环境。缺氧水体与表层高生物产率水体在垂向上出现叠置区,形成了有利于有机质沉积和保存的最佳环境,从而导致优质烃源岩的形成(如东非裂谷中的基伍湖深水部位沉积物 TOC 值可达 17.5%,而且藻类占有机质的 75% 左右^[10])。

我国东部和西部古近系咸化湖泊的优质烃源岩形成条件基本与现代盐湖相同,但是第三纪盐湖的咸化程度不同,发育了不同的分层水体:(1)当盐类来源充足时(如东濮凹陷北部沙河街组)或蒸发作用强烈时(如柴达木盆地西部渐新世一中新世),表层水为半咸水一咸水,深部底层水为卤水(氯化盐或硫酸盐),这时沉积中心有膏盐岩沉积,也有有机质堆积,因为这里是高生物产率与缺氧环境的叠加区,因此与膏盐层互层的泥页岩富含有机质,常常为优质烃源岩;(2)当陆源碎屑供应很少并且蒸发作用不是特别强烈(如渤海湾盆地沙一段)时,表层水为淡水一半咸水,局部底层水盐度达到碳酸盐的结晶浓度,也形成分层水体,湖底形成富含碳酸盐和有机质的沉积物(泥灰岩、钙质泥岩、油页岩等)。咸化湖盆浅水部位主要由表层水或盐跃层覆盖,虽然表层水可能具有生物高产率,但是湖底不具备缺氧条件,沉积有机质得不到有效保存,因此没有优质烃源岩形成。

2 济阳凹陷优质烃源岩沉积特征

经过深入的油源对比,确认控制东营凹陷油气成藏的有效烃源岩分布在沙河街组沙四段上部 and 沙三段下部^[11],它们分别是盐湖相、咸水和半咸水湖相沉积^[12]。其中 TOC>2% 的优质烃源岩主要岩性为与膏盐层或碳酸盐纹层呈互层的含钙泥页岩、碳酸盐含量在 21% 以上的油页岩、钙质泥岩等。这些烃源岩的有机质主要为藻类组成的 I 和 II₁ 型干酪根,具有很高的生烃潜力(表 2)。

表 2 东营凹陷优质烃源岩岩性和有机质性质参数

层位	岩性	湖水性质	TOC/%	生烃潜力 $S_1 + S_2 / (mg \cdot g^{-1})$	有机质类型	显微组分
沙三中下部	含钙泥页岩	半咸水	0.91 ~ 3.19	98 ~ 215	Ⅱ ₁ , Ⅱ ₂	Alg + Vit
沙三下	钙质泥岩	咸水	1.53 ~ 6.78	162 ~ 328	Ⅱ ₁	Alg + 少量 Vit
沙三上	油页岩	咸水	4.65 ~ 13.75	356 ~ 523	I	Alg
沙四上	含钙-钙质泥岩	咸水-盐湖	2.19 ~ 5.37	217 ~ 482	I, Ⅱ ₁	Alg, 微量 Vit

注:Alg 为藻质组;Vit 为镜质组。

济阳坳陷沙三段中上部泥页岩中碳酸盐含量较低,主要为淡水沉积,其 TOC 值基本在 1% 左右。沙一段泥页岩的碳酸盐含量比较高,常见的有薄层泥灰岩,其中半数以上的泥页岩 TOC 值超过 2%;由于埋藏较浅,基本处于未成熟状态,油气生成潜力小,其潜在烃源岩是在半咸水—咸水环境中形成的^[13]。

上述咸水—盐水湖相烃源岩沉积和地化特征在沾化凹陷、惠民凹陷和车镇凹陷均适用,而且膏盐岩分布在洼陷的深水部位,富含碳酸盐的砂泥岩分布在洼陷的次深水部位。换句话说,洼陷或部位中的膏盐岩、碳酸盐发育,优质烃源岩就发育,并且可形成有利的油气源灶;膏盐岩不发育或碳酸盐含量较低的洼陷和部位,优质烃源岩也不发育,油气资源不

丰富,如东营凹陷的花沟地区等^[14]。

由于裂谷盆地的构造分割性,一个坳陷由若干凹陷组成,一个凹陷又由若干没有明显隔栏的洼陷组成。湖盆咸化期水体较深的洼陷盐度大,缺氧条件优越,优质烃源岩发育;水体较浅的洼陷盐度小,缺氧程度变小,烃源岩有机质丰度降低(图 1(a))。又由于裂谷盆地碎屑物质的近源性,季节性的洪水可以将大量碎屑物带入盆内,甚至形成浊流,导致湖盆水体淡化,盐度分层结构破坏,湖盆深处缺氧环境消失,沉积事件性的砂泥岩或浊流,形成纵向上的咸化湖盆沉积(以优质烃源岩为主)与淡化砂泥岩互层的沉积现象(图 1(b))。

