

文章编号:1000-0550(2014)04-0949-08

西湖凹陷砂岩储层异常高孔带分布及成因^①

苏 奥¹ 陈红汉² 曹来圣¹ 李成海³ 雷明珠⁴ 赵玉涛²

(1.中国石油东方地球物理公司研究院油气评价开发研究所 河北涿州 072750; 2.中国地质大学(武汉)构造与油气资源教育部重点实验室 武汉 430074;
3.中国石油华北油田分公司勘探开发研究院 河北任丘 062550; 4.中国海洋石油湛江分公司研究院 广东湛江 524057)

摘 要 依据大量岩石薄片、铸体薄片、碳酸盐碳氧同位素测试、流体包裹体分析、黏土矿物 X 衍射、激光共聚焦显微镜技术以及物性资料,结合区域构造沉积背景,研究了东海盆地西湖凹陷砂岩储层异常高孔带分布规律及成因。结果表明,储层 2 500~3 100 m 和 3 400~4 400 m 的深度段发育大量的次生孔隙,两段次生孔隙带成因不同。第一段次生孔隙是在酸性环境下主要由有机酸等酸性流体溶蚀长石类矿物导致,还有少部分是由 TSR 反应生成的 H₂S 溶蚀造成。第二段次生孔隙带主要由残余的早期酸性溶蚀孔和碱性环境下高岭石的伊利石化导致,少部分则由碱性流体溶蚀石英颗粒形成,同时异常高压保护深层次生孔隙,而且形成了一定量的裂缝。异常高孔带成因机理有助于优质储层的预测。

关键词 西湖凹陷 异常高孔带 分布 成因

第一作者简介 苏奥 男 1989 年出生 硕士 盆地流体地质,油气成藏及地球化学研究 E-mail:suao446@163.com

中图分类号 TE122.2 **文献标识码** A

0 引言

东海盆地西湖凹陷具有丰富的油气资源,而储层孔隙度决定了储存油气的能力,因此寻找优质储层是获得高产的必要条件。由于西湖凹陷低孔低渗储层中次生高孔带是油气主要聚集空间,因此把储层次生高孔带作为寻找相对高孔高渗优质储层的首选对象,对油气勘探具有重要的意义。尽管前人论述过西湖凹陷古近系储层发育异常高孔带的现象^[1,2],但都未对其成因机理做过系统和深入研究。本文在大量分析测试资料上,结合研究区的构造和沉积背景,对西湖凹陷古近系储层次生孔隙发育带的形成机理进行分析,并提出了一些新的看法,以期对寻找优质储层提供一些思路。

1 地质概况

西湖凹陷在东海陆架盆地的东北部,面积约 5.9 × 10⁴ km²,是东海盆地最具勘探潜力的凹陷^[3];迄今为止已在凹陷内完成探井 57 口,发现 7 个油气田及 12 个含油气构造,具有良好的油气前景。研究区新生带地层自下而上发育古新统、中上始新统平湖组、渐新统花港组、中新统龙井组、玉泉组和柳浪组,上新统三潭组及第四系东海群(图 1)。其中平湖组和花

港组是主要的储集层,主力源岩为平湖组煤系烃源岩^[4]。岩石薄片观察发现,储层砂岩类型以岩屑长石砂岩和长石岩屑砂岩为主,还有部分岩屑石英砂岩,不同地区砂岩类型有所差异。粒度上属于中—细砂岩,分选性较好,总体上砂岩结构成熟度中等—较

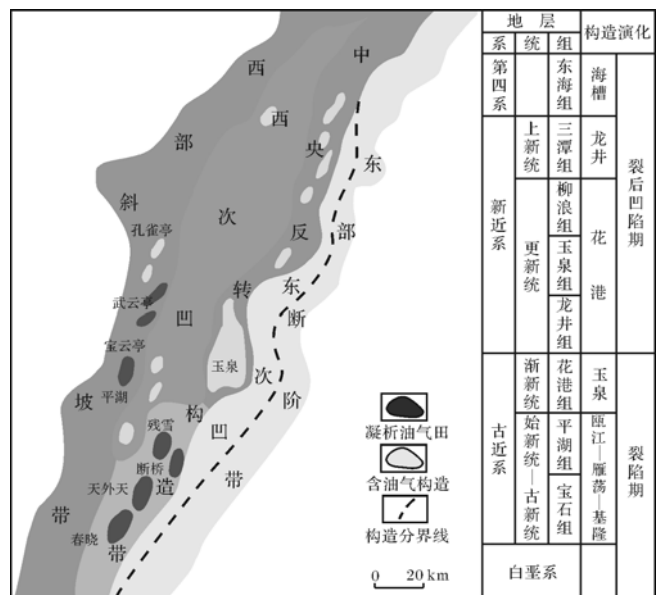


图 1 西湖凹陷各构造带、油气田分布及地层图

Fig.1 Distribution of various structural belts, oil-gas fields and strata of the Xihu depression

①国家自然科学基金资助项目(批准号:41202088)与“十二五”国家重大油气专项(编号:2011ZX05023-004-010)联合资助
收稿日期:2013-07-11;收修改稿日期:2013-09-23

好,成分成熟度较低。其中花港组下段和平湖组的物性已经达到了致密砂岩的标准。凹陷始新统至中新统发育海相和陆相两种沉积环境。海相沉积环境主要发育海湾三角洲相、海湾潮坪相和海湾浅海相;陆相沉积环境又可进一步划分为辫状河流相、湖泊辫状三角洲相和湖泊相^[3]。

