

文章编号: 1000-0550(2006)04-0596-11

蒸发岩与油气生成、保存的关系^①

李 勇^{1,2} 钟建华^{1,3} 温志峰³ 段宏亮³ 王海侨³

(1. 中国科学院广州地球化学研究所 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院 北京 100039; 3. 石油大学地球资源与信息学院 山东东营 257061)

摘 要 油气与蒸发岩共生的现象揭示蒸发岩与油气的生成、保存及成藏具有密切关系。从油气生成条件看,细菌、藻类及咸水盆地底层的岩性对油气的生成具有重要作用,此外红层中的粘土对烃类的生成起到催化的作用,碱金属可使生成的烃类发生流动;从有机质的保存条件看,蒸发岩盆地水体中具有密度分层的特点,在高密度层以下的沉积物具有强的氧化还原电位,从而使有机质保存下来。蒸发岩往往与油气共生,形成多种形式的成藏模式,我国东濮凹陷、济阳拗陷深水成因的蒸发岩实例,均已揭示了蒸发岩地区油气勘探的巨大潜力。

关键词 蒸发岩 有机质 油气 烃源岩

第一作者简介 李勇 男 1977 年出生 博士 石油地质学

中图分类号 TE121.3 **文献标识码** A

目前世界上具工业价值的含油气盆地共计 120 多个,其中含层状或透镜状蒸发岩的共有 66 个,约占盆地总数的 55%^[1]。据统计^[1],在油、盐共生的盆地中,46% 的盆地的油气层产于盐系地层之下,41% 的盆地的油气层产于盐系地层之上,13% 的盆地的油气层产于盐系地层之间^[2~6]。这表明油气产于盐系地层的下部或上部是主要的。在盆地的发展过程中,如果出现干湿交替的气候,将会形成含油气和含盐沉积的交替,在剖面上形成含盐层系和含油气层系的旋回沉积。如四川盆地下三叠统嘉陵江组与中三叠统雷口坡组即为含气的碳酸盐岩与石膏、硬石膏岩、盐岩的旋回沉积(图 1)。位于油气层之上的石膏层是理想的油气盖层,它与其下的含油气层系组成良好的生、储、盖组合。由此引发蒸发岩与油气生成、保存及成藏存在何种关系? 这是一个引人注目的新颖问题。

1 问题的提出

海盆或湖盆水体遭受蒸发,其盐分逐渐浓缩以至沉淀,这种化学成因的岩石称为“蒸发岩”,其包括氯化物岩、碘酸盐岩、硫酸盐岩、碳酸盐岩和硼酸盐岩等。值得注意的是,我国东部陆相含膏盐沉积盆地蒸发岩系发育的层位与生油岩形成的层位基本一致(图 2)。如江汉盆地蒸发岩系发育于两大阶段:上始新世(潜江组)和下始新世(新沟嘴组、沙市组),生油岩主要形成于潜江组、合新沟嘴组;三水盆地蒸发岩

系主要发育于土布心组,而它的生油岩亦形成于土布心组;黄骅拗陷蒸发岩系主要发育于沙四段,其生油岩亦形成于沙四段、沙三、二段及孔店组上部;济阳拗陷蒸发岩系与生油岩共生于沙河街组下部;苏北盆地蒸发岩系发育于阜宁组二—四段及真武组,生油岩则主要形成于阜宁组二—四段。因此,蒸发岩系与生油岩的共生关系并非偶然。

这种共生现象并不能说明蒸发岩—石膏、岩盐自身能够生成大量的油气。众所周知,烃类是有机质经过热演化形成的。在蒸发岩的形成初期,由于水体盐度增加或不同盐度水体的混合,底部水体近于停滞,因此造成各种生物的大量死亡。但由于河流不断地供给生物及有机物质,湖泊中含有大量的各种生物残体及有机物质。当湖泊盐度继续增高,输送的各种生物就会死亡,沉于湖底,湖盆底部形成弱氧化还原环境,造成腐殖泥相。这样河流不断地输送生物及有机物质,湖泊中生物就可以不断地死亡堆积,为烃类的形成提供物质基础。

当卤水浓度达到超饱和时,蒸发岩发生快速堆积,能够快速覆盖腐殖泥相,给腐殖泥相造成一个封闭的弱氧化还原环境,形成一个天然的“蒸馏器”^[7~9]。这就使大量的死亡生物和有机物质免遭氧化的破坏,有利于更多的有机物质转化成烃类。

我国东部陆相含膏盐盆地沉积旋回的第二层或第三层是生油岩形成阶段。国外的大量资料也证明,

① 国家自然科学基金项目(批准号:49972037)、高校博士点基金项目(20010425004)、山东省自然科学基金项目(Q99E01)联合资助。

收稿日期:2005-08-15;收修稿日期:2005-12-20

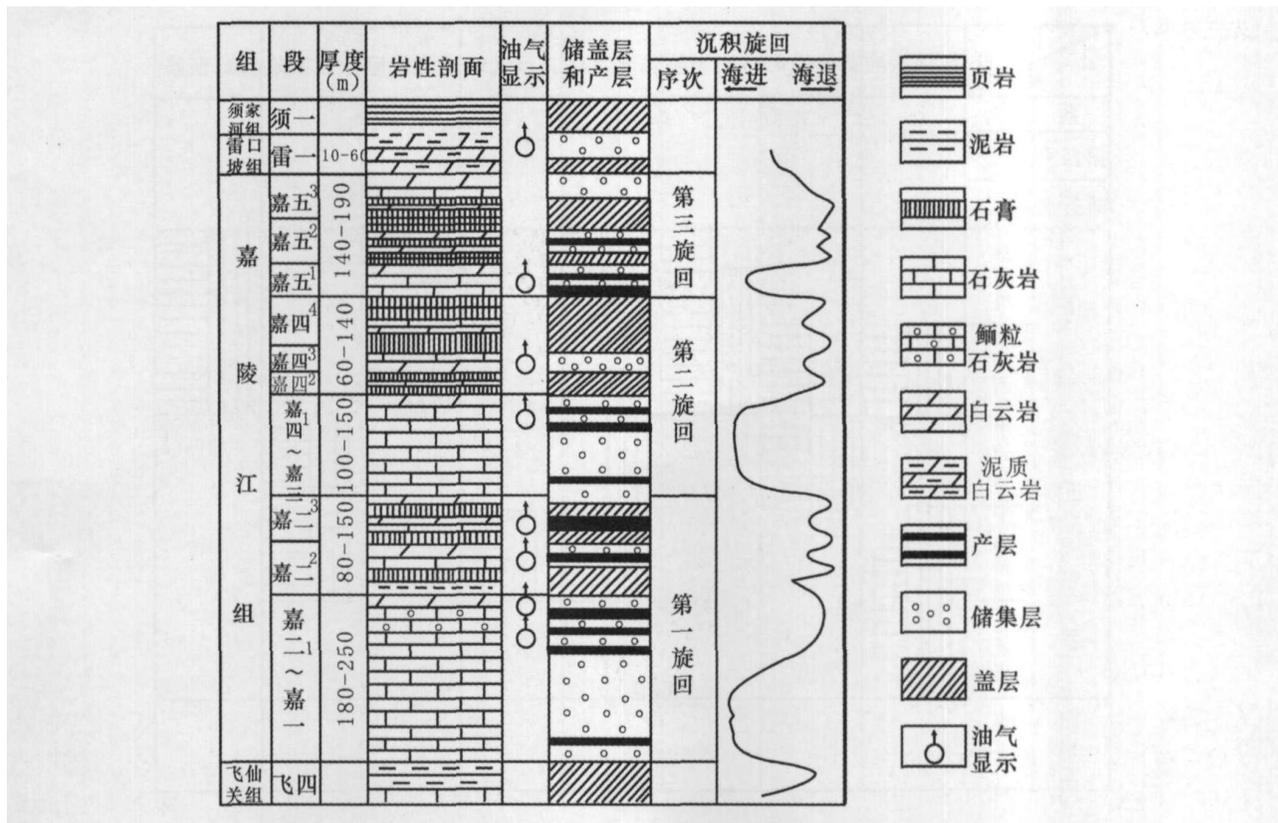


图 1 四川南部下三叠统嘉陵江组气田储、盖层综合柱状图

Fig 1 Comprehensive Column of rocks and cover rocks in Jialingjiang Formation below Triassic south of Sichuan

