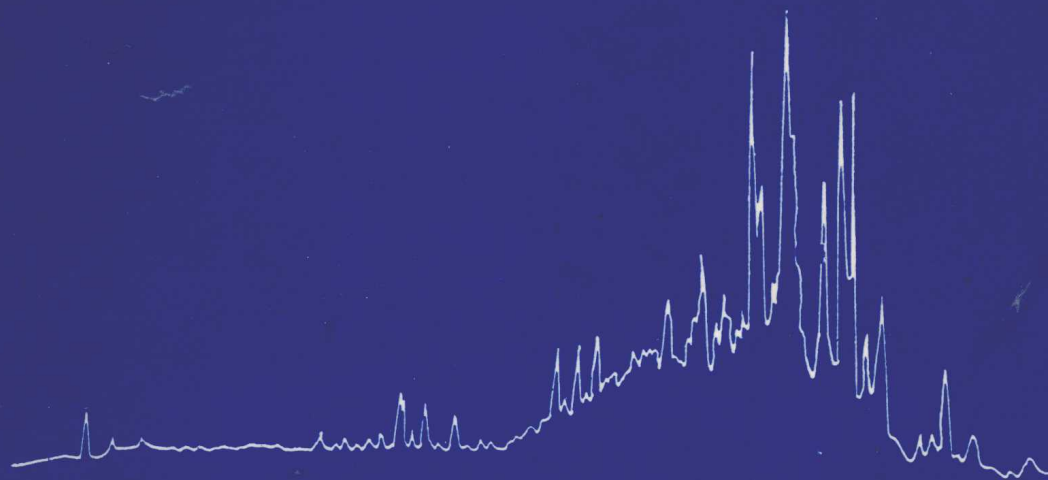


林壬子 张敏等 编译
高纪清 审校

油藏地球化学进展



陕西科学技术出版社

油藏地球化学进展

林壬子 张 敏等 编译
高纪清 审校

陕西科学技术出版社

(陕)新登字第 002 号

油藏地球化学进展

林壬子 张 敏 等 编译

高纪清 审校

陕西科学技术出版社出版发行

(西安北大街 131 号)

西安石油学院印刷厂印刷

787×1092 毫米 16 开本 19.5 印张 45 万字

1996 年 4 月第 1 版 1996 年 4 月第 1 次印刷

印数:1—1000

ISBN7-5369-2501-8/TE·15

定 价:30.00 元

序

自 80 年代中期以来,有机地球化学 的一门重要分支学科——油藏地球化学已经脱颖而出,并为广大的石油地球化学家和石油地质学家所关注。在过去的 30 年里,有机地球化学的研究领域主要在烃源岩评价、油源对比抑或油/油对比以及资源量评价等方面。近年来,石油地球化学家的研究焦点已从勘探领域逐渐转移到与开发过程及油藏有关的问题,并逐渐形成了油藏地球化学这门新兴的前沿学科。在国外,尤其是西欧国家,油藏地球化学正蓬勃发展,方兴未艾,其研究内容已涉及到油气勘探与开发的诸多领域。

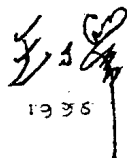
石油向储层注入的机理及油藏聚集史的研究就是其中的一个重要研究内容。它不但对于如何寻找到有利勘探区块、发现次生油藏有现实指导意义,而且由于它揭示了储层的成岩演化与石油聚集之间的关系,使我们有可能从中得到成油过程的反演——采油过程的一些机理性认识。

油藏地球化学描述展示了石油组分在储层三维空间上的变化趋势及其规律性,认识了原油族组成在油藏内的分布特征。通过进行单一油藏中石油亚群的快速对比,可以确定油藏中的有机隔层——沥青垫,从而判断是否存在油水界面及其变迁历史。此外,利用油藏流体(油气水)的地球化学特征来认识储层的分隔性和连通性,为油藏开发方案的制订与优化,提供更精细的地球化学依据。

林壬子教授多年来一直致力于有机地球化学的科研和教学工作,思维敏捷,学术造诣深。近几年来,他与同事们在国内率先开展了油藏地球化学研究,调研了大量的文献资料并编译出版了这本《油藏地球化学进展》。书中编译的文章大体上反映了 80 年代末期至 90 年代初期国际上的最新成果和进度。本书的出版和发行无疑对推动油藏地球化学这一新兴学科的发展起到积极的作用。同时,在丰富和完善我国陆相油藏地球化学的理论方面 also 具有重要的学术价值和潜在的经济效益。

做为一名油田开发工作者,我衷心的期待着《油藏地球化学进展》,能为我国的油气田开发做出重大的贡献。

中国石油天然气总公司
开发生产局局长



1985

引言

——石油地球化学的战略转移

20年来,随着干酪根成烃演化学说和生物标志化合物理论研究的进展,把石油地球化学研究工作推向了一个高峰。它使人们对于原始有机质的成烃机制、油气资源评价、油气源的对比研究及原油的生物降解作用等重要问题有了崭新的认识,并且进入了科学的定性和定量化阶段。于是确立了石油地球化学在油气勘探中不可动摇的地位。

随着科学与技术的迅猛发展,从80年代后期开始,国际上的石油地球化学研究工作正在进行着战略转移。从每两年召开一次的国际有机地球化学会议发表的文献可以看出,当前,有关干酪根理论及应用的学术论文,有关生物标志化合物测试与应用的学术论文在国际盛会中所占的比重正在逐步减少,取而代之的是有关“Reservoir Geochemistry”的论文。

梅博文教授率先比较系统地向国内同行引荐了该领域的早期研究成果。并将其译著取名为《储层地球化学》。该书荟萃了有关烃源岩在干酪根演化过程中排释的有机酸在石油储层孔隙发育过程中有机—无机反应。储层中有机酸的物化分析技术以及储层孔隙早期预测的理论和方法等方面论文。