2 次生孔隙的分布和类型

2.1 次生孔隙的分布

从工区 4844 块岩芯分析孔隙度和渗透率数据在地层纵向上的分布特征可看出,在 2 500~3 100 m 和 3 400~4 400 m 的深度段发育大量的次生孔隙(图 2)。不同地区由于沉积和成岩演化的差异性,其次生孔隙带发育的深度段不一致,其中西部斜坡带储层发育第一段次生孔隙带的深度段要大于中央反转构造带储层。在第一段次生孔隙发育带内,孔隙度最大高达 33%,平均在 20%左右;在第二段次生孔隙发育带内,最高孔隙度为 23%,平均孔隙度在 13%左右。

2.2 次生孔隙类型

通过铸体薄片鉴定,发现西湖凹陷古近系砂岩主要的孔隙类型有:残余原生粒间孔、次生孔;其中西湖凹陷砂岩储层主要的次生孔隙有以下几种类型(图 3):①粒间溶蚀孔:储层砂岩颗粒边缘以及颗粒之间的填隙物(绿泥石膜以及碳酸盐胶结物等)被溶蚀而产生的次生孔隙;西湖凹陷储层此种类型孔隙占总孔

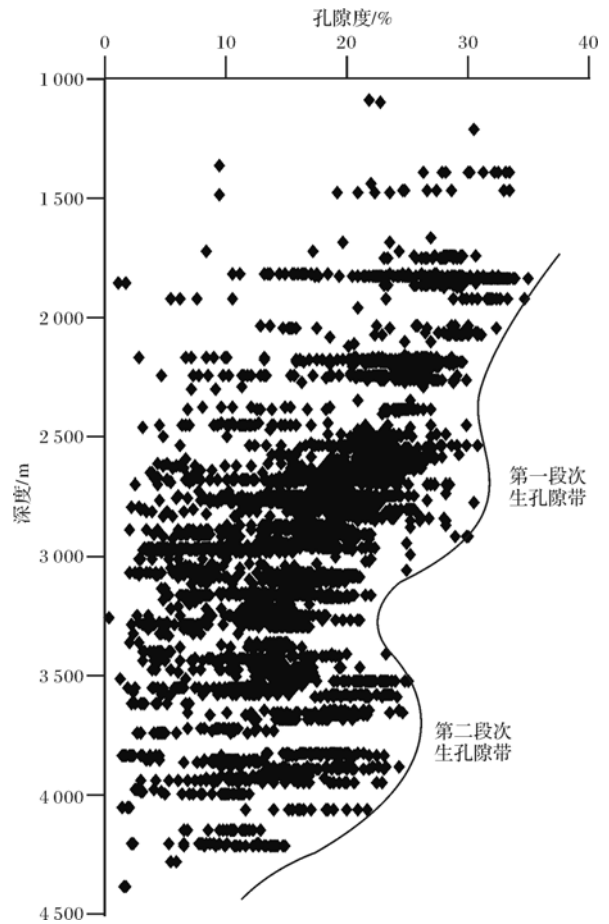


图 2 西湖凹陷储层孔隙度与深度的关系图
Fig.2 The plot showing the relationship between reservoir porosity and depth in the Xihu depression

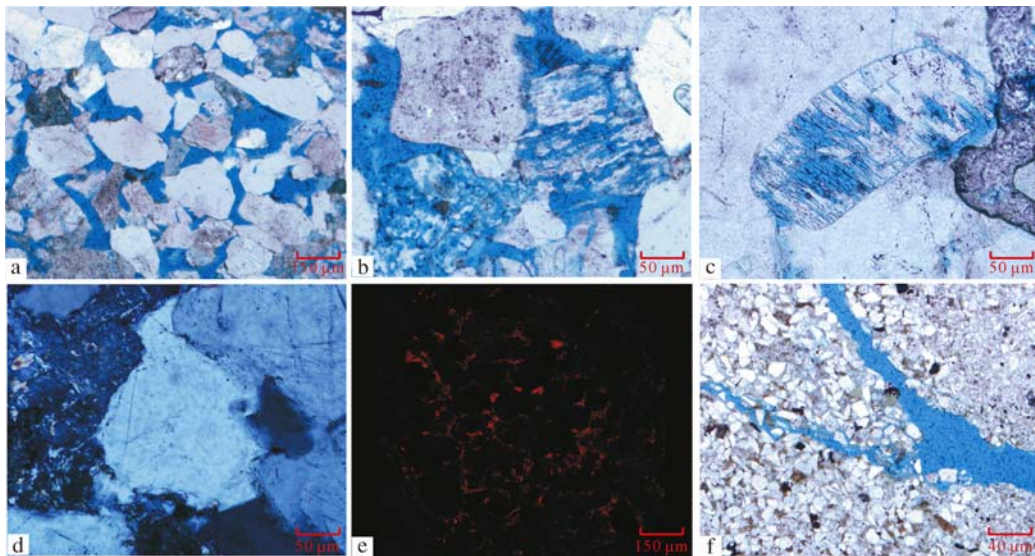


图 3 西湖凹陷古近系储层次生孔隙类型

a. CX1 井,2 770.37 m, 粒间孔和长石粒内溶孔,蓝色铸体;b. CX1 井,3 037.75 m, 岩屑粒内溶孔,蓝色铸体;c. DH1 井,3 413.80 m, 长石粒内溶孔,颗粒骨架俱在,蓝色铸体;d. DH1 井,4 108.75 m, 石英颗粒及加大边溶蚀形成港湾状;e. WYT1 井,3 594.1 m, 砂岩激光共聚焦照片,发育粒间溶孔、微孔和粒内溶孔;f. CX1 井,2 815.41 m, 粉砂岩中发育裂缝孔,蓝色铸体。

