

蒸发岩盆地油气藏的形成

赵小庆, 郑绵平

中国地质科学院矿产资源研究所, 国土资源部盐湖资源与环境重点实验室, 北京 100037

摘要 世界上许多大型含油气盆地都有蒸发岩分布, 蒸发岩与沉积盆地的含油气性有着非常密切的关系。为了探讨蒸发岩对沉积盆地含油气性的影响, 本文通过大量文献调研。分析表明: 泻湖和盐湖环境的生物种群可以作为烃源岩最好的母质; 而蒸发岩盆地在独特的太阳池效应的作用下, 有机质可以有效地转化为烃源岩; 蒸发岩的储集性及其可塑性和流动性为油气储的运移和聚集提供了良好的通道; 蒸发岩良好的封闭能力为油气的赋存提供了很好的圈闭。明确了蒸发岩对沉积盆地的含油气性控制机制。

关键词 蒸发岩盆地; 有机质; 太阳池; 成烃机制; 油气藏

蒸发岩沉积体系与油气藏沉积体系在空间分布和成因上有密切联系, 国内外研究者均在蒸发盐岩勘探中发现油气的存在, 并在石油勘探中探明了大量的蒸发盐岩层。对全世界 180 多个含油气盆地进行统计^[1], 发现其中的 115 个含工业油气田的盆地, 其中的 66 个沉积盆地广泛发育蒸发岩沉积, 比例高达约 58%; 目前已知的含盐油气盆地蕴藏着已探明油气储量的 89% 和天然气储量的 80%, 故蒸发岩体系与油气藏的成因与分布密切相关^[2]。正如发育于蒸发岩盆地中的世界上最大的沙特阿拉伯侏罗系油气田一样, 中国陆上油田除松辽盆地外, 包括塔里木盆地、四川盆地、鄂尔多斯盆地、渤海湾盆地及羌塘盆地等主要含油气盆地的主力含油气层系均与蒸发岩体系存在密切的内在联系^[3,4]。

蒸发岩不但与油气藏的发育存在较为明显的成因联系, 油气和蒸发岩都需要有封闭、半封闭沉积盆地, 而且在较长的地质历史时期都需要稳定沉积的构造条件。同时, 在这些地区内构造特征、剥蚀程度和水动力条件也较有利于油气和盐类的保存, 而且在同一沉积盆地含盐沉积时代越多、蒸发岩建造厚度越大、油气的储量也越丰富。如波斯湾盆地, 从寒武纪—第三纪有 6 个时代, 7 套蒸发岩系(碳酸盐、膏、盐)。该盆地拥有油气储量居世界第一位, 占世界油气储量的 38%^[5-8]。因此, 蒸发岩体系生油理论的研究对中国陆相及海相含蒸发岩油气盆地的油气勘探具有重大意义。

1 蒸发盐岩体系有机质来源

淡水湖泊作为富含有机质的暗色泥岩沉积的主要场所, 一直被认为是陆相含油气盆地烃源岩的主要物质基础。而

缺少明显数量泥质和蒸发盐的纯碳酸盐不大可能成为有效的生油岩, 它们沉积于相对活动的氧化性水体中, 导致有机质的降解和分散^[9]。但石油生物标志物研究已证明, 石油中强烈植烷优势和富含伽马蜡烷等正是来自这些“最好生油母质”——嗜盐藻类和微生物。研究表明泻湖和盐湖生态环境同样是生物大量发育及活动水域, 并表现为不同的盐度环境中, 发育不同耐盐/嗜盐生物种群生物(表 1); 由于缺乏天敌, 其生长繁殖更为茂盛, 尤其在合适季节, 其繁殖范围可扩展至整个湖域。如西藏扎布耶盐湖北湖, 其盐度介于 300~360 g/L, 但在其地表卤水中成片发育了红色杜氏盐藻(*Dunaliella salina*), 含量约 $\geq 10^3$ mL, 相当于 ≥ 0.79 g/m³。

同时, 由于盐度 5%~10% 的碳酸盐-蒸发岩沉积是更有利于有机质聚集的环境。故盐湖是有机碳产率最高的自然环境, 高生产率的嗜盐生物是油气生成的优质母岩, 如哥伦比亚盐湖, 嗜盐微生物每年的生物产能达 1690 g(C)/m²; 总菌权高达 6.52~0.5 $\times 10^4$ 细胞/L; 嗜盐菌生物量达 1542 g(C)/L^[10,11]。故盐湖为油气烃源岩的生成提供了丰富的物质来源。