然而,转瞬之间,Reservoir Geochemistry的研究领域迅速扩大,笔者组织编译成20篇论文,并将本书取名为《油藏地球化学进展》。因为而今“Reservoir Geochemistry”已经跨越有机—无机反应,我以为它的内涵包括了以下四个主要研究领域:

(1) 储层孔隙形成的有机—无机反应及储层孔隙分布预测

由于离子色谱、等速电泳等先进测试技术在石油地球化学研究中的应用,促使人们对于成岩过程中有机酸的类型及其成因机制产生了新的认识:即伴随着干酪根逐步有序化的过程,伴随着烃源岩的压缩失水过程,生油层中大量的有机酸被排挤进了储集层。这个过程可能从成烃早期延续到高成熟期。有机酸进入储层后,对于储层孔隙的形成和改造作用是勿容置疑的。尤其值得指出的是有机酸(特别是短链脂肪和酸类)对于硅酸盐岩(诸如长石砂岩)储层的作用,倘若与CO₂相比,其溶蚀能力更强。而且有机—无机反应所形成的产物往往是金属有机酸络合物,它们通常溶解于油田水,而不易形成导致储集岩孔隙重新堵塞的新的沉淀物。人们还认识到Ⅲ类干酪根发育的沉积区,更有利于有机—无机反应的进行,这主要是因为陆源高等有机质发育区,往往呈弱酸性的还原环境,有利于有机酸的生成与保存。

如同原生孔隙度可在一定程度上由沉积趋势来预测那样,学者们试图在认识次生孔

隙形成机制的基础上,利用地球化学趋势来预测孔隙度增大过程的发生和范围。

(2)油藏地球化学描述与油藏注入史研究。

油藏描述是 80 年代的热门话题,然而,它们都只限于根据地质、测井和地震勘探资料来进行描述。石油地球化学家们后来提出了采用 FID/TLC(薄层色谱—氢离子检测)技术和 OSA(油显示)分析技术,进行密集采样分析,建立油藏地球化学剖面,从而使油藏地球化学描述成为现实。FID/TLC 通常谓之“棒色层”分析,它不仅具有快速分析的特点,而且能获得有关原油或者油砂抽提物组成的高准确度、高精密度的分析结果。建立油藏地球化学剖面之后,人们更加深刻地理解了油藏中的两个非均质性,即储层非均质性与流体(油气水)的非均质性。人们准确地观察与判断了许多横隔于储层之间的“沥青垫”,它们往往是良好的天然隔层,于是势必影响到调整与重新制订开发方案或者增产措施。

油藏注入史是一项更有价值的研究工作。当石油注入储层之后,石油储层内的地球化学作用诸如生物降解和水洗作用,重力分离和沥青垫的形成以及地质层效应都是控制石油在储层空间上分布的非均质性的客观原因。而烃类流体在储层内的低速混合作用,则是促使储层中这种非均质部分或全部消除的主要因素。这种混合作用,通常包括热对流、密度驱动和扩散混合作用。油藏注入史正是这一对矛盾在不同时间域和空间域的具体表现。国外学者正是基于油藏地球化学描述与储层中石油的混合作用的原理,综合利用自生包裹体中烃类组成特征、残余油和储层石油的总体组成和生物标志物分子组成的特征;结合成岩史、流体史和源岩热演化史分析资料,有效地指明了石油向油藏注入的方向和时间。从而建立起油藏注入史的模式,为勘探与开发提供了极其宝贵的资料。这项研究工作对于多油源、多成烃期、多构造运动期及多次成藏的油气探区,具有更加宝贵的实用价值。

(3)油气田开发动态的地球化学监测技术

油气田开发动态的监测与研究是制订开发方案、调整增产措施的重要依据。当前普遍采用的方法是生产测井、分层测试或者示踪原子测井等等。它们的共同的缺点不但是成本高,而且必须关井、停产、不作业的条件下进行。石油地球化学家们关注着这一弊病,探寻着如何采用井口采样的在线分析方法,来解决这一技术难题。迄今,已经见到了良好的开端,而且将涌现出更多、更有效的新技术。关于混层开采中单层产量分配的色谱指纹相关分析,便是其中已获得成功的技术。

这项技术的关键在于采用毛细色谱氢离子火焰检测技术,得到特定范围的气相色谱,配合以色谱/质谱分析鉴定、选择特征峰,建立各单层原油样品的原始“指纹”特征。进而,建立不同混合配比的差别模型并设计专用软件,使其在严格相同的实验条件下,具有自动检索和自动对比功能。最终,对未知混层样品进行分析测试,推算出各单层油砂组(段)在混合采出原油中的贡献率。

另一项监测属于无机地球化学监测技术,其核心的内容是根据油田水化学分析资料和储层的岩矿特征、岩石化学分析资料,通过研究水岩作用以及进行一系列水在储层中的地球化学模拟,来评价油田开发过程中水—岩体系的地球化学过程,进而解决油田开发研究中一系列重大的理论和实际问题。例如稠油油藏开采的动态监测问题。国外学者已经采用等离子光谱技术,分析稠油开采中,蒸汽驱动的前沿、驱扫效果以及蒸汽驱动过程中水—岩相互作用和储层性质的变化,直接用于指导油田开发生产。

(4)油田开发中油—岩润湿性的地球化学机制及其应用

油气的开采过程,根据不同的油藏地质特征及不同开采阶段,人们总是采用多种多样的驱动方式。而不同方式的驱动结果经常引起油藏中流体地球化学特征的变异,它们显然影响着流体的流动性能,影响着储层对于流体的吸附性与润湿性。因此,研究其间的因果变化是很有意义的油藏地球化学问题。