Fig.3 The types of secondary pore of Paleogene reservoir in Xihu depression

孔隙度的30%左右,是储层主要孔隙类型之一,它主要由长石颗粒边缘溶蚀和石英颗粒以及加大边溶蚀产生;②粒内溶蚀孔:储层砂岩颗粒被不完全溶蚀而产生颗粒内溶孔;西湖凹陷储层此种类型孔隙占总孔隙度的60%左右,是储层主要孔隙类型,它主要是长石和岩屑颗粒溶蚀产生;③裂缝:在上覆负荷和构造作用下,储层砂岩颗粒被挤压破裂产生的裂缝,主要分布在砂岩储层的中深段。

3 与成岩演化的关系

3.1 自生矿物的形成温度确定

西湖凹陷古近系砂岩储层中主要的自生矿物为碳酸盐胶结物、石英次生加大和黏土矿物。本文通过测试碳酸盐胶结物的碳、氧同位素和石英次生加大边中流体包裹体的均一温度来得到相应的形成温度,来作为成岩阶段的划分依据。

在显微镜矿物学观察基础上优先选出含单一碳酸盐胶结物的样品,采用磷酸法溶解,收集生成的CO₂,再利用Finigan MAT251型精密气体稳定同位素质谱仪进行检测分析碳氧同位素组成以避免多期碳酸盐混合造成同位素数据解释的困难。表1中PH5井的方解石胶结物来看,可以分为两期:第一期氧同位素在11.5‰左右,第二期在17‰左右,明显沉淀温度有差别。从含量来看也可以得到印证,成岩晚期的方解石含量较高,一般在10%以上,成岩相对早期的方解石含量较低,一般不超过6%。对碳酸盐胶结物氧同位素换算成其形成温度进行统计^[4,5],菱铁矿的形成温度在70℃左右,第一期相对较早的方解石形成温度在105℃左右,而第二期形成较晚的方解石主要形成在140℃~180℃之间,白云石形成温度在100℃~110℃之间。

表1 西湖凹陷储层砂岩碳酸盐胶结物的氧同位素分析结果

Table 1 Analysis of oxygen isotopes for the carbonate cements in the Paleogene sandstone in Xihu depression

井	深度/m	矿物类型	δ ¹³ C/‰	δ ¹⁸ O/‰	含量/%
PH4	3 685.07	菱铁矿	0.750	-10.220	8.120
PH5	3 035.40	方解石	-5.348	-17.119	10.00
PH5	3 285.40	方解石	-3.091	-11.757	5.300
PH5	3 506.09	方解石	-4.907	-17.527	24.60
PH5	3 696.10	方解石	-4.416	-14.850	8.900
PH5	3 700.11	方解石	-2.677	-11.575	2.400
PH5	3 411.40	白云石	-2.260	-12.280	26.50
PH5	3 284.20	白云石	-2.800	-12.390	19.36

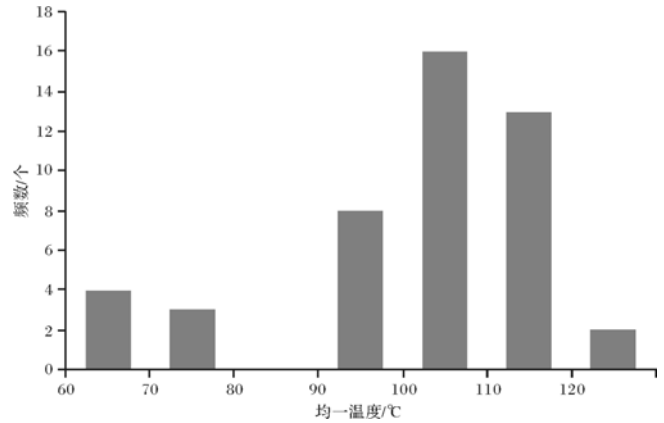


图4 砂岩储层石英加大边中包裹体均一温度

Fig.4 Homogeneous temperatures of quartz overgrowth in sandstone reservoir

采用Nikon 80I双通道荧光—透射光显微镜及Linkam THMS 600G冷热台对西湖凹陷储层砂岩石英加大边中流体包裹体进行显微测温分析,测定误差为0.1℃。本次实验室在中国地质大学(武汉)“构造与油气资源”教育部重点实验室完成。显微测温结果表明石英加大边形成于两个温度区间,少部分形成于70℃左右,大部分形成于90℃~120℃之间(图4)。

3.2 成岩演化阶段的划分及与次生孔隙带的关系

西湖凹陷砂岩的成岩演化历史与储层次生孔隙的分布特征存在密切的关系。本文综合利用黏土矿物混层比、镜质体反射率(Ro)、古地温和自生矿物的形成温度等资料对西湖凹陷储层的成岩演化阶段进行划分,认为研究区储层经历了早成岩A期、早成岩B期、晚成岩A₁期、晚成岩A₂期以及晚成岩B期(图5)。

(1) 早成岩A期

Ro<0.35%,有机质处于未成熟阶段,黏土矿物混层比大于70%。此阶段埋深小于1 100 m,结合古地温梯度,古地温应该小于70℃。此成岩阶段的主要成岩作用为机械压实作用,孔隙类型为原生孔隙。

(2) 早成岩B期

0.35%<Ro<0.5%,有机质处于半成熟阶段,黏土矿物混层比在50%~70%之间。此阶段埋深为1 100~2 300 m,古地温介于70℃~90℃之间,此成岩阶段的主要成岩作用仍为机械压实作用,有少量的石英加大出现,以及菱铁矿和早期的方解石的沉淀,孔隙类型以原生粒间孔为主,有少量的次生孔隙。

(3) 晚成岩A₁期

0.5%<Ro<0.7%,有机质处于成熟阶段的早期,

黏土矿物混层比在 35%~50% 之间,此阶段埋深为 2 300~3 400 m,古地温介于 90℃~115℃,此成岩阶段早期有方解石和白云石的沉淀,随着埋深继续增加,在进入生烃窗之前,有机酸大量释放溶蚀,发育了第一段次生孔隙带,同时石英加大和自生高岭石也在此段生成。孔隙类型为原生一次生的混合孔隙。