在获得丰富物质来源的基础上, 盐水湖所存在的特定营养循环及微生物群落, 在盐水湖下部易形成硫还原菌——甲烷菌等群落(图 1), 有利于有机质向甲烷气和低熟油转化。同时, 在不同盐度水体生物群落中(表 1), 数量丰富的嗜盐/耐盐生物不但在蒸发盆地繁衍、聚集, 也由于海流/湖流而在砂、坝相隔的海湾泻湖或盐湖局部洼地富集^[12-22], 而盐度相对较小的淡水在泻湖中形成了盐“梯度太阳池效应”, 而在盐跃层(梯度层)之下, 存在硫酸盐还原菌活动带和甲烷菌形成菌活动带(图 2)^[23], 使生物-有机质超量富集, 也为甲烷生物气

收稿日期: 2015-04-29; 修回日期: 2015-09-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(U1407207); 中国地质调查局地质大调查项目(12120114048501)

作者简介: 赵小庆, 博士后, 研究方向为沉积学与地质学, 电子信箱: diandian_lovely@163.com; 郑绵平(通信作者), 中国工程院院士, 研究方向为盐湖学与盐类矿床地质学, 电子信箱: zhengmp2010@126.com

引用格式: 赵小庆, 郑绵平. 蒸发岩盆地油气藏的形成[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 53-59; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2016.05.005

表 1 各种盐度水体中若干盐生生物种群分布
Table 1 Several kinds of saline biota distribution in various water salinity profiles

群	淡水	低盐水	中盐水	高-超盐	群	淡水	低盐水	中盐	高-超盐
		3~20 g/L	20~50 g/L	水 50~350 g/L			3~20 g/L	水 20~ 50 g/L	水 50~350 g/L
原核生物					甲壳纲				
古细菌原界(适盐细菌、Holoferon 等10余种)	+	++	+++	+++	卤虫(无甲目)	0	0	+	+++
真菌原界(非硫紫细菌、绿细菌等)	+	++	+++	+++	拟卤虫	0	+	+	++
蓝藻纲					挠足虫				
螺旋藻	++	+++	++	++	Harpacticoid等	++	+	+	0
盐生隐杆藻	0	0	+	++	端足目				
真核生物藻					Austrochironia australis	+	++	++	0 ₊
鞭毛虫纲	++	++	+++	++	介形虫(耐盐种)	0	+	+++	+
双鞭甲藻	++	+	+++	0	腹足类	+++	+++	+	0
硅鞭毛藻	0	+	+++	0	昆虫				
石灰质鞭毛虫	0 ₊	+	+++	0	双翅目(卤蝇等)	0	0 ₊	++	+++
硅藻 (Amphora, Naricula, Nitzschia)	0	+	+++	+++	半翅目(Corixidae)	+	+	++	0
接合藻目十鼓藻	+++	+	0	0	蜻蜓目	++	++	++	0
管藻目	+	+	+++	0	毛翅目 (Symphytoneurta whelleri)	+	+	++	++
轮藻科					轮虫纲				
Tolypella, Chara			++	0	Brachionus plicatilis	+	++	++	0
Lamprothamnium Danulosum 等			+	++	Herartka jenkiniae	+	++	++	0
褐藻门	0 ₊	+	+++	0	脊椎动物				
红藻科	0 ₊	+	+++	0	鱼类				
绿藻纲团藻目					① 罗非鱼 Tilapia	+	++	++	+
杜氏藻	0	0	+	+++	② Craterocephalus eyeresii	0	+	++(?)	+
真核真菌					③ 裂腹鳅亚科和鳅科	+	++	0 ₊	0
藻形菌纲	+++	0 ₊	0 ₊	0	鸟禽				
高等植物					火烈鸟 (Phoenicopterus ruber 等5 个种)	0	0 ₊	++	+++
大较丝	+++	0 ₊	0	0	野鸭	+++	+++	++	+
蕨类植物	+++	0	0	0	鹈	++	++	+++	+
双子叶植物	+++	+	0	0					
单子叶植物	+++	+	+	0					