然而,目前人们对其认识不足。诸如注水、蒸汽驱、聚合物驱、CO₂驱,以及火烧油层、细菌采油、超声波采油过程中,人们极为关注的流体物理性质的变化,而很少思考引起这一番物理性质变化重要的内在原因——流体化学组成的变化。研究表明,原油中少量乃至微量的非烃(胶质)或者沥青质馏分,往往是导致储油层润湿性反转的必要因素。国外石油公司已经不惜重金组织力量研究非烃和沥青质的结构、组成及其变化,因为它们往往是影响油岩润湿性的重要因素。然而,有关这方面的专题报告如麟毛凤角,这显然与各石油公司的切身利益休戚相关。

油藏地球化学是一个新开拓的学科领域,它将像是早晨八九点钟的太阳,必将欣欣向荣,蒸蒸日上,必将成为指导油田开发方案设计和提高油田最终采收率的一把金钥匙。

“他山之石,可以攻玉。”前述内容可以视之为本书内容的简介。我们编辑《油藏地球化学进展》之宗旨乃在于祈望本书的出版能在我国石油地球化学研究者进行战略转移之际,发挥推波助澜的作用,谨此而已。

欠妥之处,敬望赐教。

林壬子

1995. 12. 31

目 录

引 言	(1)
石油入侵对成岩过程的影响	
—北海中部 Fulmar 砂岩储层实例	(1)
北海乌拉油田储层成岩演化与石油入侵之间关系	(11)
油藏有机地球化学	(27)
石油在地下的运移和聚集	(40)
从源岩到圈闭的运移	(72)
石油聚集史的确定(从挪威北海中央地堑 ULA 油田为例)	(97)
苏丹 Unity 油田的石油组成变化和储层连续性	(110)
挪威北海 Gullfaks 油田降解作用和成熟度	
对石油柱非均质性的控制	(129)
北海 Tampen Spur 地区 Gullfaks 油田	
Brent 油藏原油注入史研究	(145)
斯塔克施塔特油田油藏地球化学	
—反映聚集史和多源输入的组成非均质性	(155)
原油组成的 TLC—FID 分析技术在油藏描述的应用	(169)
热抽提、热解—色谱、色谱—质谱和同位素分析技术在 Eldfisk 及外围油田	
石油非均质性检测中的应用	(185)
单一油藏内石油种群的快速对比方法应用于油藏描述	(213)
自生包体中烃类的组成在阐述油藏注入历史方面的应用	(223)
地球化学怎样帮助在油气田中确定其储层分隔性	(245)
沉积有机氮的成因及成岩作用	(253)
混合原油指纹色谱分析及其应用于产量分配计算中的	
新技术	(266)
油藏地球化学:方法、应用与机遇	(277)

石油入侵对成岩过程的影响

——北海中部 Fulmar 砂岩储层实例

张 敏 编译

摘要 对北海中部 Fulmar 油田 Fulmar 组(上侏罗统)的岩心样品,进行了沉积岩相学和石油地球化学方面的研究。石油饱和带中石英次生加大和钾长石颗粒的钠长石化程度均低于水饱和带。然而,石英次生加大中流体包裹体的显微测温研究表明,油的与水饱和带中包裹体的温度相近(85~125℃),且最大记录温度与现今储层温度(大约 130℃)接近。这说明石油饱和带中石英次生加大继石油侵入之后一直持续发育,但与水饱和带相比,这种作用受到抑制。因此,石英胶结物必定局部来自压溶。

油饱和带与水饱和带相比,钾长石的钠长石化明显降低(大约 50%)。由于钾长石的钠长石化依赖钠的供给和钾的迁移,所以石油侵入之后有可能终止。钠长石化作用所见到的差异,说明 Fulmar 储层在晚第三纪时被充填,该估算的年代与用邻近生油盆地中石油生成模拟确定的时间大致吻合。

Fulmar 砂岩含极少量或不含有高岭石、长石和碳酸盐,亦无地下淋滤痕迹。这可能是 Fulmar 砂岩为滨海砂岩,局部为浊积岩,未曾暴露于大气水之故。与 Fulmar 砂岩紧密相邻的未成熟至成熟的 Kimmeridge 泥岩对次生孔隙发育影响甚微,暗示该套生油岩生成的有机酸或二氧化碳对次生孔隙的发育并不重要。

1. 引言和地质背景

我们在文中不仅阐述了北海中部(图 1)Fulmar 油田上侏罗统 Fulmar 组岩层的岩相学和地球化学研究成果,而且还探讨了石油侵入对储层成岩作用的影响。同时评述了长石和碳酸盐淋滤形成次生孔隙的由来。

Fulmar 油田储层由上侏罗统(牛津阶—启莫里支阶)浅海(大陆架或临滨)砂岩和浊积砂岩组成,有关该地层的描述前人已有报道(Johnson 和 Stewart, 1985; Van der Helm 等, 1989)。Kimmeridge 泥岩组位于 Fulmar 组之上,主要为泥质序列,间含次深水砂体(图 2)。Kimmeridge 泥岩组的页岩和上白垩统的白垩为盖层(Johnson 等, 1986), Fulmar 储层现今地温大约为 130℃;相对于正常静水压力来说,具有 1100 磅/英寸² 的超压(Johnson 等, 1986; Stewart, 1986);镜质体反射率 R_0 大约为 0.7%。采自两口井(30/16—7 和 30/16—FA26 井)油饱和带和水饱和带的样品,分别代表 Kimmeridge 泥岩组(Ribble 储集单元)和 Fulmar 组(Mersey 和 Lydell 储集单元)(图 2),取样深度为 3211.3~