(4) 晚成岩 A₂期

0.7%<Ro<1.3%,有机质处于完全成熟阶段,黏土矿物混层比在 15%~35% 之间,此阶段埋深为 3 400~4 500 m,古地温介于 115℃~140℃,此成岩阶段发生高岭石的伊利石化,高岭石含量急剧减小,以及有晚期的含铁碳酸盐胶结物生成,此段发生溶蚀作用,发育第二段次生孔隙带。此时原生孔隙已经消失殆尽,次生孔隙为主要的孔隙类型。

(5) 晚成岩 B 期

1.3%<Ro<2.0%,有机质处于高成熟阶段,黏土矿物混层比小于 15%,埋深大于 4 500 m,古地温大于 140℃,此成岩阶段主要发生交代作用,次生孔隙压实和充填减小。

从上述分析可以看出,西湖凹陷砂岩储层埋深在 2 300~3 400 m 时处于晚成岩 A₁期,与前述 2 500~3 100 m 的第一次生孔隙发育深度段有良好的对应;当砂岩储层埋深在 3 400~4 500 m 深度处于晚成岩 A₂期,与前述 3 400~4 400 m 的第二次生孔隙发育深度段有良好的对应。

4 次生孔隙带的成因分析

4.1 第一段次生孔隙带的成因

第一段次生孔隙主要是在酸性环境下有机酸等酸

性流体溶蚀长石类矿物导致,还有少部分 TSR 反应(硫酸盐的热氧化还原反应)生成的 H₂S 溶蚀造成。

4.1.1 有机质热解作用产生的有机酸和有机酸脱羧产生的 CO₂ 溶蚀

在干酪根热降解时,会脱去外部的含氧官能团,形成大量的有机酸^[6]。有机酸溶蚀主要表现在对颗粒骨架(长石、岩屑)和碳酸盐胶结物的溶蚀。此种溶蚀证据如下:

(1) 从图 6 看出各个区带有机质热演化进入的成熟阶段(Ro=0.5%~0.7%)的深度门限不同,其中西部斜坡带为 2 500~3 200 m、西次凹为 2 400~3 300 m、中央反转构造带为 2 000~2 700 m 以及东次凹为 2 400~3 100 m,但是均与第一段次生孔隙带深度段(2 500~3 100 m)相吻合。此阶段会释放大量的有机酸,随着埋深的增加逐渐被压实出来,进入储层进行溶蚀。

(2) 从储层砂岩碳酸盐胶结物碳、氧同位素角度来看,不同成因的碳酸盐胶结物其碳同位素值分布不同;海水过饱和生成的碳酸盐胶结物 δ¹³C 一般分布在-4‰~4‰之间,属于无机碳源^[7];而有机酸脱羧形成的碳酸盐,其 δ¹³C 比无机成因碳酸盐的 δ¹³C 要轻些,从图 7 可以看出样品几乎全部落在与有机酸脱羧作用有关的碳酸盐区,且发现部分样品碳酸盐胶结物 δ¹³C 明显向负偏移,说明有机酸参与部分砂岩碳酸盐胶结物的形成^[8]。

(3) 从高岭石的含量变化的角度也可以证实此机理。从图 8 可以看出,NB25-6-1、PH1、PH5 和 DH1 井均在 2 200~3 000 m 左右高岭石的含量增加,指示次生孔隙的发育,与第一段次生孔隙带深度相吻合。

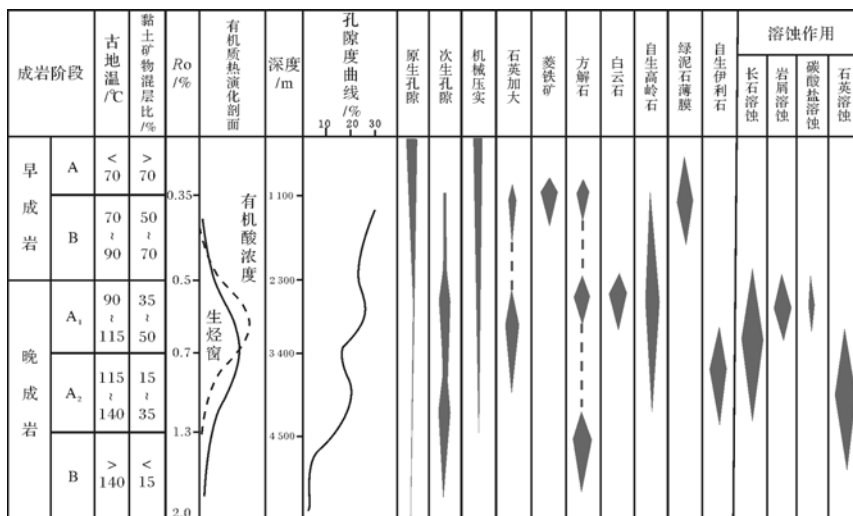


图 5 西湖凹陷碎屑岩储层成岩阶段划分

Fig.5 Diagenesis evolution stages of sandstone reservoir in Xihu depression

(4) 储层中石英次生加大的成因侧面证实有机酸引起溶蚀。一般硅质来源可能来源于沉积水体、热液和地层本身^[9];若为地层本身提供,又分为压溶作用、长石溶蚀和高岭石的伊利石化这三种方式。由于这几种成因主要发生在成岩作用的不同阶段,因此测定石英次生加大边里的流体包裹体均一温度,便可确定石英次生加大来源于何种成因。测试结果(图4)表明均一温度主要分布在90℃~120℃之间,少部分分布在70℃左右。因此石英次生加大形成的温度应该普遍大于70℃,所以不是沉积水体产生,同时热液产生的石英次生加大应该具有较均一的包裹体温度,所以硅质应该来源于地层本身。测试得到石英次生加大边中包裹体的均一温度主要分布在90℃~120℃之间,因此石英加大边主要形成于在晚成岩A期,因此不是压溶提供。从图8可以看出,高岭石的伊利石化主要在3 500~3 700 m,此时的地温已经大于120℃,也并非高岭石的伊利石化提供,因此硅质主要来源于有机酸对长石溶蚀产生,与此同时晚成岩A期对应的深度段是正好是第一段次生孔隙发育带,从