注:+++、++、+表示产量大、中、小;0₊间有产出;0无或罕见;*本表据大量有关文献综合;盐度>3 g/L列入广义盐湖。

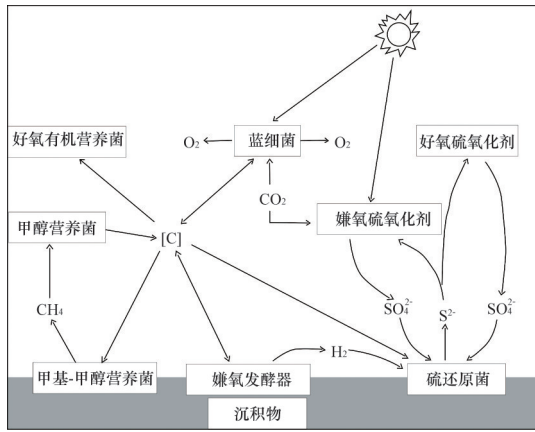


图1 苏打湖营养循环模型(引自文献[24])
Fig. 1 Cycle model of soda lake nutrient

形成创造良好条件。因此,虽然蒸发环境并非总是有机质产率最高,但是对滨海和盐湖有机质产率调查表明,这些地区也常为高有机质产率地区(表2^[25]),最大速率可达12000 mg·cm⁻²·d⁻¹。

以上研究和调研结果均表明蒸发湖盆环境可以有巨大的生物产率,从而成为成烃的重要来源。

另外,在对全球部分高盐和含盐的现代海相及其泻湖环境沉积物研究,可见除死海和红海外,有机质含量均较高,多数在5%以上,少数大于15%,Harmour群岛有机质含量可达32%(图3)^[26]。

在上述研究的基础上,本文对蒸发岩盆地烃源岩的发育进行分析。通过对古代陆相盐湖油田有机质研究,发现蒸发

岩盐度与油气富集具有密切的相关关系,表现为膏盐沉积阶段的油气更为富集。如柴达木盆地西部第三纪下干柴沟组有机碳含量大于1%的样品几乎全部分布在硫酸盐和氯化钠区,而碳酸盐沉积区的泥页岩有机碳一般在0.6%以下(图4)^[27];东濮、沁阳和苏北第三纪盐盆地有机质含量分布表明,在盐湖盆地一般都含有较丰富的有机质(图5^[28]),且有机质含量丰富的蒸发岩沉积主要发育在盐度增高的膏盐段,即由淡水段向咸水演化的阶段。

2 蒸发环境成烃机制

本文提出了古代蒸发盆地成烃模式,即盐梯度太阳池模式。研究表明,在大型深水的海相或陆相含盐盆地,由于蒸发盆地的卤水特征,水体易于形成分层结构“三明治”。而在现代较深的盐湖和泻湖中,只要有淡水或海水补给,就易形成三层结构^[29,30](图6)。其中,上部较淡水/淡盐水层,为上对流层(UCZ),其温度与环境温度相近,具有隔热保温和防止下层溶液被扰动的的作用;中部为梯度层,为非对流层,(NCZ),其盐度随水深呈梯度增大;下部为浓卤水层,为下对流层(LCZ),由浓度较大卤水构成,能起储热和吸热作用;在自然条件下,可比环境温度高20~40℃;用人工太阳池周围加隔热装备,其最高温度可达100℃^[31]。

由于非对流层,即盐镜面的存在,盐的浓度呈梯度增加,从而有效地防止下层的卤水由于温度升高而产生竖直方向对流,因而可使下对流层的温度不断增高,而起到吸取和储存太阳能效果和将正常淡水隔开的作用,进而在盐镜面下繁衍聚集了大量嗜盐生物,并在浓卤水缺氧强还原条件下,不断保存聚集有机质。

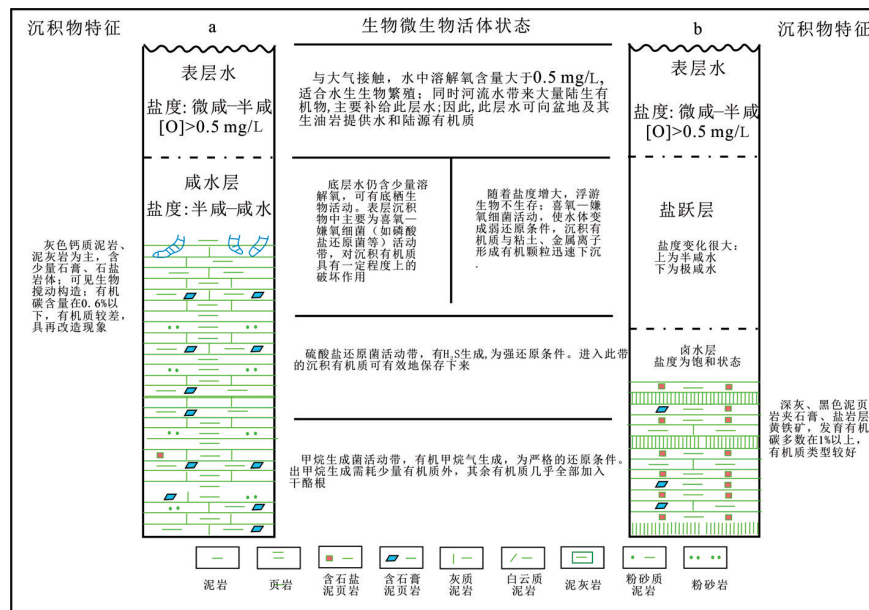


图2 盐湖相有机质沉积条件

Fig. 2 Organic matter condition analysis diagram of salt lake facies sedimentary

表2 盐湖和盐坪的有机产率(引自文献[25])
Table 2 Organic production rates of salt lake and salt flat