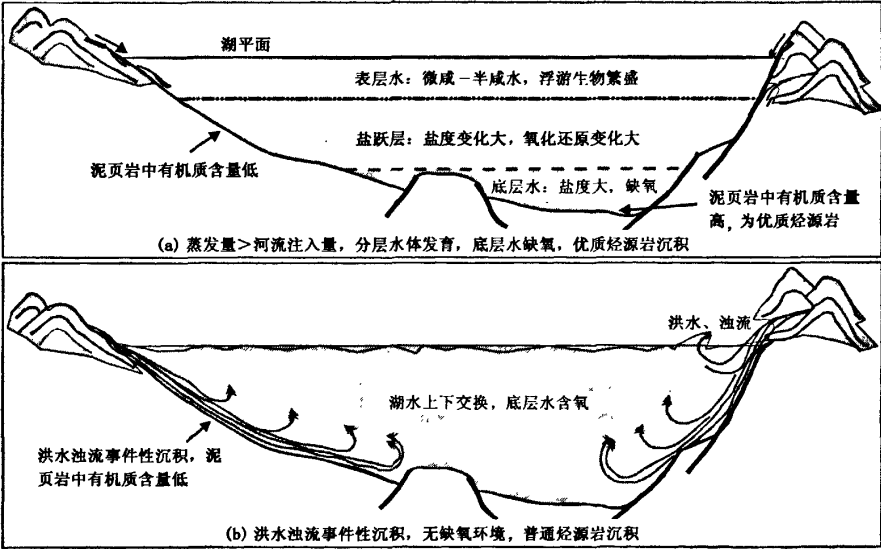


图 1 裂谷盆地咸化期水体分层烃源岩沉积模式(a)和洪水期砂泥岩沉积模式(b)

3 柴达木盆地西部优质烃源岩沉积特征

从渐新世到中新世,柴达木盆地一直处于干旱—半干旱状态,在面积广阔的咸水—盐湖环境里,形成了富含碳酸盐、硫酸盐和氯化盐并具有蒸发岩圈层结构的砂泥岩沉积^[15],即盆地边缘为冲积相砂泥岩沉积,然后是广阔的碳酸盐含量较高的滨浅湖

相砂泥岩和泥灰岩沉积,中心部位是硫酸盐、氯化盐与深湖—半深湖相泥页岩沉积。其中,碳酸盐圈层中的暗色泥页岩、泥灰岩的 TOC 值为 0.1% ~ 0.6% (平均值在 0.33% 左右),有机质类型以Ⅲ和Ⅱ₂型为主,生烃潜力小($S_1 + S_2$ 为 0.2 ~ 75 mg/g);沉积中心部位(如狮子沟—花土沟一带)的深灰—黑色含膏盐的钙质泥岩、泥灰岩和页岩是主力烃源岩,其 TOC 值为 0.6% ~ 2.3% (平均值约为 0.96%),有

机质类型以Ⅱ₁和Ⅰ型为主,生烃潜力较大($S_1 + S_2$ 值为98~357 mg/g),被认为是柴达木盆地西部已发现油气藏的烃源灶^[6,16]。也就是说,柴达木盆地西部第三系优质烃源岩分布在膏盐(硫酸盐和氯化盐)发育的盐度很大的盐湖相内。近期,作者利用有机地球化学和测井信息的对应关系对柴达木盆地西部第三系烃源岩进行了精细评价,同时还进行了油源对比,发现下干柴沟组 TOC 值大于1%的优质烃源岩形成的烃源灶对周围油气藏的形成具有明显的控制作用,而那些有机碳含量较低($TOC < 0.6\%$)的生油岩与周围油藏基本没有亲缘关系。

上新世以来,柴达木盆地湖水咸化的特点与渐新世—中新世基本一致,但是咸化程度很高的沉积中心先向北西、然后向东部移动,盐湖相沉积及其优质烃源岩随之迁移,形成了柴达木中东部的生物成因和低成熟天然气的生成和聚集^[17]。但是柴达木盆地西部是昆仑山和阿尔金山的山前盆地,内部没有分隔,比较平坦,只是受11号断裂影响,在渐新世期间狮子沟—茫崖一带为沉积中心,水体较深,盐度较大,硫酸盐、氯化盐均沉积在此带,优质烃源岩也