而证实了有机酸对长石溶蚀的深度段与第一段次生孔隙带相对应。

根据镜下观察长石溶孔与碳酸盐溶孔的比例,统计发现西湖凹陷储层长石溶孔占次生孔隙的5%~50%,本文认为有机酸和有机酸脱羧产生的CO₂主要对长石与含长石火山岩屑进行溶蚀,而对碳酸盐胶结物溶蚀的溶蚀产生次生孔隙的现象相对不明显;原因有两点:①西湖凹陷的烃源岩主要是煤系母质,煤系地层相对而言,有机质被埋藏后,会很快分解形成大量的腐殖酸,储层流体早期就具有偏酸性的特点,因此西湖凹陷早期往往较少发育碳酸盐胶结物,因而被溶蚀的碳酸盐胶结物含量就更少。②从有机酸对长石和碳酸盐胶结物的反应难度来看,有部分学者认为有机酸对长石反应的化学反应自由能要小于对碳酸盐反应的自由能,导致有机酸更易于溶蚀长石^[10,11];还有学者认为碳酸盐类与有机酸反应生成的CO₂是气体,因此地层的高压条件一定程度上限制了此反应的发生^[12]。本文则从酸性的强弱上来看,H₂SiO₃比H₂CO₃更加弱,因此一定的温压条件下有机酸更易与

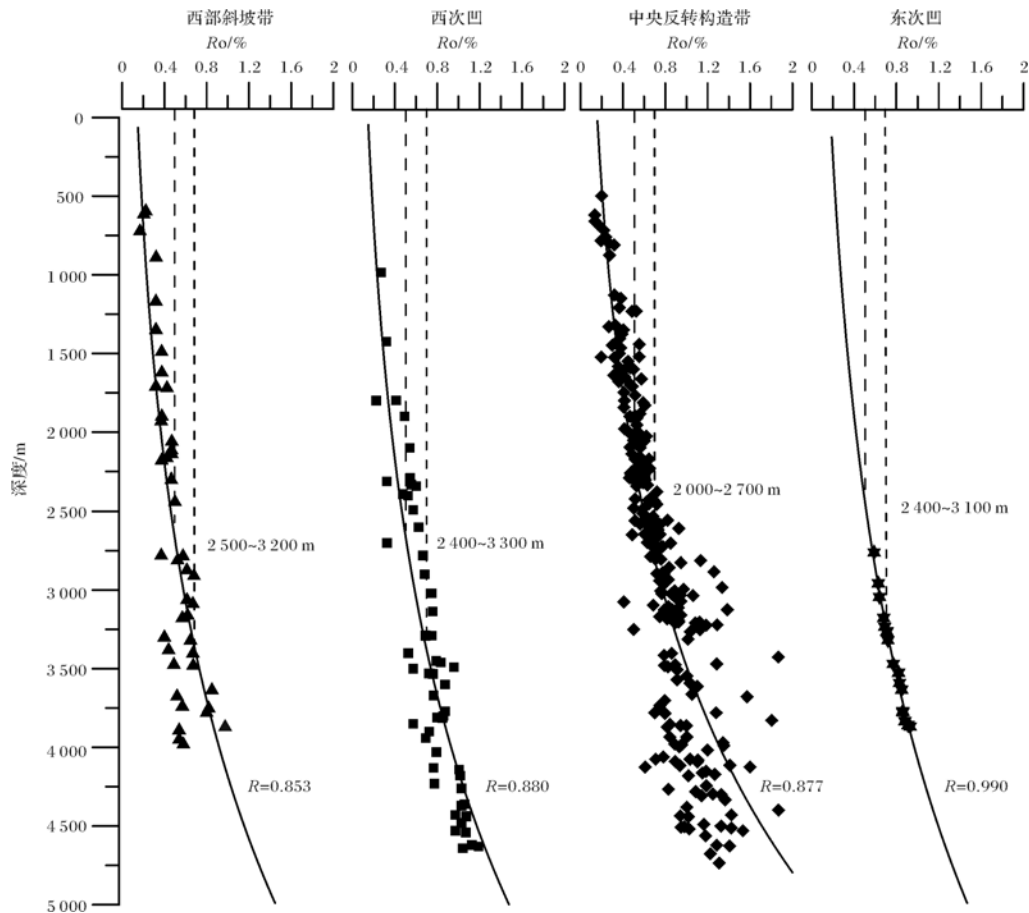


图6 西湖凹陷各个区带镜质体反射率与深度的关系

Fig.6 The diagram of Ro and depth in various tectonic belt, Xihu depression

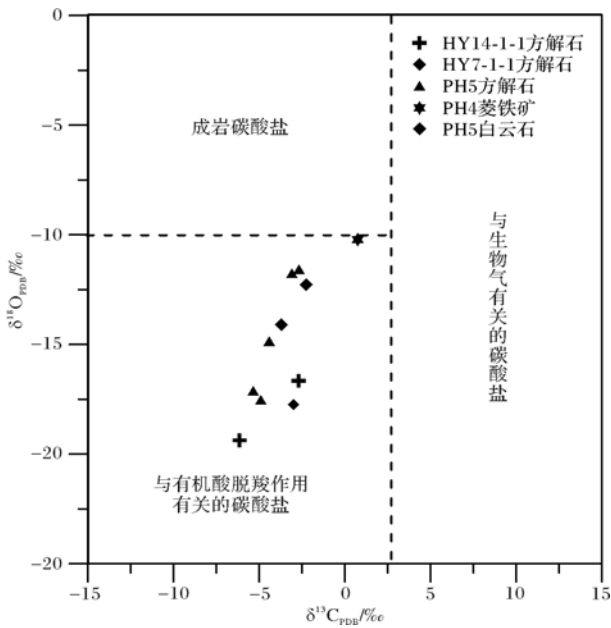


图7 西湖凹陷储层砂岩碳酸盐胶结物 δ¹³C 与 δ¹⁸O 组成分布图^[14]