3490.4m。

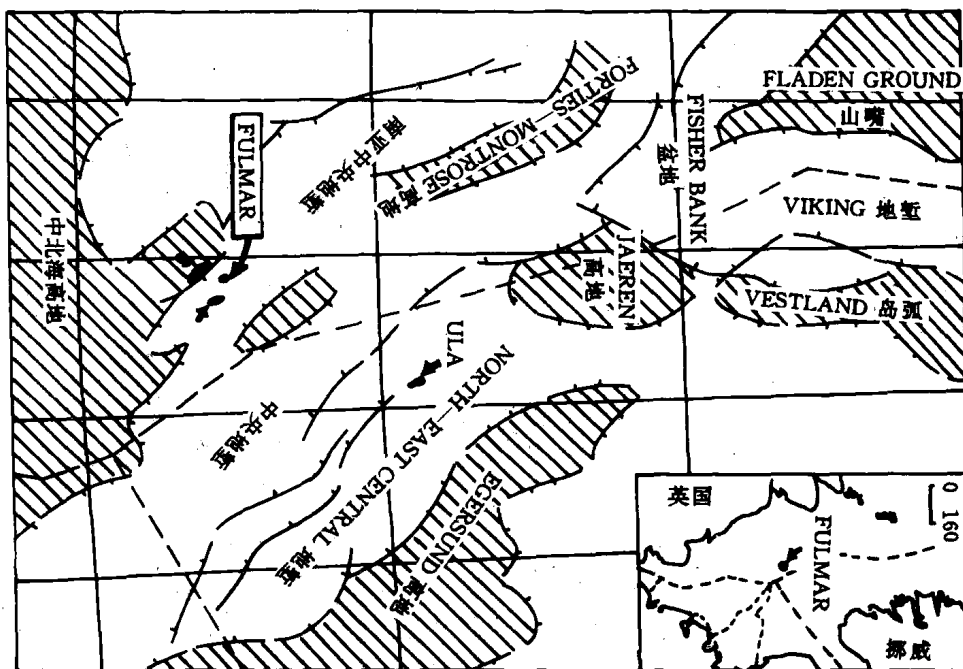


图 1 Fulmar 油田和本文所提及的其它油田之位置
以及北海中央部分的主要构造单元(阴影部分为构造隆起)

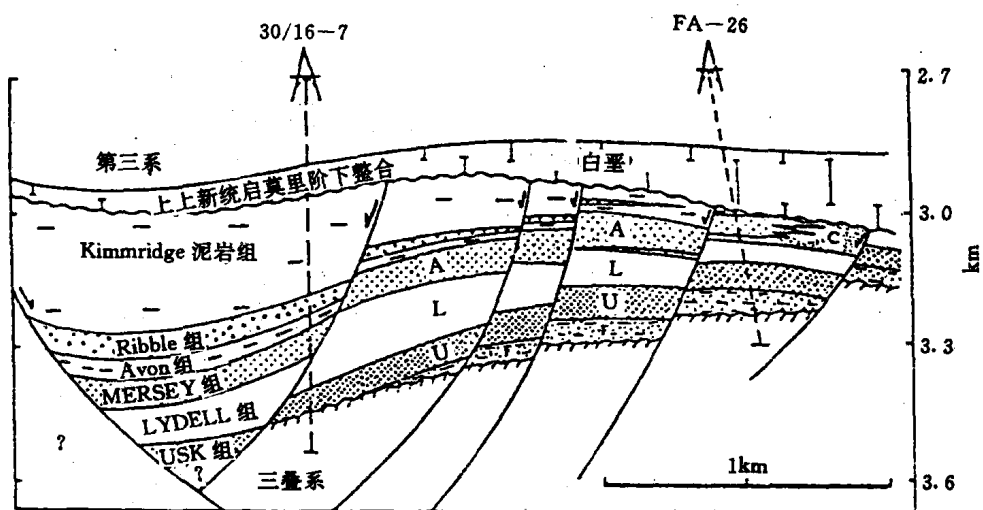


图 2 Fulmar 油田横剖面及两口研究井的位置
(据 Johnson 等,1986)

2. 石油地球化学

Karlsen 和 Larter (1989)利用薄层色谱和火焰离子化检测技术(TLC—FID)分析了

岩芯中石油的组分。地球化学测井表明:30/16—FA26 井在整个采样间段内都含有高浓度(20~45 毫克石油/克岩石)相对均质的石油;而 30/16—7 井则仅在深至 3300m 左右显示有较高浓度的石油,低于 3300m(相当于该井油水界面)仅发现少许沥青质原油的痕迹(Johnson 等,1986)。因此,这两口井分别代表水饱和带(30/16—7 井 3301m 之下)和油饱和带(30/16—FA26)。

表 1 列出岩心抽提物通过色谱—质谱分析所获得的饱和烃和芳烃组分中与成熟度有关的某些生物标志物参数(Mackenzie,1984)。

表 1 岩心抽提物通过色谱—质谱分析获得饱和烃和芳烃组分中与成熟度有关的某些生物标志物参数

C ₂₂ S—C ₂₂ 藿烷	58%
C ₂₀ S—C ₂₉ 规则甾烷	50%
藿烷 X/(藿烷 X+降莫烷)*	0.84
T _s /T _m **	1.5
(5 α ,14 β ,17 β C ₂₉ S+R)/ (5 α ,14 α ,17 α C ₂₉ S+R 甾烷)	1.32

注: * 引自 Cornford 等(1986);

** T_s—三降新藿烷,T_m—三降藿烷。

3. 岩石学

总成分是根据35块薄片计点(250个)分析的结果。砂岩由不同粒径(细粒至粗粒)组成,分选普遍较差。长石含量(主要为钾长石)为15~34%,云母(白云母占优势)含量为2~8%;泥质和火山质岩屑的含量为1~4%;黄铁矿、海绿石和重矿物为次要组分。在30/16~FA26井样品中,硅质海绵岩屑尤其丰富。其含量可占整个岩石体积的25%。砂岩常具有好的储集性能,孔隙度分布范围为10~30%,其值主要取决于胶结物的含量。胶结物的主要类型为石英,长石次生加大、玉髓、方解石和白云石。表2列出油和水饱和带中自生矿物相的相对丰度。