地区	最大速率/(mg·cm ⁻² ·d ⁻¹)	藻类特征
盐湖和盐坪		
非洲		
Solar湖(西奈)	5000~12000	蓝绿藻席
埃及, Mariut湖 ^a	9611	多种藻类
埃塞俄比亚, Aranguadi湖	19000 ^c	(蓝藻类)螺旋藻属 <i>Platensis</i>
Kilotes湖	4133	(蓝藻类)螺旋藻属 <i>Chroococcus</i>
肯尼亚, Nakuru湖 ^b , Simbi湖	2867(12000) ^c	蓝绿藻
澳大利亚		
Coronganmite湖	4425	(蓝藻类)节球藻属 <i>Spumigena</i>
Pink湖	184	杜氏绿藻属 <i>Salina</i>
Red Rock湖	7531	(蓝藻门)项圈藻属 <i>Spiroides</i>
Werowrap湖	7683	(蓝藻门)项圈藻属 <i>Spiroides</i> 裸沟藻属 <i>Aeruginosum</i>
Spencer湾	3100	蓝绿藻
鲨鱼湾	480	藻席
加拿大		
Humboldt湖	7968	<i>Aphanizomenon flas-aquae</i>
Little Manitou湖	1188	(硅藻类)角刺藻属 <i>Elmorei</i> (绿藻类)根枝藻属 <i>Hireroglyphicum</i>
Manitou湖	2620	N. <i>Spumigena</i>
Waldsea湖	345	不同藻类
美国		
Borax湖	525	多种藻类
魔鬼湖	140	多种藻类
大盐湖	6147	杜氏绿藻
肥皂湖	2919	(绿藻类)小球藻属
Drakesbad热泉	7000	蓝绿藻席

注:a) 恢复至最初的C-14的结果;b) 最初利用氧作为总产量计算,但是可按3 g O₂=1 g(C)的比例转化为碳;c) 根据每日氧浓度的变化所估计的数值。

如西藏深卤水盐湖(错尼湖),在-10℃的气候条件下,该湖由于梯度层的存在,水温达18℃,故水中生机盎然,大量卤虫和盐藻、菌生长发育、繁衍不息。该梯度层在国外深水盐湖中也广泛发育。因此,太阳池效应的存在为富含有机质的暗色页岩的沉积发育提供了重要物质基础,其中现代黑海第四纪黑色页岩的有机质正是在这种模式下形成的。

通过大量野外踏勘研究,在现代泻湖、盐湖(如死海、西藏错尼湖)中同样发现了卤水体/咸水体密度分层,并在盐跃层下面的下部浓卤水层往往形成缺氧稳定环境,从而造成大量极端嗜盐生物繁衍和保存条件。实验证明,氧的溶解度随水中盐浓度增加而减少(表3),故有利于聚集在卤水层底部丰富有机质的保存和在沉积物中形成良好的生油岩,进而对烃

源岩(黑色页岩)和油页岩的沉积发育奠定重要的基础,如里海地区晚侏罗世kimmeridge黑色页岩就成为里海油田的主要生油岩;而北羌塘西长梁的侏罗系100 m厚油页岩和烃源岩也与还原环境有关。

同时,蒸发作用还有助于湖盆中水溶性有机物的提取。甲酸钙、乙酸钙、乙酸钠有机酸高温、高压热分解试验表明:低分子甲酸盐、乙酸盐在单种纯度很高情况下,热分析甲酸盐,得到的产物为碳酸盐、甲烷;乙酸盐热分析产物是碳酸盐、丙酮;而将它们混合在一起,模拟古蒸发盆地熬制,混合有机酸盐在热分解时,便由小分子有机酸盐生成大分子烃类。混合有机酸盐热分解时按空间顺序、化学性质逐个分解,会产生多样自由基、CO₂和H₂O,有机酸盐中金属离子和生