Fig.7 Distribution of δ¹³C and δ¹⁸O of carbonate cements in sandstone reservoir of Xihu depression

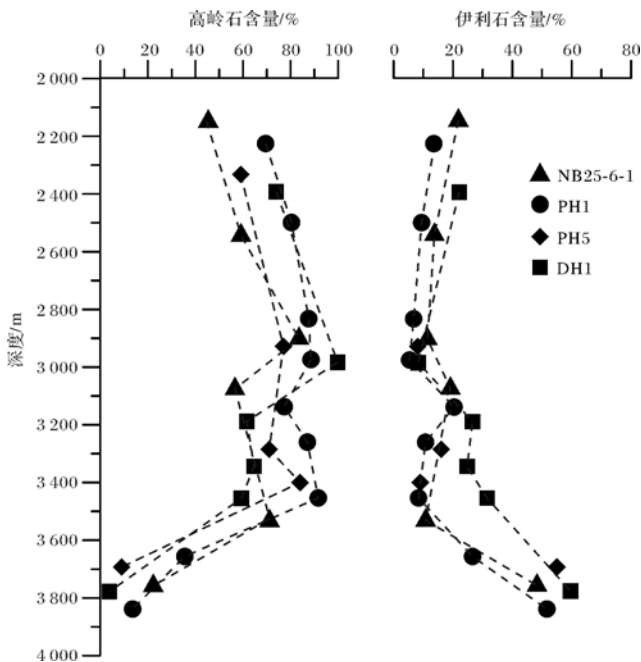


图8 西湖凹陷部分井高岭石、伊利石含量与深度的关系图
Fig.8 The diagram of kaolinite, illite content and depth in parts of wells, Xihu depression

长石反应生成硅酸。

4.1.2 硫酸盐的热氧化还原反应产生的 H₂S 溶蚀

一般硫酸盐的热氧化还原反应发生的温度区间为 80℃~100℃ 和 150℃~200℃, 对应的 R₀ 为 1.0%

~4.0%, 地层深度一般为 2 000~6 000 m^[13]。西湖凹陷 DQ1、CX1 和 PH5 均发现黄铁矿, 可能指示了发生了硫酸盐的热氧化还原反应; 反应产生了 H₂S, 对长石和碳酸盐等组分进行溶蚀。通过镜下薄片鉴定与统计, 发现黄铁矿多分布在地层 2 900~3 100 m 的深度, 在第一段次生孔隙带内。但由于 TSR 反应的所需条件较苛刻, 不能大量发生此反应, 因而 H₂S 溶蚀造成的次生孔隙量有限。

4.2 第二段次生孔隙度带的成因

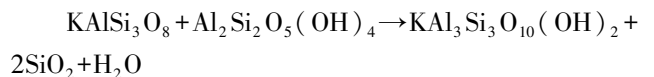
随着成岩作用的继续进行, 其成岩流体环境会发生变化, 一方面由于长石、岩屑和碳酸盐组分的溶解, 导致酸性流体的消耗, 另一方面碱性地层水不断的中和消耗酸性流体; 这些都导致地层流体从酸性逐渐变为弱碱性再到碱性。本文认为第二段次生孔隙带主要由残余的早期酸性溶蚀孔和碱性环境下长石的高岭石化导致, 少部分则由碱性流体溶蚀石英颗粒形成, 同时异常高压保护深层次生孔隙, 而且形成了一定量的裂缝。

4.2.1 残余的早期酸性溶蚀孔

由酸性流体溶解长石和碳酸盐胶结物等矿物造成的溶蚀孔, 形成的第一段次生孔隙, 在压实和胶结等破坏性成岩作用下保留下的残余孔隙。例如长石颗粒的粒内溶孔, 因未完全溶蚀而颗粒骨架俱在, 便可支撑压实从而保留下来。从中深层的岩样铸体薄片(图 3c)便可看出仍存在一定的长石溶蚀孔。

4.2.2 高岭石的伊利石化导致钾长石溶蚀

从图 7 中可以发现, 储层中的高岭石在 3 400~3 700 m, 其含量迅速减小, 与此同时伊利石含量逐渐增加, 呈现一种此消彼长的趋势。在碱性环境下高岭石不稳定, 同时深度段的地层温度大于 120℃, 地层已经处于封闭的状态, 高岭石将发生伊利石化反应, 其反应的化学方程式^[15]:



此反应会导致不仅导致钾长石的溶解, 而且是一个体积减小的反应, 有助于次生孔隙的发育。

4.2.3 石英溶蚀

显微镜下薄片发现, 石英颗粒边缘及石英加大边被溶蚀, 部分受到溶蚀形成港湾状(图 3)。关于石英被溶蚀的机理, 前人提出过在近中—碱性的流体环境下, 硅酸会与有机酸根离子进行络合, 导致石英溶解^[16]。本文认为还存在一种方式能导致石英溶蚀; 即碱性环境介质中含有大量的 CO₃²⁻ 离子水解, 使地