钾长石次生加大形成较厚的自形边(10~30 μ m),且广泛分布。阴极发光(CL)清晰地展示出长石次生加大的范围,即围绕发浅蓝光的碎屑长石颗粒周围的无光带便是长石次生加大的产物。阴极发光研究还确定出石英次生加大一般有一主发育带,其加大边均匀暗淡,厚度(在薄片)中由小于5~50 μ m不等。相邻颗粒的石英次生加大互相连锁形成孤立的孔隙。玉髓胶结物与硅质海绵岩屑有关,它仅在30/16—FA26井少数样品中见到,且以纤维丛生状形式出现,并形成颗粒漂浮的基质。玉髓的分布受沉积相控制(Johnson 等,1986;Stewart,1980)。在致密胶结层中,粒间孔隙度所剩无几,但在玉髓纹理之间的微孔隙则发育。长石和石英次生加大,似乎受玉髓的胶结作用抑制。在玉髓缺乏的地方,次生加大明显增强。

表2 油饱和带和水饱和带中自生矿物相比较

井号	岩心深度 (米)	储层 单元	带	自生矿物相(%全岩)								
				早期成岩(<2km)		晚期成岩(<2km)						
				长石次 生加大	玉髓	方解石十 白云石	石英次 生加大	钠长石化长石				
30/16-7	3250.1	Ribble	油	4.5	—	1.0	2.5	6.0				
	3260.2			2.5	—	3.0	2.0	4.5				
	3260.4			5.0	—	2.0	2.0	4.0				
	3277.1			3.0	—	2.0	1.5	5.0				
	3314.15			Mersey	水	3.5	—	6.5	3.0	9.5		
	3319.2					4.0	—	11.0	2.5	8.5		
	3319.3					2.5	—	5.0	3.5	11.0		
	3330.3					4.5	—	5.5	3.5	10.0		
	3330.39					3.5	—	6.0	3.0	9.5		
	3330.42					3.0	—	5.0	3.5	12.0		
	3330.52					3.5	—	3.0	4.0	9.0		
	3473.0					Lydell		3.5	—	9.5	2.5	11.0
	3473.15							3.0	—	11.0	4.0	10.0
	3473.2							4.5	—	12.0	2.5	9.5
	3490.4			4.0	—			20.5	2.0	9.0		
30/16 -FA26	3211.2	Mersey	油	2.5	—	—	2.0	5.0				
	3211.3			2.5	—	—	1.5	4.5				
	3211.4			3.5	—	1.0	1.0	6.5				
	3211.5			4.5	—	—	1.0	6.0				
	3222.5			1.0	—	—	1.5	5.5				
	3243.2			2.0	30.0	—	1.5	4.5				
	3243.3			2.5	18.5	—	1.5	4.0				
	3245.5			2.0	15.5	—	1.0	5.5				
	3245.6			3.0	18.0	—	1.5	5.0				
	3245.6			4.5	—	—	1.5	5.5				
3254.7	4.0	—	—	2.0	4.5							

方解石以分散状斑点的微亮晶至亮晶晶体分布,并常溶蚀长石和石英颗粒。通过用能量色散X射线分析进行普查表明,方解石中铁和镁的含量普遍较低(按重量,两者之和<2%)。在阴极发光下,方解石发均匀浅橙色光,无任何环带,且无淋滤现象,白云石主要以亮晶菱形体杂乱分布,亦见簇状菱形体,长石和石英颗粒常被白云石轻微交代。阴极发

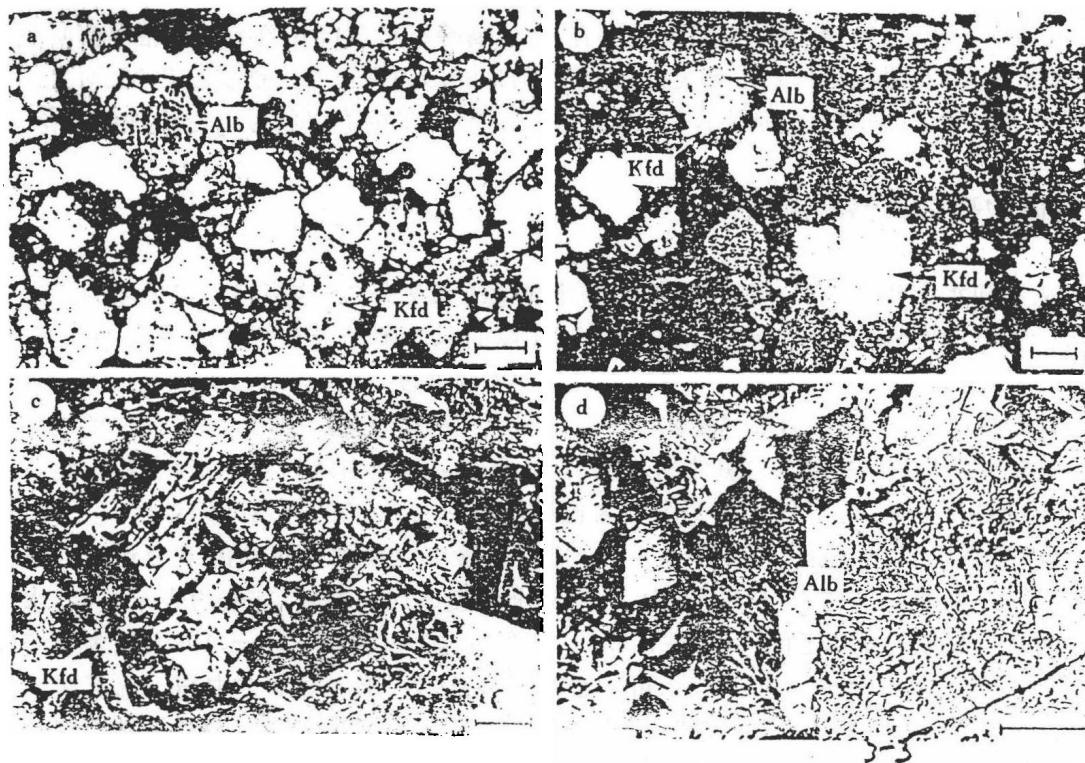


图3 钠长石化的钾长石颗粒的结构特征

(a)在透射光下;(b)阴极发光;(c、d)扫描电镜下观察的现象,弥散于微小包裹体中的钠长石化的长石(Alb)(a);无发光性(b);部分钠长石化残余的钾长石(Kfd)颗粒和呈明亮发光性的未钠长石化颗粒(b),其周围暗色颗粒大部分为石英。钠长石以无数微小自形晶(箭头所指)平行于母体钾长石颗粒的解理面生长(c),或以块状体形成碎屑钾长石的假象(d)分布,(a、b)的线段比例尺=100 μ m,(c、d)的线段比例尺=20 μ m