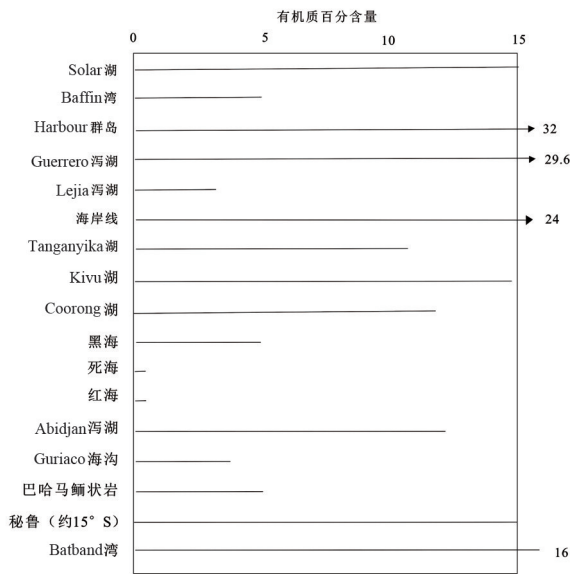


图3 高盐和含盐环境沉积物中有机质的百分含量(干重)
Fig. 3 Percentage of organic matter in high salt and salt environment sediments (dry weight)

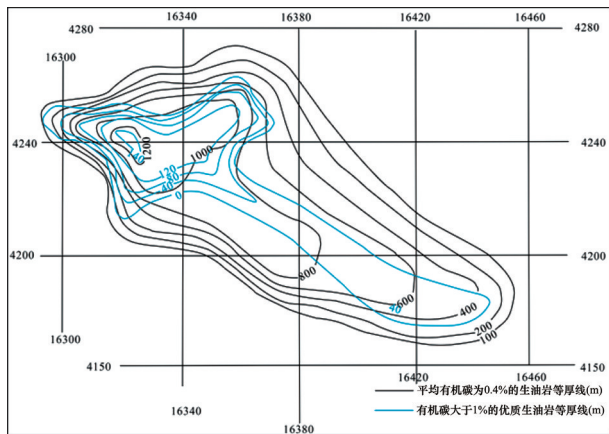
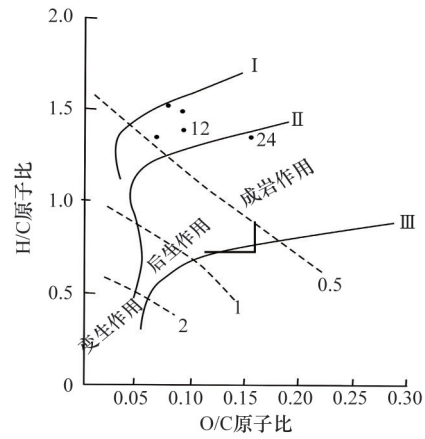


图4 柴达木盆地西部第三系下干柴沟组上段生油岩、
优质生油岩分布
Fig. 4 High quality source rocks and source rock
distribution in the Ganchaigou formation period of tertiary in
the western Qaidam basin

成的CO₂生成碳酸盐,有机酸根生成油气,并认为这是新生代多种多样烃的原因^[32]。波斯湾油田群分布在一条800 km的地带,占地球表面积不到2%,但却拥有世界油气储量的38%以上。该区从寒武纪至新近纪有6个地质年代7套蒸发岩系,经历长期的巨量蒸发作用,不仅蒸发出无机盐,而且蒸发聚集巨量的水溶性有机质-烃类;还应指出,除了封闭、半封闭海盆中海水含有大量有机质外,还会有海流通过溢口补给新的海水,海流会把海洋中大量生物有机质也持续不断地带进蒸发盆地。



No. 12和24为泥膏岩

图5 东濮盆地卫20井沙三段高盐环境沉积岩干酪根类型
Fig. 5 Kerogen type in high salt environment sedimentary
rock of Wei20 Sha-3 member of Dongpu basin

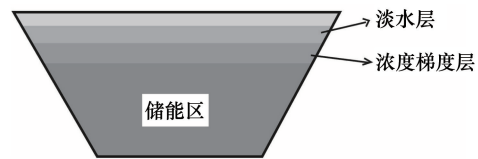


图6 太阳池结构
Fig. 6 Solar pool structure

表3 氧在氯化钠溶液中的溶解度

Table 3 Oxygen solubility in the sodium chloride solution

氯化钠质量 分数/%	氧的溶解度/ (mL·L ⁻¹)	氯化钠质量 分数/%	氧的溶解度 /(mL·L ⁻¹)
0	5.78	5.4	4.20
0.68	5.52	10.9	3.05
1.36	5.30	16.3	2.24
2.72(海水)	4.95	21.7	1.62