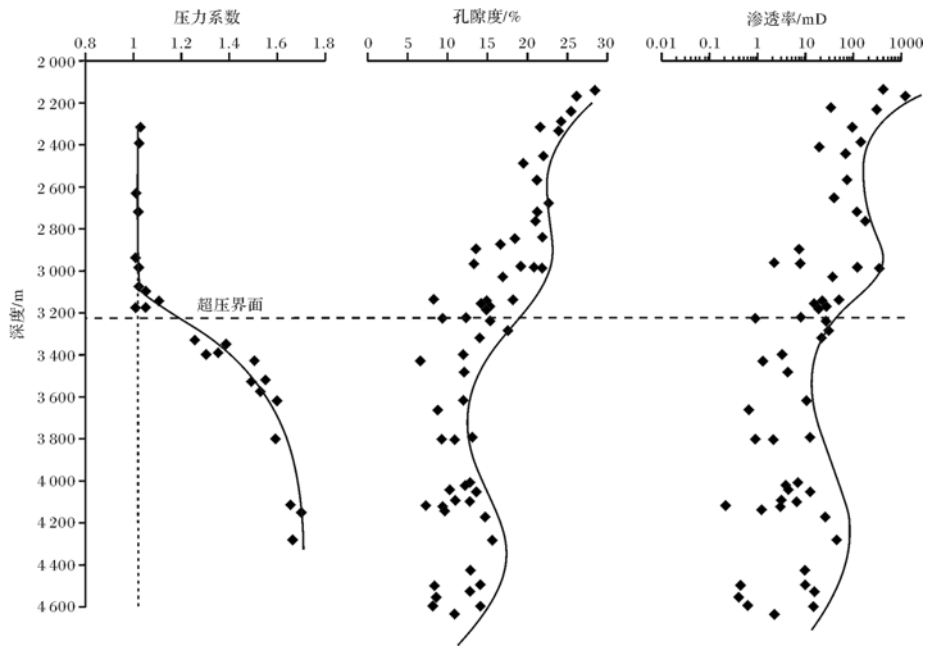
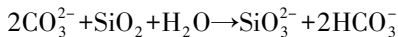


图9 西湖凹陷平湖地区超压与孔、渗演化关系图

Fig.9 The diagram of abnormal high pressure and porosity, permeability in pinghu area, Xihu depression

层流体 pH 值达到 10 以上,造成石英的溶蚀。总之,石英的溶蚀对改善储层物性起到一定作用。这种石英溶蚀机理的化学反应式如下:



4.2.4 异常高压保护孔隙度以及产生裂缝

钻井已揭示出西湖凹陷的西部斜坡带和中央反转构造带存在两个压力系统,一个静水压力系统,发育在地层的浅处到 3 300 m,压力系数维持在 1.0 左右;另一个是高压系统,发育在地层的 3 300~4 400 m 的中深地段,压力系数在 1.1~1.6 左右,最高达到了 1.8。异常高压对第二段次生孔隙带起到一定的控制作用,以西湖凹陷的平湖地区为例,从图 9 可以看出第二段次生孔隙带的深度段与异常高压发育的深度段相吻合,由于超压可以有效降低骨架颗粒所承受的压力,保护储层的物性,因而随着地层压力增加,孔隙度与渗透率减小的变化趋势被减缓,之后在强超压的作用下,导致岩石破裂产生裂缝和流体反复流动淋滤储层,因而物性逐渐被改善。

5 结论

(1) 西湖凹陷古近系砂岩储层次生孔隙发育带在纵向上主要分布在 2 500~3 100 m 和 3 400~4 400 m 的深度段。次生孔隙中粒间溶蚀孔占总孔隙度的 30%左右,粒内溶蚀孔占总孔隙度的 60%左右,

它们是储层主要孔隙类型,同时存在少量的裂缝发育。

(2) 第一段次生孔隙发育带与晚成岩 A₁ 期的深度段良好对应,第二段次生孔隙发育带与晚成岩 A₂ 期的深度段良好的对应。

(3) 第二段次生孔隙带主要由残余的早期酸性溶蚀孔和碱性环境下主要由高岭石的伊利石化导致,少部分则由碱性流体溶蚀石英颗粒形成,同时异常高压保护深层次生孔隙,而且形成了一定量的裂缝。

参考文献 (References)

- 舒艳,胡明毅,蒋海军,等. 西湖凹陷西部斜坡带储层成岩作用及孔隙演化[J]. 海洋石油,2011,31(4):63-67 [Su Yan, Hu Mingyi, Jiang Haijun, et al. Diagenesis and reservoir porosity evolution of Western Slope Zone of Xihu sag[J]. Offshore Oil, 2011, 31(4): 63-67]
- 张武,徐发,徐国盛,等. 西湖凹陷某构造花港组致密砂岩储层成岩作用与孔隙演化[J]. 成都理工大学学报:自然科学版,2012,39(2):122-129 [Zhang Wu, Xu Fa, Xu Guosheng, et al. Diagenesis and pore evolution of Huagang Formation tight sandstone reservoirs in a structure of Xihu depression in East China Sea Basin [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2012, 39(2): 122-129]
- 苏奥,陈红汉,王存武,等. 东海盆地西湖凹陷天然气来源探讨[J]. 地质科技情报,2014,33(1):157-162 [Su Ao, Chen Honghan, Wang Cunwu, et al. Source of natural gas in Xihu depression of the East China Sea Basin [J]. Geological Science and Technology Information, 2014, 33(1): 157-162]