沉积在此带。其他地区为宽缓的斜坡,盐度相对较小,缺氧条件相对差,沉积的泥灰岩、钙质泥岩有机质丰度低。当蒸发量持续大于河流输入量时,湖平面下降,沉积中心底部湖水浓缩成卤水,有石膏和岩盐析出,并且成为强烈的缺氧环境,有利于形成有机质丰度高的烃源岩,而湖盆边缘出露大气,有古土壤形成。当雨季来临时,河流注入量大于蒸发量,湖平面上升,湖盆范围扩大,水体盐度降低,硫酸盐和氯化盐停止沉淀,在宽缓的湖盆区域沉积碳酸盐岩、泥灰岩和钙质泥岩等。由于水体浅、缺氧条件差,沉积物中有机质含量低,又由于河流注入的能量有限,没有出现浊流沉积,狮子沟—茫崖一带仍然具有较好的盐度分层水体,还是较好的缺氧环境,仍然有优质烃源岩形成。也就是说,前陆盆地咸化湖盆面积时大时小,沉积中心分层水体结构变化不大,其底层水盐度大,缺氧条件好,有利于优质烃源岩堆积;其他区域水体盐度有一定变化,但是基本处于碳酸盐可析出的环境,缺氧条件相对差,不利于优质烃源岩的形成(图2)。

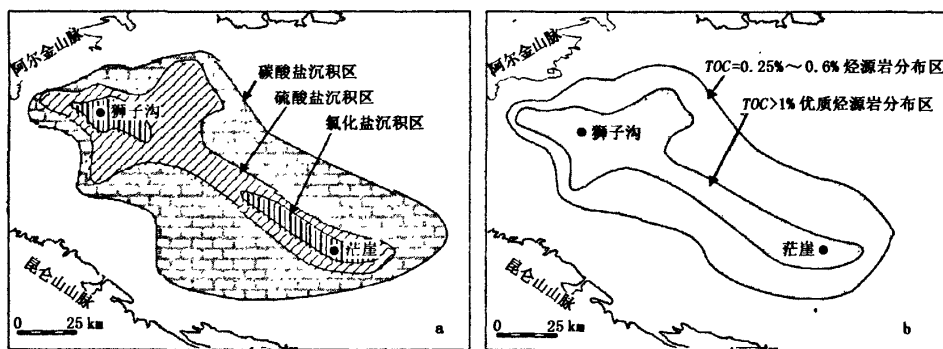


图2 柴达木盆地西部渐新世蒸发岩(a)与优质烃源岩(b)展布特点

4 结 论

(1)当蒸发量大于河流注入量时,湖盆出现咸化作用,咸化湖泊深水区域有利于陆相优质烃源岩形成,这种优质烃源岩一般是盆地中主力烃源岩。

(2)无论是东部裂谷盆地还是西部的前陆盆地,由气候变化引起的突发性洪水会破坏湖盆分层水体,使得湖水淡化,此时形成的暗色泥页岩有机质丰度和生烃潜力稍差,因而在剖面上形成咸化优质烃源岩与淡化普通烃源岩互层的现象。

(3)咸化湖盆有机质堆积和优质烃源岩沉积作用的研究成果可以推广应用于海相盆地的烃源岩研究中。虽然我国古生代地台型海相烃源岩有机质丰

度总体较低,但是在一些局限海域可以出现水体分层、有机质含量高的优质烃源岩。

参考文献:

- [1] 石宝珩. 陆相生油理论的由来和发展[J]. 石油勘探与开发, 1981, 8(3): 14-17.
SHI Bao-heng. Origin and development of non-marine petroleum generation theory[J]. Petroleum Exploration and Development, 1981, 8(3): 14-17.
- [2] 锦言. 我国陆相生油岩的若干基本地质特征及其形成条件[J]. 地质学报, 1977, 51(1): 19-28.
JIN Yan. Basic geological characteristics of non-marine source rocks in China and their depositional conditions [J]. Acta Geologica Sinica, 1977, 51(1): 19-28.