蒸发岩形成之前必然发育这样一套生油岩。Tissot 根据 108 块岩盐分析, 岩盐的有机物质含量达到 15 ~ 4 500 mg/100g 仅次于粘土 (或泥岩) 600 ~ 3 0000 mg/100g 占第二位^[10]。Peterson 曾经指出, 在堡坝型沉积盆地中, 盐的浓度与同时沉积的有机物质的浓度有关^[11]。

蒸发盐型的环境具有巨大的有机物质生产能力。在卤水中虽然残留的生物种类较少, 但是残留下的生物则易于繁殖成巨大的数量^[12]。在海洋蒸发型的海湾, 由于表面水流的流动而抑制区域向最高盐度发展, 所以在这种区域中, 生物的营养物质可以连续地供给, 保证生物的繁殖^[13~15]。卤水盐度为 4% ~ 12% 时, 称为中等盐度的沉积环境, 它对生油岩的形成具有重要意义, 在这种沉积环境中: (1) 可产生大量有机物质; (2) 其它沉积物稀释有机物质不强烈; (3) 若水体深度适宜则有利于有机物质的保存。所以中等盐度的沉积环境能够形成优质烃源岩。例如中东地区从三叠系到白垩系分布众多中等盐度的沉积环境, 这些层位蕴藏着丰富的油气资源, 在石油储量中占有重要地位。

在蒸发岩盆地中, 来自地表水中的有机质可保存在一个具密度分层的高密度层之下的底部咸水中, 该咸水不仅具有高盐度, 且为厌氧环境^[12]。如果这些有机质不再被循环, 则将被细菌分解后进入溶液或沉淀在底部。通过蒙脱石、方解石、石膏和钾盐的催化作用可使有机质发生反应。沉积层系中的非渗透性泥岩和泥晶灰岩可牢固地吸附大的烃类分子; 而较小的烃类分子可通过渗透性地层被带入到含水层, 并继续被带入储层中。这些较小的烃类分子被埋藏之后, 在较低的镜质体反射率情况下, 就可达到与其它烃类相同的成熟度。在蒸发岩盆地中, 烃类形成的理论模式似乎不需要首先捕集那些作为源岩的非渗透性页岩与泥晶灰岩中的有机质。

地壳上许多油气藏并没有明显的“传统”烃源岩。如产自突尼斯博尔马地区中三叠系中的原油以及巴西塞尔希培盆地或安哥拉宽扎盆地下白垩统的原油, 均产自砂岩体中, 但砂岩体的下部覆盖在前寒武纪结晶岩的不规则凸起之上, 砂岩体上部则主要为盐岩层系^[13]。并不存在被认为是烃源岩的含沥青的页岩或泥晶灰岩。从整体来看, 油田分布的古纬度大

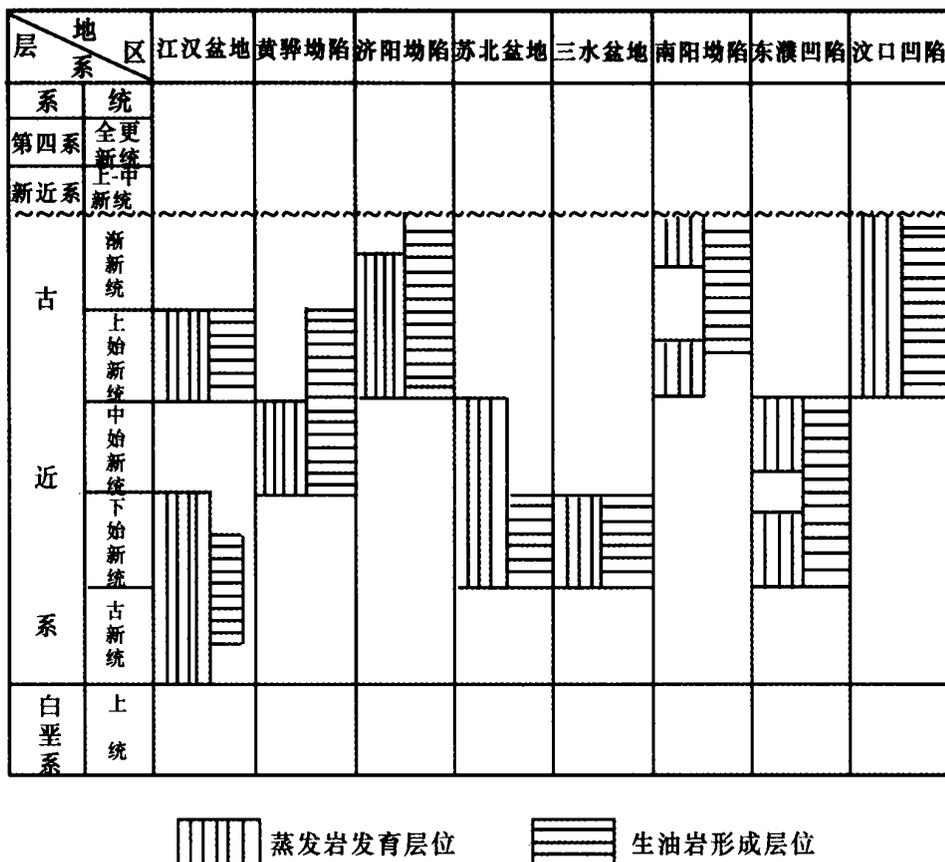


图 2 陆相含膏盐沉积盆地蒸发岩发育层位与生油岩形成层位对比

Fig 2 Position comparison of evaporate and source rock for terrestrial facies gypsum basin

致与世界上蒸发岩分布的低纬度带相同。Weeks指出,蒸发岩盆地一般都是有利于烃类的大规模形成与保存,并且在碳酸盐岩沉积盆地中,往往是蒸发岩覆盖了大部分的油气储量^[2]。在欧洲,四分之三以上的已知储量蕴藏在蒸发岩之下或是分布在横向上与蒸发岩相邻地带。全新世未经压实的蒸发岩中有机质含量高达 15% 以上,这些有机质最初以腐烂的喜盐植物残留体、藻类、卤水和甲壳类有机质为主。这些有机质通过水中的蓝绿藻丝状体染黑了盐碱滩中的碳酸盐岩,并与碳酸盐岩结合成富含有机质的烃源岩,实验分析表明,地质历史上蒸发岩中的有机碳含量一般在 2% ~5% 之间,与其它类型的烃源岩相比,其有机碳含量比较客观,可作为油气烃源岩^[16]。这些情况表明,蒸发岩不仅可作为最有利的盖层,它作为烃源岩的可能性也值得探讨。