3 蒸发岩系有利于油气成藏

蒸发岩系可作为地下卤水的来源,易使石灰岩产生白云石化作用,从而增大孔隙度和渗透率,或方解石化作用能使致密的白云岩体体积膨胀而产生大量的规则变形裂缝。如美国怀俄明西部下石炭统白云岩储集层及西伯利亚寒武系地层中去白云石化均具有上述特征。

另外,由于上覆地层蒸发速率较快,而下伏地层蒸发较慢,导致下伏底层在流动过程中对上覆岩层形态进行改造^[33]。

由于下伏地层流动性大于上覆地层,导致上覆地层下陷至下伏地层中,从而下伏蒸发岩向两侧流动形成高势区,为油气储集提供了良好的空间。在下伏流动过程中使上覆地层形成逆冲构造^[34],使得上覆地层发生破裂,形成裂缝,提高储集物性。

盐底辟构造在形成过程中对上部地层有很强的底辟作用,使上部地层产生丰富的断裂系,为油气的垂直短距离运移提供了良好的通道。同时,盐构造顶部复杂的地质构造网络可以成为良好的油气运移通道网络。另外,烃源岩蒸发岩体系中原来存储在孔隙中的水钠、钾浓度一般都很高,由于其具有较好的油气吸附能力,在这些水排出过程中,可促使烃类流动,并促使烃类进入储层^[35,36]。

在具有烃类的蒸发岩盆地中,比重较大的卤水渗入含烃沉积物中时,由于比重差异而把烃类排出并使其进入到具孔隙的地层中,如孔隙层之上有膏盐层覆盖,可使盐下储集层中的油气只能沿储层孔隙作侧向迁移(图 7^[37])。因此膏盐自然成为油气最理想的区域盖层。据统计,世界上有 60% 的特大油气田,都是由蒸发岩作盖层的。同时,膏盐层还对油气起到圈闭作用。

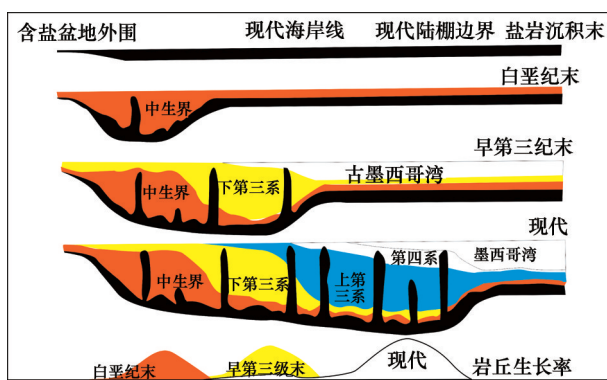


图 7 盐丘发育史横剖面

Fig. 7 Development of salt section

膏盐不仅具有良好致密性,而且具有极强的塑性。在深度达 2500 ~ 3000 m,温度约达 100℃时,压力达到 600 kg/cm²,在这种条件下,膏盐的塑性极强,当这样的盐层具有一定厚度和承受不均压力时,就会发生塑性流动,由于盐层向上流动而改变上覆岩层的产状而形成各种类型的盐构造圈闭,即所谓“良好的油气封盖层”这类圈闭有利于烃类的聚集而形成油气藏,如墨西哥湾大量新生代盐丘油气藏。

4 结论

蒸发岩盆地中有丰富的有机质来源,部分的可以转化为优质生油岩,盐盆地中独特的太阳池效应有利于有机质生烃,蒸发岩层的塑性流动为油气运移和聚集提供丰富的网络通道系统与多种多样的圈闭。

致谢: 本文研究得到中国石油勘探开发研究院支持,赵文智院士的帮助,在此一并表示感谢。

参考文献 (References)