- 4 苏奥,陈红汉,王存武,等. 东海盆地西湖凹陷油气成因及成熟度判别[J]. 石油勘探与开发,2013,40(5):521-527[Su Ao, Chen Honghan, Wang Cunwu, *et al.* Genesis and maturity identification of oil and gas in the Xihu Sag, East China Sea Basin[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(5): 521-527]
- 5 郑永飞,陈江峰. 稳定同位素地球化学[M]. 北京:科学出版社,2000:1-247[Zhen Yongfeng, Chen Jiangfeng. Stable Isotope Geochemistry[M]. Beijing: Science Press, 2000: 1-247]
- 6 王勇,钟建华,陈昊,等. 东濮凹陷古近系深层次生孔隙垂向分布特征及成因[J]. 石油勘探与开发,2006,33(5):576-580[Wang Yong, Zhong Jianhua, Chen Hao, *et al.* Vertical distribution and genesis of the secondary pore in deep formation of Paleogene at Dongpu sag[J]. Petroleum Exploration and Development. 2006, 33(5): 576-580]
- 7 Hudson J D. Stable isotopes limestone lithification [J]. Journal of Geological Society, 1977, 133(4): 637-660
- 8 Irwin H, Coleman M L, Curtis C. Isotope evidence for the source of diagenetic carbonate during burial of organic rich sediments [J]. Nature, 1977, 269 (5625): 209-213
- 9 张哨楠. 川西致密砂岩的石英次生加大及其对储层的影响[J]. 地质论评,1998,44(6):649-655[Zhang Shaonao. Quartz overgrowths and their influence on the reservoir quality of tight sandstone in the western Sichuan Basin [J]. Geological Review 2012, 44(6): 649-655]
- 10 钟大康,朱筱敏,蔡进功. 沾化凹陷下第三系砂岩次生孔隙纵向分布规律[J]. 石油与天然气地质,2003,24(3):286-290[Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Cai Jingong. Vertical distribution of secondary pores in Paleogene sandstones in Zhanhua depression[J]. Oil & Gas Geology, 2003, 24(3): 286-290]
- 11 张莉,朱筱敏,钟大康,等. 惠民凹陷古近系碎屑岩次生孔隙纵向分布规律[J]. 地球科学,2007,32(2):253-259[Zhang Li, Zhu Xiaomin, Zhong Dakang, *et al.* Vertical distribution of secondary pores in Paleogene sandstones in Huimin depression and its genesis analysis [J]. Earth Science, 2007, 32(2): 253-259]
- 12 袁静,张善文,乔俊,等. 东营凹陷深层溶蚀孔隙的多重介质成因机理和动力机制[J]. 沉积学报,2007,25(6):840-846[Yuan Jing, Zhang Shanwen, Qiao Jun, *et al.* Cause of formation and dynamic mechanisms in multiply medium of dissolved pores in deep formation of Dongying sag [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(6): 840-846]
- 13 Machel H G. Bacterial and thermochemical sulfate reduction in diagenetic settings: oil and new insights[J]. Sedimentary Geology, 2001, 140(1): 143-175
- 14 郭宏莉,王大锐. 塔里木油气区砂岩储集层碳酸盐胶结物的同位素组成与成因分析[J]. 石油勘探与开发,1999,26(3):31-33[Guo Hongli, Wang Darui. Stable isotopic composition and origin analysis of the carbonate cements within sandstone reservoirs of Tarim oil- gas bearing area [J]. Petroleum Exploration and Development, 1999, 26(3): 31-33]
- 15 钟大康,朱筱敏,周新源,等. 初论塔里木盆地砂岩储层中SiO₂的溶蚀类型及其机理[J]. 地质科学,2007,42(4):403-414[Zhong Dakang, Zhu Xiaomin, Zhou Xinyuan, *et al.* An approach to categories and mechanism of SiO₂ dissolution in sandstone reservoirs in the Tarim Basin[J]. Chinese Journal of geology, 2007, 42(4): 403-414]
- 16 侯树杰,袁亚娟,万志峰,等. 济阳拗陷车西洼陷异常高压与储层孔隙度的关系[J]. 海洋地质动态,2010,26(5):1-7[Hou Shujie, Yuan Yajuan, Wan Zhifeng, *et al.* Relationship between abnormal high pressure and reservoir porosity in Chexi sag of Jiyang depression [J]. Marine Geology Letters, 2010, 26(5): 1-7]

Distribution and Genesis of the Secondary Pore of Paleogene Reservoir in Xihu Depression, Eastern Sea Basin

SU Ao¹ CHEN Hong-han² CAO Lai-sheng¹ LI Cheng-hai³ LEI Ming-zhu⁴ ZHAO Yu-tao²

(1. Evaluation Institute of Oil and Gas Development, Geophysical Research Institute, BGP, CNPC, Zhuozhou, Hebei 072750;

2. China University of Geosciences (Wuhan) Resources Institute "Structure and Oil and Gas Resources" Key Laboratory of the Ministry of Education, Wuhan 430074;

3. Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Petro China Huabei Oilfield Company, Renqiu, Hebei 062550;

4. Research Institute of Zhanjiang Branch, CNOOC, Zhanjiang, Guangdong 524057)

Abstract: This paper mainly discusses the distribution and genesis of secondary pores in Paleogene sandstones in Xihu depression by using a number of the thin section, casting thin section, carbon and oxygen isotopes of carbonate cements, fluid inclusions, clay mineral X-ray diffraction, Laser Scanning Confocal Microscope and porosity and permeability data, combined with regional tectonic sedimentary background. The study results indicate that a large number of secondary pores occurred at two depth ranges of 2 500~3 100 m and 3 500~4 400 m; Organic acids dissolving feldspars minerals mainly leads to the first section of the secondary porosity zone, H₂S produced by sulphate thermal oxidation reduction reaction leads to part of the secondary porosity; quartz dissolution and abnormal high pressure leads to the second section of the secondary porosity zone in the alkaline fluid environment. The study concluded that the genesis of secondary pore zone contributes to predict reservoir stratum of high quality.

Key words: Xihu depression; Paleogene reservoir; secondary pore; distribution; genesis