2 烃类的生成

保存下来的有机物质可分几种方式形成烷烃:

(1) 作为原核生物新陈代谢的副产物。如 Des-

ulfovibrio desulfuricans 和 Desulforistella hydrocarboni-
blastica 等原核生物就是一组烷烃的主要产生者;

(2) 某些藻类产生的液体烃类;

(3) 某些藻类含有 2% ~15% 的烃类;

(4) 当脂肪酸与碳酸钙或碳酸镁起化学反应时,反应产物分解成烷烃系列中的某些成份和其它重质原始组分。高分子量的偶数正构烷烃被泥岩(尤其是蒙脱石)吸附,高分子量的奇数正构烷烃则被白云岩吸附,而低分子量的奇数正构烷烃则通过各种烃类岩石被过滤;

(5) 细菌使藻类物质发生放热微生物降解;

(6) 通过分解醇-镁氯化物或其它有机-金属聚合物,释放出烷烃中的某些组分;

(7) 通过氯化铝使动物脂肪和萘发生转化,氯化铝在能够产生氯氧铝镁石或明矾的咸水中,多以痕量存在。氯化铝对各种有机化合物的裂解效应是明显的,可使绿河页岩的干酪根组分在低温下可溶。

2.1 微生物对烃类生成的作用

藻类(尤其是蓝绿藻)是烃类的主要生成者。我

国东部深湖相硬石膏组分里,藻以夹层和晶间薄膜的形式出现在粒状和纤维状的蒸发岩中,或者与石盐中的赤铁矿相伴生,有时也在钾盐中出现。

细菌不仅对烃类生成起着作用,并且在烃类进一步改造过程中也起着关键作用。细菌产生的酸使碳酸盐岩所吸附的化合物被释放,增加了孔隙和内部气体的压力。当有少量氯化铵存在时,细菌会减少轻烃组分并增加比重,同时卤化的烷烃易被去氮细菌转化。细菌还可使烃环破裂,减少了环状烃类的存在或环烷酸含量,使饱和烃类成为不饱和烃类,提高了原油的溴化物指数。细菌还可使硫化物还原成硫化氢而防止甲烷的形成,并促进了因有机质表生蚀变而导致沥青的形成。在所有采出的盐岩样品中都发现有腐烂的厌氧生物,在第三纪、中生代、二叠纪、泥盆纪、志留纪和寒武纪的盐岩中,普遍发现细菌和细菌孢被包在晶体中心的现象^[17~20]。在蒸发岩中发现的烃类具偶碳优势,这与还原性的碳酸盐和氧化性的硫化物细菌的代谢作用有关^[19];

在有海水注入的泻湖中,随着咸水的浓缩,氧的溶解性明显降低。在具密度分层盐水体的高密度层以下,由于游离氧的不断缺乏而促进了正在聚集的部分有机质被厌氧细菌的分解。甚至在浓度非常高的咸水中,细菌能消化蛋白质,产生具有水解蛋白质性质的丙三醇抽提物。此外,去氮细菌使蛋白质分解,产生酰胺和胺,由于产生的气体富氮,故酰和胺很可能是生物成因氮的来源。去氮细菌在分解蛋白质过程中,可释放出硫酸根而使石膏沉淀或被还原成硫化氢^[18~23]。生命体中的蛋白质很容易被破坏,但生命体中的脂肪酸则难以破坏^[24]。因而生物成因氮的存在表明了有机质分解过程中,同时可生成稳定性强的脂肪酸和类脂化合物,它们与咸水中的油气生成是戚戚相关的,如委内瑞拉卡里阿科(Cariaes)海沟中,厌氧微生物的发酵过程,的确产生了直链烃和分子氮^[25~31]。

可以认为,蛋白质衍生物所发生的去氮作用,产生了可供藻和细菌新陈代谢的氮和磷。虽然硝酸盐浓度随盐度增加而降低,但盐沼中总的氮含量比浓缩盐水的盐度增加的要快,一般是流入海水的含氮量的两倍。盐沼中某些蓝绿藻对氮的固定起非常活跃的作用,在石膏壳被藻所固定的地区,石膏中可含 0.025% 的有机氮^[29]。氮的富集表明在烃类形成过程的早期,细菌是活跃的。氮气普遍出现在钾盐和钠盐中,一般在高压下以包裹体或沿晶面出现。咸水中

直接沉淀出的钾盐和光卤石都含生物成因的氮,氮在光卤石的最大值可达 0.0077%^[30]。

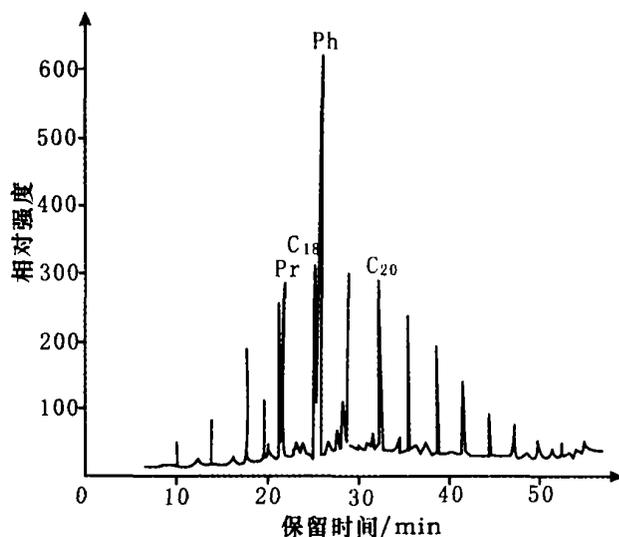


图 3 东营凹陷沙四段蒸发岩烃源岩饱和烃色谱图
(据朱光有, 2004)

Fig 3 Chromatogram map showing saturated hydrocarbon of evaporate in Sha 4 Formation of Dongying Depression

从地球化学数据来看,甾烷可出现在原始藻类中,但三萜类或藿烷系列则是次要的或见不到的,同时降藿烷($C_{27}-C_{29}$)的完全消失则表明了与其它源岩不同的成熟史,植烷比姥鲛烷含量高,表明其成因属还原环境(图 3)^[30~35]。

2.2 岩性对烃类生成的作用

咸水盆地底层的岩性对烃类形成也具有重要的影响。碳酸盐沉积物越细,表面积越大,对有机碳、有机氮和有机硫的吸附量越大。活性粘土(如坡缕石和海泡石)的活性表面积比最细粒的碳酸盐岩的大 100 倍。通过阳离子的交换作用,粘土孔隙体积可超过 40%,表面积可达 $600 \sim 2\,200 \text{ m}^2 / \text{cm}^3$,其高活性的微孔隙易被烷烃充填达 70%^[28]。碳酸盐岩与脂肪酸反应有利于生成能在渗透性碳酸盐岩中滚动的液体沥青,而粘土岩则与沥青聚合成固体,因而使得页岩和粘土中的沥青在最初是不流动的。