- [3] 西北大学石油地质教研室. 石油地质学[M]. 北京:地质出版社,1979.
- [4] 张厚福,张万选. 石油地质学[M]. 第二版. 北京:石油工业出版社,1989.
- [5] POWELL T G. Petroleum geochemistry and depositional settings of lacustrine source rocks[J]. Marine and Petroleum Geology, 1986,3(2):200-219.
- [6] 金强,查明. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩的共生沉积作用研究[J]. 地质科学, 2000,35(4):465-473.
- JIN Qiang, ZHA Ming. Co-deposition of Tertiary evaporates and source rocks in the west part of Qaidam Basin[J]. Geological Science, 2000,35(4):465-473.
- [7] 朱光有,金强,周建林,等. 东营断陷湖盆充填过程对烃源岩的控制作用研究[J]. 地质地球化学,2003,31(2):73-79.
- ZHU Guang-you, JIN Qiang, ZHOU Jian-lin, et al. Depositional filling process and its control on source rocks in the Dongying depression[J]. Geology and Geochemistry, 2003,31(2):73-79.
- [8] 黄清华,叶得泉,侯启军. 松辽盆地中生代地质事件与生物演化[C]//程裕淇. 第三届全国地层会议论文集. 北京:地质出版社,2000:322-325.
- [9] 柳大纲,陈敬清,张长美. 柴达木盆地盐湖类型和水化学特征[J]. 盐湖研究,1996,4(3/4):9-19.
- LIU Da-gang, CHEN Jing-qing, ZHANG Chang-mei. Classification of saline lakes and characteristics of lake water chemistry in the Qaidam Basin[J]. Salt Lake Study, 1996,4(3/4):9-19.
- [10] DEGENS E T, STOFFERS P. Stratified waters as a key to the past[J]. Nature, 1976,263:22-27.
- [11] 朱光有,金强. 东营凹陷两套优质烃源岩层地质地球化学特征研究[J]. 沉积学报,2003,21(3):416-420.
- ZHU Guang-you, JIN Qiang. Geological and geochemical characteristics of the two sets of source rocks in the Dongying depression[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2003,21(3):416-420.
- [12] 张林晔. 济阳拗陷优质烃源岩特征及其分布规律[C]//第九届全国有机地球化学会议学术委员会编. 陆相油气地球化学研究进展——第九届全国有机地球化学会议论文集. 北京:石油工业出版社,2003:176-182.
- [13] 王秉海,钱凯. 胜利油区地质研究与勘探实践[M]. 东营:石油大学出版社,1992.
- [14] 梁书义,李晓清. 博兴地区油气成藏系统研究[J]. 油气地质与采收率,2003,10(1):29-31.
- LIANG Shu-yi, LI Xiao-qing. Petroleum system in the Boxing area[J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2003,10(1):29-31.
- [15] JIN Qiang, ZHA Ming, LIU Zheng, et al. Geology and geochemistry of source rocks in the Qaidam Basin, NW China[J]. Journal of Petroleum Geology, 2002,25(2):219-238.
- [16] 黄杏珍,邵宏舜,顾树松. 柴达木盆地的油气形成与寻找油气田方向[M]. 兰州:甘肃科学技术出版社,1993:152-226.
- [17] 张晓宝,胡勇,马立元,等. 柴达木盆地西部第三系盐湖相天然气碳同位素特征、成因与分布[J]. 中国科学(D辑),2002,32(7):598-608.
- ZHANG Xiao-bao, HU Yong, MA Li-yuan, et al. Carbon isotope compositions of natural gases from saline sediments in Qaidam Basin and their origin and distribution[J]. China Science (ser D), 2002,32(7):598-608.

(编辑 刘艳荣)

“牛庄洼陷沙二段隐蔽圈闭成因及油气藏分布规律研究”通过省级鉴定

近日,山东省科学技术厅委托东营市科学技术局组织专家对“牛庄洼陷沙二段隐蔽圈闭成因及油气藏分布规律研究”进行了鉴定。

由中科院刘宝瑞院士为主任委员、中科院秦蕴珊院士为副主任委员的鉴定委员会一致认为“牛庄洼陷沙二段隐蔽圈闭成因及油气藏分布规律研究”整体上达到国际先进水平,在“四图叠合”多因素隐蔽油气藏的综合勘探方法等方面达到国际领先水平。

“牛庄洼陷沙二段隐蔽圈闭成因及油气藏分布规律研究”在湖相三角洲的分类及演化、滩坝沉积模式以及“四图叠合”多因素隐蔽油气藏的综合勘探方法等方面具有重要创新。该项目自2001年开始应用于牛庄洼陷沙二段的勘探开发中,自2002年开始又先后在王家港油田以及现河庄油田进行了应用,成功预测和探明了河斜167块和王543块两个含油区块,累积新增含油面积3.9 km²,累积探明石油储量181万t,已建成产能8.7万t/a,取得了良好的勘探成效。

(科技处 焦念友供稿)