光研究表明,白云石菱形体具成分分带,偶见扇形分带,与方解石一样无任何溶解痕迹。

根据岩石学研究,对筛选的样品进行了碳酸盐胶结物的稳定同位素分析,同时对10个样品中的游离有机质、粉末状方解石和白云石胶结物还进行了碳和氧同位素分析。两口井油、水饱和带中方解石和白云石胶结物具相似的稳定同位素组成,氧和碳同位素变化范围窄,分别为-3.8~-4.5‰和-3.57~+1.1‰。倘若孔隙水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值接近于零,对应的温度大约为30~40 $^{\circ}\text{C}$;倘若孔隙水中 $\delta^{18}\text{O}$ 值更负时,相应的温度将更低,稳定同位素分析说明,碳酸盐胶结物一定是由生物成因的碳酸盐和早期海相胶结物或二者之一形成的,海相胶结物混有一定量来自硫酸还原带中 ^{13}C 被消耗的碳(Irwin等,1977)。

我们普遍观察到碎屑钾长石颗粒的成岩钠长石化作用。关于钠长石颗粒结构的详细描述参见 Saigal 等人(1988)的文章,在此仅作扼要说明。综合光学显微镜、阴极发光和扫

描电镜(SEM)研究表明,钾长石颗粒已被局部地乃至广泛地钠长石化,并且充填了大量褐色的微小包裹体(图3)。这些颗粒扫描电镜分析表明,钠长石呈现为具有明显光滑晶面的自形晶。钠长石晶体不是数量多而微小(1~30 μm)就是形成碎屑钾长石的假象(图3),而后者在水饱和带样品中更加普遍。在阴极发光中,钾长石颗粒钠长石化的部分不具发光性,而残余的部分呈蓝色发光。若干钠长石化晶体的显微探针分析表明,它们实质上为纯的钠长石($\geq 99.7\%$)。粘土矿物极少或没有,自生高岭石在两口井的所有样品中都明显缺乏。概而言之,石油饱和带中石英次生加大(平均1.5%)和钾长石的钠长石化(平均为5%)均低于水饱和带(平均值分别为3.1%和9.9%),这些差异的意义将在后文中加以讨论。

4. 流体包裹体显微测温法

从油和水饱和带中取样进行流体包裹体显微测温法分析。这些流体包裹体的测定是用气冷控制的 Chaixmeca 冷热台对30~40 μm 厚的双面抛光岩石薄片进行的。由于分析的主要目的旨在比较油、水饱和带中石英次生加大的温度,因此仅对石英次生加大中现存的流体包裹体进行研究。通常包裹体小于5 μm ,但沿微粒环边或在次生加大部位偶见15~25 μm 的包裹体(图4)。由于包裹体的体积小,以及普遍表现出冰的准稳定状态,因此冰熔温度不能准确记录,但可以记录四个较大包裹体(15~25 μm)的再现冰熔温度。均一温度 T_1 比较容易记录,不过仅只是在4至5个冷热台实验中收集到再现的温度资料($< 5\%$ 变化)。显微测温的结果列于表3和图5中,分析51个包裹体均一温度,其值均表示出油、水饱和带两者具相似的变化范围(86.4~125.5 $^{\circ}\text{C}$)(图5)。前人(例如 Hanor, 1980)认为在溶解甲烷气存在下,均一温度的压力校正可以忽略。我们认为,压力对本文中均一温度测试的影响是微不足道的。因为:(1)均一温度几乎等同现今储层温度,其最大值非常接近现今储层温度;(2)储层中石油含有适量的油-气比,这与封闭流体中溶解甲烷气的存在相符。最终冰熔的极限数值为-12~18 $^{\circ}\text{C}$,该值与16~22%(重量)的氯化钠等量盐度变化一致(表3)。

5. 成岩作用和石油侵入

早期成岩矿物有海绿石、玉髓、钾长石次生加大、方解石和白云石;而石英次生加大和钾长石颗粒的钠长石化,则代表晚期成岩变化(埋深 $> 2\text{km}$)。

5.1 次生孔隙和成岩高岭石的贫瘠

北海(例如中侏罗统)和其它地区的河流、浅海和三角洲砂岩中普遍发育的自生高岭石表明,在溶解长石和去母被消耗的情况下,高岭石形成的先决条件是暴露于大气水之中(Hurst 和 Irwin, 1982; Bjørlykke, 1984; Bjørlykke 和 Brendsdal, 1986; Bath 等, 1987)。北海上侏罗统砂岩广泛沉积于海相大陆架上,或者做为裸露高地斜坡带上的浊积岩。Ribble 储集单元(位于 Kimmeridge 泥岩组内)作为浊积岩沉积于浅海大陆架中,该浊积岩的物源来自 Auk 地垒(Jchnest 等, 1986; Van der Helm 等, 1989)。因此,该砂岩可能与 Auk 地