红层的作用也不容忽视,红层中含有对有机质和烃类起催化作用的粘土,这些粘土是风暴尘土或由瞬时洪水带入。催化裂化作用发生在钙-蒙脱石和其它粘土矿物变成混合层的镁-蒙脱石的时候,这使分散有机质在混合层粘土形成期间变成同生的烃类流体(图 4)^[33]。在蒙脱石存在的情况下,聚集在高密度层以下的有机质可从絮状蒙脱石或氧化硫化氢的

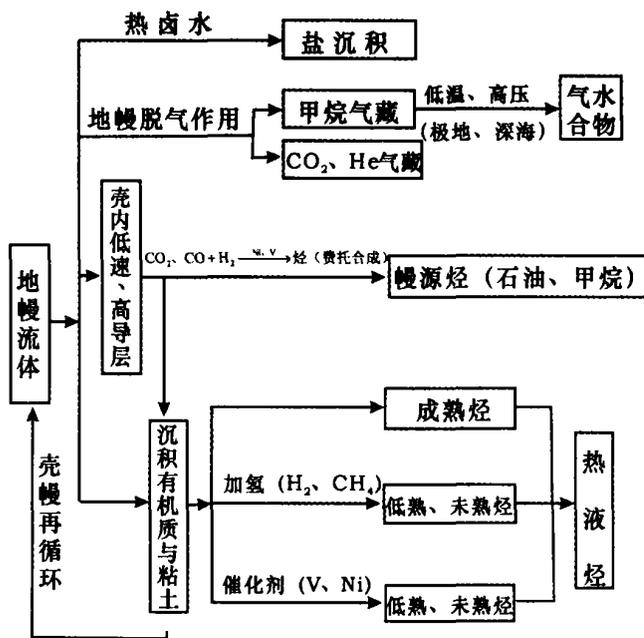


图 4 油气与膏盐共生机理

Fig. 4 Symbiosis mechanism between hydrocarbon and gypsum

过程中得到氢、脱羧基, C—C键断裂使长链分子变成小分子,比单纯的烃类条件下所需能量少 42kJ/mol 最终由不饱和的化合物成为饱和化合物, CO_2 则被释放出来;氢氧化钙咸水和混合层粘土的存在是有利脱羧作用的;但伊利石化作用却可使粘土不再活跃,而烃的存在则有利于伊利石化的进行。所以粘土层不仅是催化剂,粘土夹层的生化过程与钾盐中的游离气生成也有关,这可由不同层位中的天然气含量和成份不同来表明。

2.3 金属对烃类生成的作用

蒸发岩盆地中,烃类往往与某些金属有关。脱礁生物和其它硫酸盐还原剂可从咸水中提取金属。某些金属也可被周围的藻类和高等水生植物选择性地吸收,以后再从分解的有机物中释放出来。由于氨基酸可大大提高重金属的溶解性,故有机质对于提高重金属的溶解性必然起一定作用(表 1)。碱金属以氯的络合物形式移动,因而某些有机化合物也可以同样形式移动。随着咸水浓度的增加,可能与腐殖酸起化学作用的络合氨基酸也不断增加。而且铜的氯化物和溴化物也可与长链脂肪胺形成络合物。这些含金属咸水和与其共生咸水流动时,一般是含重金属的咸水向下流动,烃类则向上倾方向流动,最后圈闭在不同类型储集体中,表 1 所示金属元素含量对比表明东

营凹陷具有与基伍湖和东濮凹陷类似的成盐特征^[35]。

2.4 烃类在蒸发岩中的运移特征

盐岩一旦被压实而具非渗透性时,其中的烃类是不能从中排出的,因而必须在这些岩石失去渗透性以前运移出来。在渗透的咸水中多余的 Na^+ 使亲油岩变为亲水岩,也可促使烃类流动,并促使烃类进入储层。从氢氧化钠水溶液驱出亲水储层的原油就利用了这种特性。此外,如渗透的咸水中具有高的钠、钾浓度时,也可促进液态烃的运移。

通过盐岩运移的烃类要发生某些变化。约 $0.11\% \sim 0.37\%$ 被吸附,胶质和沥青质组分可增加 $3\% \sim 4\%$ 。且由于盐岩中存在微量硫酸盐,导致直链烷烃增加了链长。在 $20 \sim 40^\circ\text{C}$ 时,直链烷烃和环烷烃比芳烃更易于渗滤过沉积物。正像烃类影响蒙脱石的伊利石化一样,烃类本身也受到咸水中钾含量的影响。在碎屑岩中,当镜质体反射率为 $0.5\% \sim 0.7\%$ 时,石油可以生成,而在蒸发岩中,镜质体反射率为 0.4% 时,就能达到相同的成熟度^[34]。石膏、岩盐具有完备的晶体结构,与其它沉积岩相比是较好的热导体。因此,蒸发岩分布区为大地热流高值区,可以使其周围烃源岩得到较大的热力作用,有机质可较早、较快地生成油气。

表 1 一些样品中金属元素含量对比
Table 1 Content comparison of metal element of some samples

样品		金属元素含量 /%								
地区	岩性	Fe	K	Mg	Mn	Na	Ni	Sr	V	Zn
东营凹陷	含盐泥岩(盐间)	6.89	3.78	2.05	0.0746	1.18	0.0063	0.1294	0.0050	0.0200
	膏盐岩	1.85	1.15	2.67	0.0438	7.09	0.0020	0.0760	0.0050	0.0065
	深灰泥岩(盐间)	2.75	1.56	2.56	0.0471	2.27	0.0029	0.1400	0.0062	0.0093
	盐岩	2.47	1.39	2.40	0.0400	11.5	0.0028	0.0658	0.0062	0.0082
	深灰泥岩(盐间)	5.01	3.16	4.02	0.2513	0.83	0.0028	0.0336	0.0063	0.0150
	灰色泥岩(远离盐层)	0.46	0.28	0.58	0.0069	1.29	0.0007	0.0352	0.0009	0.0016
东濮凹陷	深灰泥岩	>0.01			>0.01		0.0013	0.0705	0.0005	0.0049
	石盐	>0.01			0.0013		0.0037	0.1100	0.0011	0.0051
	黑色页岩	>0.01			>0.01		0.0044	0.0910	0.0008	0.0043
基伍湖	页岩	5.53			0.1080		0.0054	0.1774	0.0016	0.0052
	有机物	5.11			0.0569		0.0070	0.1626	0.0151	0.0006
	热卤水	4.50			0.1200		0.0030			0.7000
	海水	0.0007			0.0001		0.0005			0.0012
	青海湖底泥页岩	4.72			0.0085		0.0130		0.0068	

蒸发岩盆地中所产生的烃类数量不少。注入蒸发岩盆地每立方米海水中所含的每克有机质就可使每立方米盐岩中生成比重为 0.75 和 0.003 桶石油。当然,肯定有相当部分被厌氧微生物所消耗掉^[36]。

根据上述,在蒸发岩盆地中,对于渗滤咸水进行研究,对其运移条件进行探讨,对于勘探工作及寻找圈闭条件是非常重要的。

总之,在蒸发岩盆地中,表层水体中的高生物产率与咸水高密度层下保存大量有机质是有相互联系的。有机质被细菌分解后,既可通过渗透性地层进入储层,也可保存在非渗透性的粘土和微晶灰岩中,它具有双重的重要特征。