- [1] Christopher G, Kendall S C, Weber L J. The giant oil field evaporite association a function of the Wilson cycle, climate, basin position and sea level[J/OL]. [2015-01-31]. http://www.searchanddiscovery.com/pdfz/documents/2009/40471kendall/ndx_kendall.pdf.html.
- [2] 徐文世, 于兴河, 刘妮娜, 等. 蒸发岩与沉积盆地的含油气性[J]. 新疆石油地质, 2005, 26(6): 715-718.
Xu Wenshi, Yu Xinghe, Liu Nina, et al. Petroliferous property in evaporitic rocks and sedimentary basins[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2005, 26(6): 715-718.
- [3] 贾振选. 中国东部陆相含蒸发岩盆地形成特点与油气、蒸发岩与油气[M]. 北京: 石油工业出版社, 1985.
Jia Zhenxuan. Evaporite basin formation characteristics and oil and gas, evaporite and oil and gas of East China continental[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1985.
- [4] 张国防, 吴德云, 马金钰. 盐湖相石油早期生成[J]. 石油实验地质, 1995, 17(4): 358.
Zhang Guofang, Wu Deyun, Ma Jinyu. The early generation of oil from saline lake facies [J]. Experimental Petroleum Geology, 1995, 17(4): 358.
- [5] Horsfield B. The influence of mineral on the pyrolysis of kerogen[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1979, 44: 1119-1131.
- [6] Espitalie J. Role of mineral matrix in kerogen pyrolysis in influence on petroleum generation and migration[J]. AAPG Bulletin, 1979, 64(1): 57-62.
- [7] 郝石生, 贾振选. 碳酸盐岩油气形成和分布[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 189-197.
Hao Shisheng, Jia Zhenyuan. Formation and distribution of oil and gas in carbonate[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 189-197.
- [8] 李国玉, 金之均. 世界含油气盆地图集[M]. 北京: 石油工业出版社, 2005.
Li Guoyu, Jin Zhijun. World atlas of oil and gas basins[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2005.
- [9] North F K. Petroleum geology[M]. Winchester Mass, Unwin Hyman Ltd, 1985.
- [10] Brock T D. Ecology of saline lakes[C]//Strategies of Microbial life in extrem environments. New York: Report of the Dahlem Workshop on State of Life in Extreme Environments, 1978: 31-47.
- [11] Kushner D J. Microbial life in extreme environments[M]. London: Academic Press Inc. Ltd, 1978: 319-325.
- [12] Masui M. Halo Philic microorganisms—ecology, Physiology, food hygiene and exploitation in food industry (Japanese) [M]. Tokyo: Society of Japan Pharmaceutical Press, 1979: 1-69.
- [13] Brown A D. Halotolerance of Dunaliella[J]. 2nd ed, Biochemistry and Physiology of Protozoa, 1979, Second edition, 1: 139-190.
- [14] Nissenbaum A. Hyperassline brines evaporite environments[J]. Developments in Sedimentology, 1980, 28: 23-29.
- [15] Gwynn J W. Great salt lake: A scientific, historical and economic overview[J]. Utah Department of Natural Resources Bulletin, 1980, 116: 287-350.
- [16] Borowitzka L J. The microflora—Adaptions to life in extremely saline lakes[J]. Hydrobiologia, 1981, 81: 33-46.
- [17] Ben-Amotz A, Katzl A, Avron M. Accumulation of β Carotene-rich globules from Duna liella batdawil (Chlorophyceae) [J]. Journal of Phycology, 1982, 18(4): 529-537.
- [18] Decker D. Australia saltlakes: Their history, chemistry and biota review