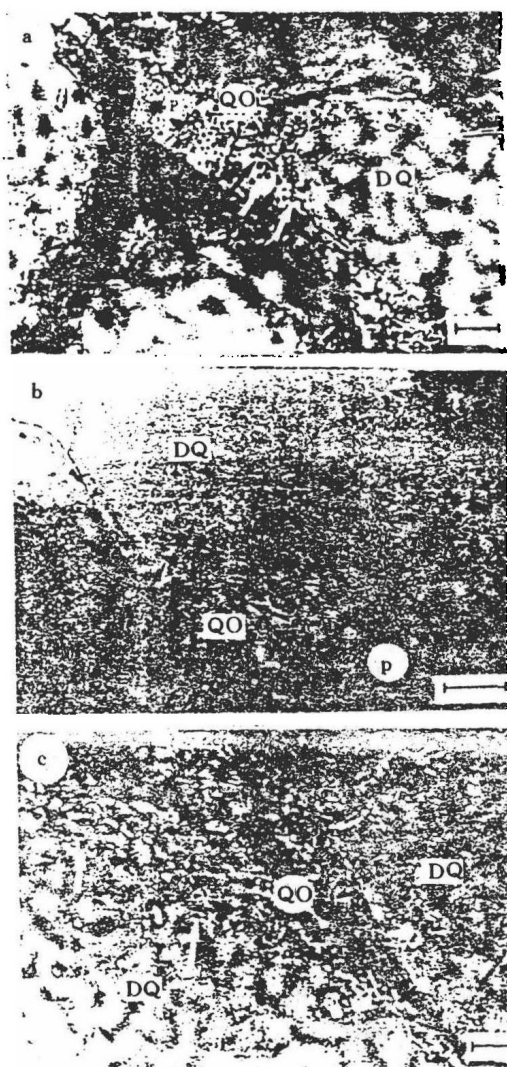


图4 透射光显微照片表示流体包裹体沿微粒环边及石英次生加大边分布

- (a) 样品采自30/16-7井油饱和带;
- (b) 样品采自30/16-7井水饱和带;
- (c) 样品采自30/16-FA26井油饱和带;

石英次生加大仅有一个主发育带, 一般来说, 微粒环边中包裹体比石英次生加大边内的包裹体小。有些包裹体中气相清晰可见, 箭头所指表示一些被研究的包裹体。

Q⁰代表石英次生加大; DQ 代表碎屑石英;
P 代表孔隙空间; 线段比例尺 ≈ 20μm

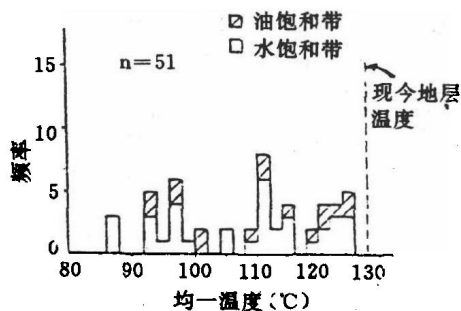


图5 研究样品中流体包裹体均一温度分布
(均一温度表明油、水饱和带中具相似的变化范围, 且最大温度接近现今储层温度)

全地下水体隔离。上述认识得到长石淋滤和自生高岭石缺乏的支持, 同时生产上也表明很少有水体进入该储层砂岩 (Van der Helm 等, 1989)。

胶结物的氧同位素值大约为 -4‰ (PDB), 且漂浮结构常因方解石胶而消失, 说明胶结物形成于早期成岩作用的低温阶段。同时, 胶结物的碳同位素值由接近于零或略小于零。表明它们主要是深海碳酸盐, 并混有一些缺乏¹³C的重碳酸盐, 后者可能导源于硫酸盐还原菌的作用 (Irwin 等, 1977)。前人曾认为成熟干酪根生成的酸性孔隙水对碳酸盐胶结物的溶解是形成次生孔隙的重要机理 (例如, Curtis, 1978; Schmidt 和 Mc-Donald, 1979a, b; Burley, 1986)。然而, 位于未成熟—成熟的 Kimmeridge 泥岩层间的 Fulmar 砂岩储层。其碳酸盐和长石均无淋滤现象, 否定了上述解释。该认识也受到其他一些人的批评 (例如, Bjϕhykke, 1980, 1984; Giles 和 Marshall, 1986; Lundegard 和 Land, 1986; Giles, 1987; Biϕrlykke 等, 1989; Giles 和 de Boer, 1989)。

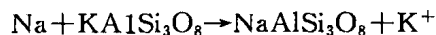
表3 石英次生加大中现存流体包裹体均一温度(T_h)和最终冰融温度(T_m)

井	岩心深度(m)	储集单元	带	包裹体数目	T_h ($^{\circ}C$)	T_m ($^{\circ}C$)	Nacl
30/16-7	3250.1	Ribble	油	7	86.4,88,94.4,97 105,119,111	-12	16
	3276.8			3	121.5,119,124		
	3277.1			1	97		
	3277.5			2	92.4,110.5		
	3314.2	mersey	水	11	97.6,110.7,114 123.5,106,925	-15.8	20.2
	3330.4			9	98.5,115,87,111 116,112.2,125.5 110.8,96		
	3490.4	Lydell		8	93.96.8,114.5,125.5 111,108.8,125.2,111.8		
	30/16-FA26	3211.3	Mersey	油	3	103,96.5,111	-18
	3222.5		油	2	93,108		
	3243.3		油	1	102		
	3254.6		油	4	123,115.5,122,1254	-14.5	18.9

5.2 石油侵入对成岩作用的影响

油饱和带和水饱和带的样品中石英次生加大和钾长石颗粒的钠长石化发育程度的差异以及均一温度资料为石油侵入减弱了成岩作用这一普遍看法提供了关键性的证据。均一温度资料表明,油和水饱和带具相似的变化范围(85~125.5 $^{\circ}C$)(图5),其最大温度125.5 $^{\circ}C$ 接近现今储层温度(约130 $^{\circ}C$)。但在观测的样品中,油饱和带中石英次生加大发育程度明显低于水饱和带中石英次生加大(表2)。石英次生加大在丰度上的差异以及具有相似的包裹体均一温度,表明石油侵入限制了石英次生加大的速度率。