3 有机质的保存

蒸发岩盆地的注入水中含有丰富的生物体,这些生物体在盆地表层水体中可继续繁殖,死亡后部分沉入水底。底部咸水中由于氧浓度的减少而制约了底栖生物群、食草动物和食腐动物的生长,并阻止了生物对沉积物的搅动;为抵消干燥损失所需要的渗透压力,能够维持吸附咸水作用的生物种类越来越少,因而只有蓝绿藻和厌氧微生物细菌可继续生存。由于水底缺氧,被带入的有机质未被氧化或未被食腐动物再循环。这些有机体将被厌氧微生物分散并聚集起来,或被外流或外渗水体排出。蒸发岩沉积对有机质的存在非常敏感,有机质的分解产物对硫酸盐和氯化物的沉淀速率、晶体大小和结晶习性也有显著影响。

3.1 有机质存在的证据

在古代咸水条件下,存在有机质的证据如下:

(1) 发现了鱼、浮游生物、昆虫、孢粉、树叶及树干保存在蒸发岩中,仅有部分降解;

(2) 呈季节性繁殖的藻席可分布在厚层岩盐之下;

(3) 在咸水中继续生存的叠层石被氯化钠饱和和,或被石盐、硬石膏或石膏所交代;

(4) 由于吸附醇和饱和的与未饱和的直链胺,导致了石盐和钾盐具八面体结晶习性。当简单的或复杂的有机化合物被吸附到具有最大表面积表面上时,则会阻止进一步的结晶作用,从而出现石盐或钾盐由正方体结晶习性变为八面体结晶习性的现象。

(5) 由于酚能阻止结晶过程中的成核作用,当有酚存在时,平圆形石膏比棱形石膏晶体更易形成。长链烷烃或脂肪酸易被吸附并利于板状、圆形石膏晶体形成。溶液中有机化合物的存在有利于粗而短的晶体生长;而无机化合物却有利于针状晶体的形成。

(6) 在古代硬石膏中,发现了阻止石膏沉淀的氨基酸、蛋白质、脂肪酸及烃类吸附在石膏或方解石晶格中的钙离子上。现已在钾盐的流体包裹体中发现了脉,故它在原始咸水中也是必然存在的^[1]。

蒸发岩层系中,已成熟烃类的原生证据是很多的。在重结晶石盐中,常含有液相轻质烃的包裹体。在光卤石互不连通的微孔隙中,通常在高边界压力下,含有大量气体。当光卤石溶解在水中,孔隙在气体压力下趋于破裂,首先形成一薄纹层,然后气体沿纹层逸出。当光卤石被快速加热和分解时,则发出“噼啪”声。刚钻出的石盐中,发“噼啪”声的盐具弱沥青味,烧爆时具“噼啪”声,撞击时具“噗噗”声。在

光卤石晶体中,有大量气体微泡存在。乳白色的钾盐尤其富含包裹体,杂色钾盐有时比光卤石富含气体,条纹状钾盐含较少气体,红色钾盐气体含量最低。

以上情况表明了古代咸水条件下,有机质广泛存在的依据。由于蒸发岩盆地水体中具有密度分层的特点,在高密度层以下的沉积物具有强的氧化还原电位,且碳酸盐离子在上部厌氧水体中就被消耗,因而沉积物底部不存在能发生黄铁矿化的硫化氢,从而使有机质保存下来。

3.2 沥青层的存在

蒸发岩中含沥青层存在,是由于咸水中悬浮的有机质周期性的沉淀所致。有机质的沉淀是在电解质浓度发生季节性变化期间,由于静电作用所致。这种情况在含有咸水的池塘和有盐岩晶体析出的水体中可以见到。使盐度降低的大雨可使咸水变清,导致大量红色亲盐细菌的死亡。这是由于细菌不适应渗透压力突然变化所造成的。在这些地区,石盐层与有机软泥层交替出现,有机软泥层代表了雨季时期死亡细菌的沉积。这些沉积物随埋深而不断固结^[31,32]。在这套硬石膏沉积中,每隔 20~40 cm 有一很薄的具有恶臭味黑色沥青泥岩夹层。泥岩起着“吸墨器”的作用,吸附了所能吸附的有机质^[33]。这种实例还很多,如纽约州上志留统盐岩中的黑色“不透明层”,其有机碳含量为 0.44%~2.14%,并具有与硫化氢相似的恶臭味。俄罗斯地台侏罗系白云岩裂缝中,存在着覆盖在方解石上的沥青,而沥青又被方解石所覆盖,表现为硬石膏与有机质间歇地沉积作用^[34]。在济阳拗陷蒸发岩的 TOC 含量一般也达到 1%,显示良好的生烃潜力(图 5)^[35]。

在蒸发岩中不仅含有有机质的夹层,而且含有动物群的残骸。如波兰和罗马尼亚中新世盐岩层中就保留了极其丰富的动物群^[35]。此外,在古代的硬石膏、杂卤石、石盐和水镁矾中也出现了沥青质夹层,并且可在盐层内追索数千米。此外,与蒸发岩相邻的非渗透性(页岩及微晶灰岩)层中也确实常含沥青质,这是由于有机质形成了富黄铁矿的腐泥质,并且埋藏在蒸发岩盆地中的臭灰岩、细粒沥青质近岸灰岩、页岩和白云岩中。

有机质可不加选择地沉淀在盐水盆地的底部。当有机质沉淀在粘土或泥晶灰岩之上时,它们将被吸附;当有机质沉淀在孔隙性岩层之上时(如骨架灰岩、石膏壳或刚沉淀的含石盐软泥),有机质则易于通过高孔隙性岩层被冲出,这是由于浓缩的咸水重于

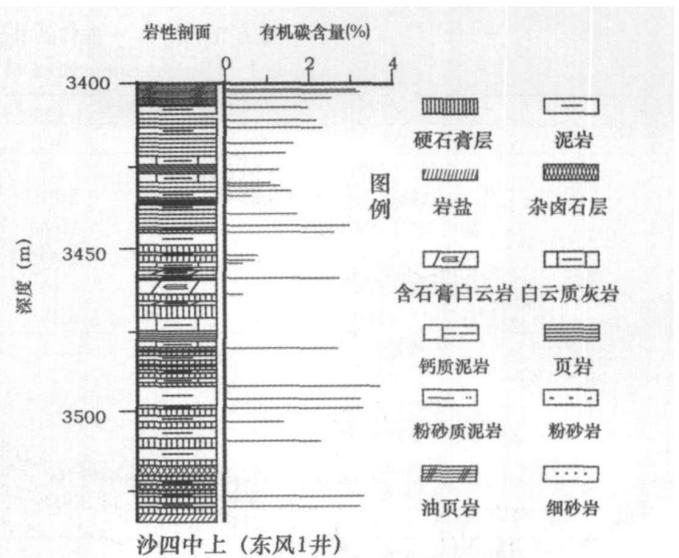


图 5 东风 1 井沙四中上亚段有机碳含量分布图

Fig 5 Distributing graph showing organic carbon content of middle-upper of Sha 4 Formation in Well Dongfeng 1

下伏层间水所致。在与蒸发岩有关的黑色页岩中发现的沥青含量是很高的,但不能估计出通过渗透性岩层冲进含水层或载运层中的沥青的量。因此,沥青质不是蒸发岩中产生的有机质的量度,而仅是非渗透性沉积物所附部分的量度。