- [J/OL]. [2015-01-31]. http://people.rses.anu.edu.au/dedeckker_p/pubs/120.pdf.
- [19] Borowitzka L J, Borowitzka M A, Moulton T P. The mass culture of *Dunaliella salina* for fine chemicals: from laboratory to Pilotplant[J]. *Hydrobiologia*, 1984, 116(1): 115-121.
- [20] 郑绵平, 刘文高, 向军. 西藏扎布耶盐湖嗜盐菌、藻的发现和地质生态学综述[J]. *Acta Geologica Sinica* 1985, 59(2): 162-171.
Zheng Mianping, Liu Wengao, Xiang Jun. The discovery of salt lake halophilic bacteria, algae and geological ecology cheeper of Zabuye saltlake inTibet[J]. 1985, 59(2): 162-171.
- [21] Hurlbert S H. Saline lakes V-developments in hydrobiology[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993: 1-162.
- [22] Barbara J. Hyperaline environments[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.
- [23] 金强, 查明. 柴达木盆地西部第三系蒸发岩与生油岩共生沉积作用研究[J]. *地质科学*, 2000, 35 (4): 465-473.
Jin Qiang, Zha Ming. Co-sedimentation of Tertiary evaporates and oil source in the rocks in the western Qaidam Basin[J]. *Scientia Geologica Sinica*, 2000, 35(4): 465-473.
- [24] 郑绵平. 论“盐湖农业”[J]. *地球学报*, 1995(4): 404-418.
Zheng Mianping. On “Saline lake agriculture” [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1995(4): 404-418.
- [25] 李任伟. 蒸发盐环境沉积岩有机质和生油研究[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
Li Renwei. The study of sedimentary organic matter and source of Evaporation environment[M]. Beijing: Maritime Press, 1993.
- [26] Warren J K. Source rock potential of shallow water evaporite settings [J]. *Journal Sedimentary Petrology*, 1986, 56: 442-454.
- [27] 金强. 深水和浅水盐湖相生油岩沉积及其石油地球化学特征[J]. *沉积学报*, 1991, 9(2): 114-120.
Jin Qiang. Sedimentation and organic geochemistry of source rocks in the deep and shalow -water saline lakes in Tertiary, China[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1991, 9(2): 114-120.
- [28] 李任伟. 高盐环境和生油[J]. *中国科学*, 1991, 18(3): 303-313.
Li Renwei. High salt environment and source[J]. *China Science*, 1991, 18(3): 303-313.
- [29] Karakilcik M, Dincer I, Rosen M A. Performance investigation of a solar pond[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2006, 26(7): 727-735.
- [30] Kurta H, Halicib F, Binark A K. Solar pond conception experimental and theoretical studies[J]. *Energy Conversion and Management*, 2000, 41(9): 939-951.
- [31] 李申生. 全饱和型太阳池的热稳定性条件[J]. *太阳能学报*, 1995, 16 (4): 333-339.
Li Shensheng. Thermal stability conditions of fully saturated solar pond [J]. *Acta Enrgiae Solaris Sinica*, 1995, 16(4): 333-339.
- [32] 石军柱, 石娜, 刘海涛. 古盆地蒸发沉淀有机酸盐生油气机理[C]//第四届油气成藏机理与资源评价国际学术研讨会论文集. 北京: 中国石油学会, 2006.
Shi Junzhu, Shi Na, Liu Haitao. Ancient basin precipitation evaporation organic acid salt mechanism of oil and gas[C]//The 4th International Symposium on Hydrocarbon Accumulation Mechanism and Resource Evaluation. Beijing: Chinese Petroleum Society, 2006.
- [33] Hudec M R, Jackson M P A. Advance of allochthonous salt sheets in passive margins and orogens[J]. *AAPG Bulletin*, 2006, 90(1): 1535-1564.
- [34] 陈书平, 汤良杰, 贾承造. 含盐前陆充填变形前缘盐上层构造样式 [J]. *地球学报*, 2004, 25(5): 561-564.
Chen Shuping, Tang Liangjie, Jia Chengzao. Structural styles in the deformation leading edge of evaporite-bearing foreland basin fill[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2004, 25(5): 561-564.
- [35] 李勇, 钟建华, 温志峰, 等. 蒸发岩与油气生成、保存的关系[J]. *沉积学报*, 2006, 24(4): 596-606.
Li Yong, Zhong Jianhua, Wen Zhifeng, et al. Study on the relationship between evaporate and hydrocarbon generation[J]. *Aata Sedimentologica Sinica*, 2006, 24(4): 596-606.
- [36] 文竹, 何登发, 童晓光. 蒸发岩发育特征及其对大油气田形成的影响 [J]. *新疆石油地质*, 2012, 33(3): 373-378.
Wen Zhu, He Dengfa, Tong Xiaoguang. Global evaporites development characteristics and their effects on formation of giant oil fields[J]. *Xinjiang Petroleum Geology*, 2012, 33(3): 373-378.
- [37] Liro L M, Kadri M, Montecchi P, et al. Dynamics of Allochthonous Salt Emplacement and Deformation: Walker Ridge, Keathley Canyon and Garden Banks Areas, Deepwater Gulf of Mexico[C]//2002 Annual Convention. March, 2002: 10-13.

Evaporite basin reservoir formation

ZHAO Xiaoqing, ZHENG Mianping

Ministry of Land and Resource Key Laboratory of Saline Lake Resources and Environments; Institute of Mineral Resource, China Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract Many of the world's large basins have evaporite distributions, and evaporite has a very close relationship with the capability of sedimentary basin. In order to clarify the influence of evaporite on the capability of sedimentary basin, this paper, through a large number of literature analysis, argues that lagoon and salt lake environment species can be used as the best parent material of hydrocarbon source rocks, and that under the unique action of "solar pool effect" in the evaporite basin, the organic matter can be effectively converted into hydrocarbon source rocks. It is analyzed that reservoir of evaporite considering its plasticity and liquidity can provide a good channel for the migration and accumulation of oil and gas. Also discussed is that the good sealing capacity of evaporite may provide a good trap for oil and gas occurrence. Eventually, the control mechanism of evaporite oiliness in sedimentary basin is pointed out.

Keywords evaporite basin; organic matter; solar pool; mechanism of hydrocarbon generation; oil and gas reservoirs

(责任编辑 刘志远)