与形成石英次生加大相比,砂岩中钾长石颗粒的成岩钠长石化,不仅要供钠(可能来源于砂岩体外)而且要去钾(图6),钠长石化是等体积的交代作用,如下列方程式所示(Saigal等,1988):



在 Fulmar 储层剖面中,砂岩中缺乏高岭石和蒙脱石,预示了钾离子沉淀于页岩夹层中。因此,逻辑上推测石油侵入更容易终止钠长石化作用,而在含油带的饱和水孔隙中,石英次生加大的形成及高岭石的伊利石化更易持续进行。

假定石油侵入中止了钾长石颗粒钠长石化,那么在油、水饱和带中观察到的钠长石含量的差异,有助于推算石油侵入的时间。Saigal等(1988)对北海侏罗系,上白垩系以及第

三系砂岩储层及 Hatnbanken 地区钾长石的成岩钠长石进行了区域性研究,发现钠长石化始于 65°C(埋深为 2.2km),在大约 105°C(埋深为 3.4km)时,钠长石化含量达最大值。由于不能分析 Fulmar 储层的全套岩心,因此我们利用 Saigal 等(1989)提出的钠长石化梯度来推测 Fulmar 储层中石油侵入的时间。取 6.5% 作为该油饱和带中钠长石颗粒的最大含量,而水饱和带中平均含量为 10%(表 2),我们可获得石油注入储层时(即大量石油注入中止钠长石化的时间)的最低温度为 85~90°C(图 7)。同时利用 Stewart(1986)埋藏曲线和 36°C/km 地温梯度,可以推算出石油侵入发生于晚第三纪,当时储层埋深为 2400m(图 8)。上述结论与单独用生油岩加热速率和石油生成模拟确定的结果一致。

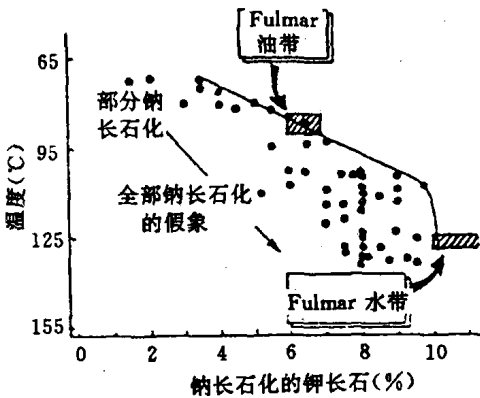


图7 Fulmar 储层油、水饱和带中钠长石化和 Saigal 等(1988)钠长石化梯度图钠长石化在水饱和带中更加明显(8.5~12%),而油饱和带中最大钠长石化为(6.5%),对应温度大约 90°C

由于石油通过运载体运移的速度比从成熟生油岩中排出的速度快(England 等, 1987),我们可以有把握地假设石油进入圈闭的速率控制因素是生油岩的成熟度。在常规地质加温速率(1~10°C/Ma)下,原始干酪根生成的液态烃及气体的温度为 100~150°C(Quigley 等, 1987)。这意味着对一个假定平坦(不倾斜)的生油盆地,潜在烃源岩形成的液态烃对于平均升温速率为 1°C/Ma 约需 50Ma,对于升温速率为 4°C/Ma 约需 12Ma 才能向圈闭排运。就 Fulmar 油田而言,我们采用 Stewart(1986)提出的成烃埋藏史和温度史,便可以知道主要事件是第三系的快速埋藏期,它导致 Fulmar 储层底部大约为 130°C 的现今地温(图 8)。从圈闭区到生油凹陷的广阔地区,第三纪剖面具有相对稳定的厚度(Ziegler, 1982)。因此,根据生油凹陷的埋藏速率,可以近似地推算出圈闭区的埋藏速率。如果

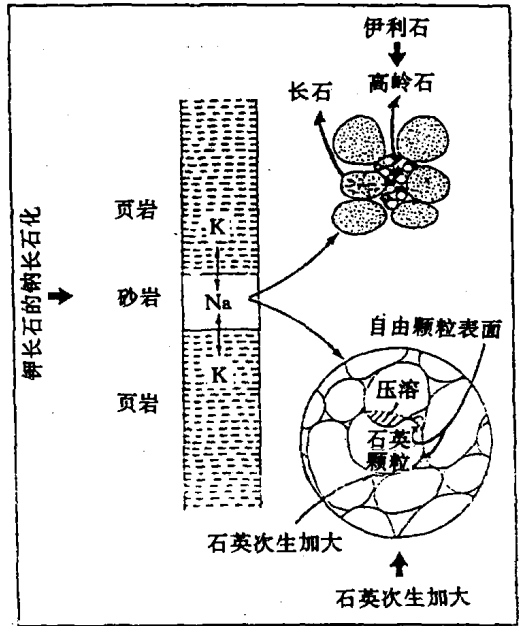


图6 不同成岩反应中离子局部迁入和迁移差的图解与伊利石化和石英次生加大相比,钾长石的钠长石化不仅需要 K⁺ 的供给而且要 Na⁺ 的沉淀
石油地球化学资料和甾烷质谱特征表明储层石油来自海相有机质占优势的碎屑生油岩,其成熟程度相当于镜质体反射率 R₀ 为 0.8~0.9%。

该生油岩最有可能是上侏罗统 Kimmeridge 泥岩层(Comfond 等, 1986),它存在于 Clyde 和 Auk 高地以东和以北的诸凹陷中(Johnson 等, 1986; Stewart, 1986)。我们推测 Fulmar 油田中至少有一部分石油来自 Clyde 高地的溢出口,而 Fulmar 油田的大部分石油则主要来自邻近生油凹陷的原始注入。除却前者,我们便可以推算石油注入的时间。