另外一种情况是烃类被带进盆地底部孔隙性岩层,这种情况下石油不可能来自基底,而是来自上覆的蒸发岩。例如巴西塞尔希培盆地的白垩系中,凡是被非渗透蒸发岩覆盖的地区,在基底断裂中都含有被封闭的石油^[34],这说明某些具工业价值的油气被圈闭在蒸发岩与结晶基岩之间的砾状砂岩中。然而,当钠盐、钾盐和镁盐层系覆盖在 50 m 厚的粘土层之上时,粘土质一定是含沥青的黑褐色页岩,但无游离石油存在。可以认为,粘土岩不是生油岩,而是像海绵一样,储存了沥青。例如在安哥拉,在玄武岩之上和下白垩统硬石膏和石盐之下的火山灰层和砂岩都产石油,但它们也无明显油源^[36]。盐层系之上的第三系黑色页岩含有孔虫介壳,其中充满有油气泡,并沿页岩的层理面出现。页岩中油气虽为原生烃类,但不能通过盐层系进入储层。又如在德国的巴伐利亚蔡斯坦碳酸盐岩储层中的烃类,根据有机地球化学证据,烃类无外表油源,而且作为储层的白云岩使石油经历了与非渗透性硬石膏—白云岩互层中烃类所不同的成熟作用^[37]。

沥青可产生在整个蒸发岩韵律层的各个部位,它

并不是只出现在底部,有时也出现在顶部。

4 东濮凹陷蒸发岩的形成环境及其与油气的关系

东濮凹陷是渤海湾盆地南端一个具裂谷特征的中-新生代次级凹陷,该盆地除断裂发育外,最显著的特征就是沙河街组有四套巨厚蒸发岩沉积。其中有三套属沙三段,一套属沙一段。四套蒸发岩具有相似的沉积特征。以沙三²段为例,蒸发岩集中分布在凹陷中部,为较厚的盐岩夹石膏和泥页岩的韵律层,蒸发岩约占地层总厚度的 35%。盐岩单层厚 30~50 cm,其中夹石膏或泥质岩形成“年轮”状。盐岩晶体约 8~12 mm,他形为主。石膏为白色纤维状晶体,纹层状,与黑色泥质岩呈互层。泥质岩为深灰-黑色,页理发育,层面有云母片和植物屑,平面上与蒸发岩呈渐变接触,局部见有油页岩。蒸发岩发育区的外侧为盐岩与碎屑岩的过渡区,蒸发岩仅占总厚的 20%,灰及深灰色砂泥岩为主,单层盐岩厚 10~30 cm。平面上蒸发岩与泥质岩、粉砂岩呈指状交错。泥岩中黄

铁矿很多,有立方体和豆状体两种完整晶形;石膏以条带纹层为主,也有结核状和竹叶状,这些都是深水蒸发岩的沉积特征。再向外侧边缘为碎屑岩分布区,以深灰色含石膏、盐岩的泥岩为主,其次为粉-细砂岩。粉-细砂岩多为各种深水沉积构造发育的水下扇和浊积扇。根据上述,可清楚地反映盐岩-盐膏岩-含膏泥岩-暗色泥砂岩的相变关系。

盐湖相烃源岩沉积需要缺氧环境(强还原环境),因为水体盐度大,盐湖很容易形成具有盐跃层的永久分层结构:表层水盐度低且与大气接触,是富氧水体,可供浮游生物生存(图 6a);表层水之下为盐跃层,盐度急剧增加,水体含氧量迅速下降;底层水(高盐度卤水层)是缺氧环境,进入其中的有机质免除了氧化分解作用,可以沉积形成有机质丰度高、类型好的烃源岩(图 6b)^[21,37]。这一点在柴达木盆地察尔汗现代盐湖得到体现:盐湖水面 1 m 以下就出现永久性的卤水层,水深 3~4 m 时为强还原环境,可形成黑色淤泥。

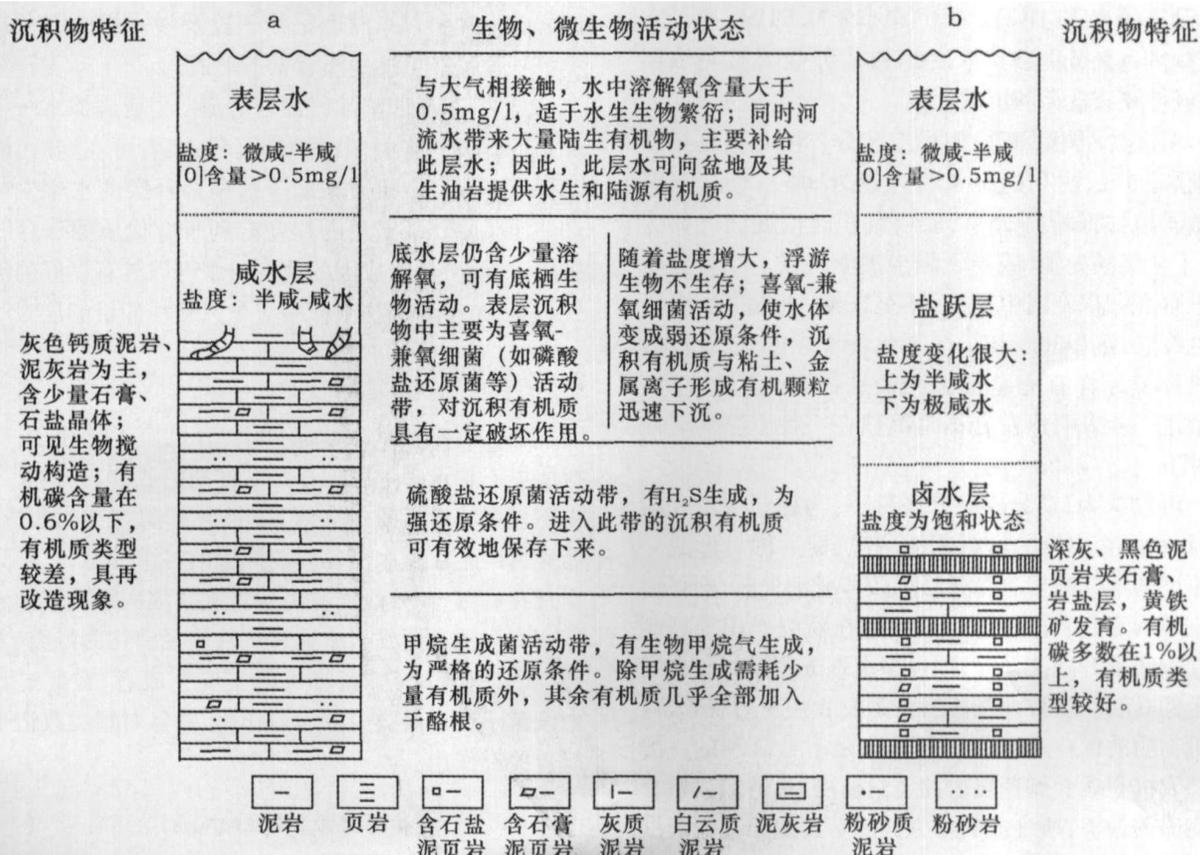


图 6 盐湖相有机质沉积条件分析图(据金强, 2000)

Fig 6 Analytical map showing sediment condition of saline organic matter

东濮凹陷在早第三纪时,西、南、东三面均为隆起所围绕,北端为左潜山所限,为一完整的封闭性内陆河湖体系。由于凹陷的快速下沉,形成了“高山深盆”的景观。蒸发岩就是上述环境下的深水沉积(水下蒸发岩)所致,分层卤水是其成盐的基本形式。盐水比重大于淡水,封闭湖泊下部水体宁静,重力作用使盐度向下增加,形成下部是卤水、上部是微咸水的分层现象。含盐度高的水在下沉的同时,向更深的湖底流动,并富集在最深处,而河水、雨水进入湖盆就浮在盐水之上,形成分层卤水、自上而下由三部分组成:上部为稀释层,相当于半咸一咸水,大部分处于波基面之上,含氧量大,适宜于半咸水生物繁殖,此层受太阳蒸发其消耗量大,当淡水注入量减少或盐类物质增多时,稀释层会减薄或消失;中部为盐跃层,此层盐度增加,与稀释层有一密度界面,该层不受风浪扰动,水体宁静,但可发生盐水流动,浮游生物受到限制,但嗜盐厌氧细菌大量生存;卤水层基本为饱和盐水,密度大而厚度小,与已沉积的盐类是化学动态平衡,是盐类的保护层和物质来源层。卤水层为高纯氯化物卤水, $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ 和 $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ 均小于 0.01, 阳离子含量 $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg}$ 当其浓度达到某种盐类结晶浓度时,就导致该盐类的沉淀。

东濮盐湖相沙三段孢粉组和分异度与温度植物特征相同^[37],耐旱的麻黄粉含量为 3%~6%,喜湿的被子植物栎粉占 25%,表明沉积时以湿润气候为主,干旱气候为辅,或半干旱半潮湿气候。结合蒸发岩发育在沉积旋回中期,而不是末期;蒸发岩发育段未见红层、沉积间断和干旱氧化环境标志;以及没有干旱环境那样有完整的碳酸盐—石盐—钾盐序列。这就进一步表明蒸发岩不是沉积在一种干旱的气候条件下。

可以认为,在分层卤水条件下,当稀释层厚度较大时,可发育丰富的有机物质,其沉淀后即可形成一定厚度的油气源岩。当稀释层较薄或消失时,即可形成巨厚的蒸发岩沉积。当盐跃层在断裂作用等控制下发生频繁升降波动时,即可多次形成蒸发岩与油气源岩的互层。这种油气源岩与蒸发岩共生的现象,对有机物质的保存及其向油气转化是十分有利的。油气源岩沉积后受到蒸发岩的密封作用,可避免大量有机物质的损失,所生成的油气亦因蒸发岩的覆盖而提高了聚集程度。对于碳酸盐岩沉积系列,分层卤水的作用更为重要。

分层卤水的来源是值得讨论的问题。盐可有多

方面来源。如海侵残留水、盆地周边河溪水塘蒸发所形成的盐类等。海水含 SO_4^{2-} 较多,海水的蒸发混合不能形成高纯氯化物卤水。盆地周边河溪水塘蒸发所得盐分不足以形成巨厚盐层。但深部地层水基本是高纯氯化物卤水,矿化度达 37%。早第三纪时,东濮凹陷深部的张性断裂发育,深部卤水在断裂部位受高温膨胀产生巨大压力,沿断裂上涌,以热卤水形式进入湖盆。热卤水在地下汲取围岩中重金属和古老地层中盐类(如奥陶系的蒸发岩),进入盆地后温度骤然下降,其中溶解的重金属盐(络合物)迅速沉淀成固体小颗粒,沉积在盐层及其附近的泥岩中,并导致盐层及盐间泥岩重金属含量比远离盐层的泥岩要高。深层某部位卤水受热上涌后,临近的地层水就来补充,通过断裂等渗滤下去的地表水也会予以补充,并受热后再上涌,从而形成深层热卤水循环。热卤水活动受断裂活动等因素控制,具阵发性特点。故向成盐盆地提供盐类物质时多时少。一般在构造活动期热卤水活动加强,易形成较厚蒸发岩;此时盆地下沉,陆源有机物质也大量进入盐盆地,形成蒸发岩与油气源岩共生现象。东濮凹陷沙三段及沙一段的四套盐类沉积就是在上述地质背景下形成的。

总之,东濮凹陷油气源岩与蒸发岩皆属深水一半深水的封闭一半封闭的湖相沉积;二者可在同时、同条件下形成。有机质来源于盐湖稀释层的水生生物和陆源生物。盐跃层的存在有利于有机质的保存和转化。因而,深水成因的蒸发岩系可以具有良好的油气远景,是今后勘探工作中应予以重视的目的层^[21]。

5 结论

蒸发岩在古代咸水条件下,有机质广泛存在,有机质可不加选择地沉淀在盐水盆地的底部,在蒸发岩中不仅含有有机质的夹层,而且含有动物群的残骸。沥青可产生在整个蒸发岩韵律层的各个部位,它不只出现在底部,此外烃类也可被带进盆地底部孔隙性岩层。有机质在蒸发岩中通过多种途径演化为烃类,藻类(尤其是蓝绿藻)是烃类的主要生成者,在此过程中细菌不仅对烃类生成起着作用,并且对烃类改造也起着关键作用。

参考文献 (References)

- 1 郝石生,贾振选.碳酸盐岩油气形成和分布.北京:石油工业出版社,1989. 189~197 [Hao Shisheng Jia Zhenxuan. Formation and Distribution of Carbonate Rock. Beijing: Petroleum Industry Press

- 1989, 189~197]
- 2 Weeks L G. Factors of sedimentary basin development that control oil occurrence. *AAPG Bulletin*, 1952, 36: 2011~2024
 - 3 Gehman H M. Organic matter in limestone. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1962, 26: 885~897
 - 4 Cannon J. Time-temperature relation in oil genesis. *AAPG Bulletin*, 1975, 59(6): 1979~1985
 - 5 Horsfield B. The influence of mineral on the pyrolysis of kerogen. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 44: 1119~1131
 - 6 Espitalie J. Role of mineral matrix in kerogen pyrolysis influence on petroleum generation and migration. *AAPG Bulletin*, 1979, 64(1): 57~62
 - 7 Davis J B. Catalytic effect of smectite clay in hydrocarbon generation revealed by pyrolysis-gas chromatography. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 1982, 4: 227~240
 - 8 Ibe A C, Ferguson F. Organic matter content in carbonate sediment in relation to petroleum occurrence. *Journal of Petroleum Geology*, 1983, 6(1): 56~67
 - 9 Ibe A C. In situ formation of petroleum in oolites. Part I: Scheme of hydrocarbon generation and accumulation. *Journal of Petroleum Geology*, 1984, 7(3): 89~102
 - 10 Tissot B P. Recent advances in petroleum geochemistry applied to hydrocarbon exploration. *AAPG Bulletin*, 1984, 68(5): 102~120
 - 11 Peters K E. Geochemistry of artificially heated humic and sapropelic sediments-2: Oil and gas generation. *AAPG Bulletin*, 1984, 68: 961~970
 - 12 Sonnenfeld P. Evaporite: an oil and gas source rock. *Journal of Petroleum Geology*, 1985, 3: 45~56
 - 13 Jin Qiang, Peter J McCabe. Genetic features of petroleum system in rift basin of eastern China. *Marine and Petroleum Geology*, 1998, 15(3): 343~358
 - 14 Coveney Jr R M. Serpentinization and origin of hydrogen gas in Kansas. *AAPG Bulletin*, 1987, 71(1): 39~48
 - 15 Lowenstein T K, Spencer R J, Zhang Pengxi. Origin of ancient potash evaporates: clues from the modern nonmarine Qaidam Basin of Western China. *Science*, 1989, 245: 1090~1092
 - 16 金强, 王伟锋. 重视裂谷盆地火成岩发育区和蒸发岩层系的油气资源再评价. 复式油气田, 2000, 3: 8~12 [Jin Qiang, Wang Weifeng. Attach importance to the reevaluation for oil and gas resource of pyrogenic rock and evaporite rock areas in rift basin. *Complete Oil field*, 2000, 3: 8~12]
 - 17 Sloss L. Evaporite deposition from layered solutions. *AAPG Bulletin*, 1975, 53: 776~789
 - 18 Schreiber B C, Roth M S, Helman M L. Recognition of primary facies characteristics of evaporates and the differentiation of these from diagenetic overprints. In: Handford C R, Loucks R G, Davies G R. *Depositional and Diagenetic Spectra of Evaporites*. SEPM Core Workshop No. 1, Calgary, Canada. SEPM Tulsa, Okla., 1982. 1~32
 - 19 Moody J D. Distribution and geological characteristics of giant oil fields. In: Fischer A G, and Judson S. *Petroleum and Global Tectonics*. Princeton University Press, 1975. 307~320
 - 20 Aref M A M, Attia O E A, Wali A M A. Facies and depositional environment of the Holocene evaporates in the Ras Shukeir area, Gulf of Suez, Egypt. *Sedimentary Geology*, 1997, 110(1-2): 123~145
 - 21 Taberner C, Cendon D L, Pueyo J J. The use of environmental markers to distinguish marine vs. continental deposition and to quantify the significance of recycling in evaporate basins. *Sedimentary Geology*, 2000, 137(3-4): 213~240
 - 22 Tay P L, Lonergan L, Warner M. Seismic investigation of thick evaporate deposits on the central and inner unit of the Mediterranean Ridge accretionary complex. *Marine Geology*, 2002, 186(1): 167~194
 - 23 Sarg J F. The sequence stratigraphy, sedimentology, and economic importance of evaporate-carbonate transitions: a review. *Sedimentary Geology*, 2001, 140(1-2): 9~34
 - 24 Playa E, Orti F, Rosell L. Marine to non-marine sedimentation in the upper Miocene evaporates of the Eastern Betics, SE Spain: sedimentological and geochemical evidence. *Sedimentary Geology*, 2000, 133(1-2): 135~166
 - 25 Sinha R, Raymahashay B C. Evaporite mineralogy and geochemical evolution of the Sambhar Salt Lake, Rajasthan, India. *Sedimentary Geology*, 2004, 166(1-2): 59~71
 - 26 Michalzik Dieter. Lithofacies, diagenetic spectra and sedimentary cycles of Messinian (Late Miocene) evaporites in SE Spain. *Sedimentary Geology*, 1996, 106(3-4): 203~222
 - 27 Chen Shuping, Tang Liangjie, Jin Zhijun. Thrust and fold tectonics and the role of evaporates in deformation in the Western Kuqa Foreland of Tarim Basin, Northwest China. *Marine and Petroleum Geology*, 2004, 21(8): 1027~1042
 - 28 Mees Florias. Salt mineral distribution patterns in soils of the Otiomongwa pan, Namibia. *Catena*, 2003, 54(3): 425~437
 - 29 Alsharhan A S, Kendall C G. Holocene coastal carbonates and evaporates of the southern Arabian Gulf and their ancient analogues. *Earth-Science Reviews*, 2003, 61(3-4): 191~243
 - 30 Seabome T Richard. The influence of the Sabatayn Evaporites on the hydrocarbon prospectivity of the Eastern Shabwa Basin, Onshore Yemen. *Marine and Petroleum Geology*, 1996, 13(8): 963~972
 - 31 El Tabakh Mohamed, Utha'aron Cherdasak, Schreiber B. *Charlotte*. Sedimentology of the Cretaceous Maha Sarakham evaporates in the Khorat Plateau of northeastern Thailand. *Sedimentary Geology*, 1999, 123(1-2): 31~62
 - 32 Enos P. Shelf environments. In: Scholle P A, Behout D G, Moore C H. *Carbonate Depositional Environments*. AAPG Memoir, 1983, 33: 267~295
 - 33 雷怀彦. 蒸发岩沉积与油气形成的关系. 天然气地球科学, 1996, 7(2): 22~28 [Lei Huaiyan. The relation between evaporite sediment and the formation of oil and gas. *Natural Gas Geoscience*, 1996, 7(2): 22~28]
 - 34 张景廉, 郭彦如, 卫平生. 三论油气与金属(非金属)矿床的关系. 新疆石油地质, 1999, 20(4): 310~313 [Zhang Jinglian, Guo Yanru, Wei Pingsheng. On the relation between petroleum and metallic (non-metallic) ore deposits, petroleum and gypsum-salt deposits. *Xinjiang Petroleum Geology*, 1999, 20(4): 310~313]

- 35 袁静, 覃克. 东营凹陷沙四段深水成因蒸发岩特征及其与油气藏的关系. 石油大学学报, 2001, 25(1): 9~11 [Yuan Jing Qin Ke Characteristics of evaporite generated in deep water of Sha⁴ Member in Dongying Sag. Journal of the University of Petroleum, 2001, 25(1): 9~11]
- 36 朱光有, 金强, 戴金星. 东营凹陷沙四中亚段盐湖相烃源岩研究. 高校地质学报. 2004, 10(2): 257~266 [Zhu Guangyou Jin Qiang Dai Jingxin. Investigation on the sa A lake source rocks for Middle Shasi Column of Dongying Depression. Geological Journal of China Universities. 2004, 10(2): 257~266]
- 37 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. 地质科学, 2000, 35(4): 465~473 [Jin Qiang Zha Ming Co-sedimentation of Tertiary evaporites and oil source rocks in the western Qaidam basin. Scientia Geologica Sinica. 2000, 35(4): 465~473]

Study on the Relationship Between Evaporate and Hydrocarbon Generation

LI Yong^{1, 2} ZHONG Jian-hua^{1, 3} WEN Zhi-feng³
DUAN Hong-liang³ WANG Hai-qiao³

(1. Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640;

2. Postgraduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039;

3. Earth Science and Information College, Petroleum University, Dongying Shandong 257061)

Abstract The symbiosis between hydrocarbon and evaporate indicate the affiliation of evaporate and generation of hydrocarbon. From the view of conservation of organic matter, the water body in evaporates basin takes on the character of density stratification; the niederschlag below mascon has high oxidation-reduction potential which contribute to the conservation of organic matter. From the view of generation of hydrocarbon, bacteria, algae and lithology on the bottom of salt-water basin play important role in generation of hydrocarbon; furthermore, clunch from the redbeds acting as catalyzer, alkali metals making the hydrocarbon mobile. Deep water cause of evaporate fomation indicate the large potential for oil and gas exploration in Dongpu Depression.

Key words evaporate, organic matter, oil and gas, source rock