

黄骅坳陷砂岩储层的成岩作用与孔隙分带性

郑浚茂

(中国地质大学, 北京 100083)

吴仁龙

(地质矿产部石油地质研究所, 北京 100083)

黄骅坳陷第三系砂岩储层的成岩作用随埋深的增加具有明显的规律性, 属正常埋藏成岩系列。不同埋深孔隙类型及发育程度有明显差异, 可划分为3个孔隙演化带: 浅部带(小于2 200 m)以原生孔隙为主; 过渡带(2 200~3 000 m)次生孔隙占30%~50%和深部带(大于3 000 m)以次生孔隙为主。2 200~2 500 m是早成岩阶段A、B期的分界, 3 000 m是早成岩与晚成岩阶段的分界。埋深控制成岩作用, 成岩作用决定孔隙演化, 沉积环境对储层的影响在一定埋深后居于次要地位。

关键词 黄骅坳陷 砂岩储层 成岩作用 孔隙 分带性 埋深

第一作者简介 郑浚茂 男 61岁 教授 石油地质学

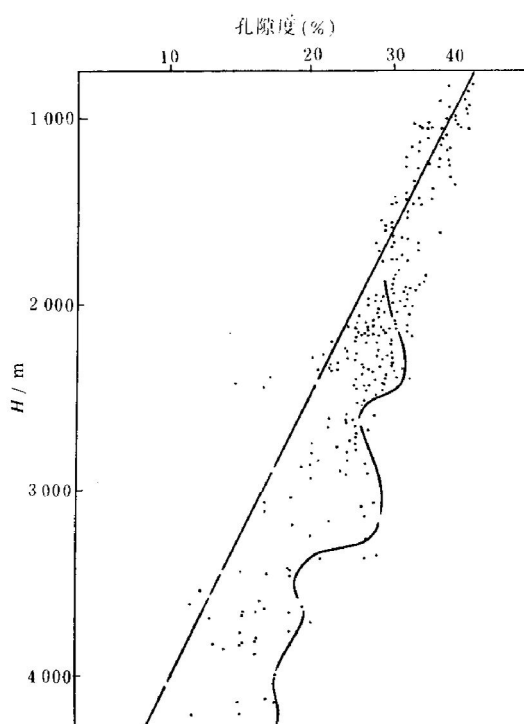


图1 黄骅坳陷孔隙演化图

黄骅坳陷是以沉降为主的新生界沉积盆地, 第三系油气产层具有多层系, 多种砂体类型的特征。根据对各类砂体沉积、成岩及储集性的研究, 砂体储集性的优劣主要取决于埋深。该坳陷第三纪时, 长期持续沉降, 成岩过程连续而未有大的间断, 这种正常埋藏成岩作用使得砂体的孔隙演化具有明显的分带性, 而沉积环境对储集性的影响则退居次要地位。

1 砂岩储层的正常埋藏成岩作用

虽然黄骅坳陷上、下第三系之间存在一区域不整合, 但表生作用微弱, 各种成岩作用仍保持连续进程。

1.1 机械压实作用

它是影响储集性的主要成岩作用, 在2 500 m以内对砂岩孔隙的影响十分明显, 其原生孔隙随着深度的增加有规律的减少(图1)。在浅埋条件下(500~1 000 m), 孔隙度为40%, 与现代沉积原始孔隙度接近, 压实作用轻微; 当埋深为1 000~2 500 m时, 砂岩孔隙度急剧降低, 孔隙度衰减梯度为每百米1.33%; 当埋深为2 500~3 000 m时, 孔隙度衰减梯度为每百米1%, 压实作用影

响减弱;3 000 m 以下,处于异常高压带,压实作用影响进一步减弱,孔隙衰减梯度每百米仅为 0.5%。

1.2 碳酸盐胶结作用

黄骅坳陷各类砂体中,不同程度地均含有准同生泥晶方解石或早期连晶方解石,其中重力流砂体中碳酸盐含量较高,可达 10%,其它砂体一般 2%~10%,其含量随深度变化不大。2 200~2 500 m 深度主要为泥晶方解石充填,在此深度以下常见早期连晶方解石充填。

从碳酸盐含量与物性关系图(图 2)上可见,随着碳酸盐含量的增高,储集性变差。碳酸盐对储集性的另一影响,根据岩芯观察,连晶方解石通常位于砂体上、下两端,形成封隔,从而在埋藏过程中,使其中部砂岩受压实程度较弱,原生孔隙保留较好。此外,由于早期碳酸盐胶结,保持较高的负孔隙,并抑制硅质增生等,在深埋条件下,水介质发生酸化,此时碳酸盐溶解而形成深部次生孔隙带。

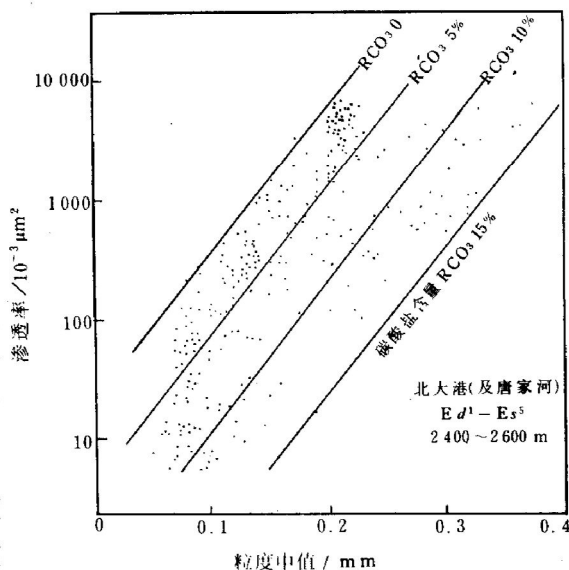


图 2 碳酸盐含量对储集性的影响

1.3 粘土矿物的分布与演化

黄骅坳陷砂岩储层所含的粘土矿物中,主要为高岭石及伊利石/蒙脱石混层矿物(I/S),它们的分布不但很有规律性,而且与其深度有着十分密切的关系,因此,可以作为深度带划分的主要依据。

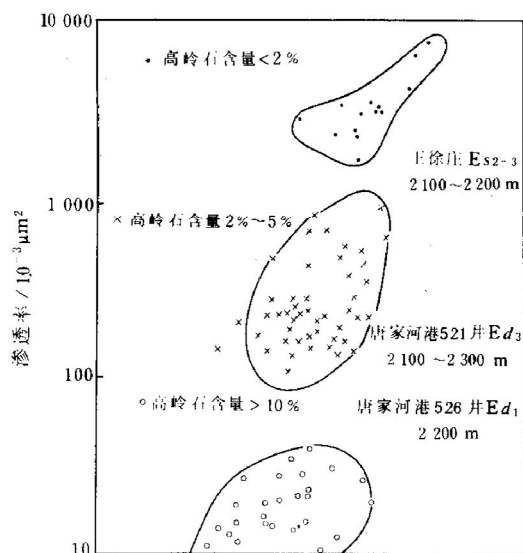


图 3 高岭石含量对储集性的影响

(1)高岭石在埋深小于 2 500 m 的砂岩中,是常见的孔隙充填物,含量为 2%~10%。随着埋深的增加,自生高岭石含量降低,在 3 000 m 以下消失。

在小于 2 500 m 深度范围内,砂岩中高岭石对储集性影响较大。由图 3 可见,当含量小于 2%时,对储集性无影响,储集性良好;当含量 2%~5%时,有一定影响,孔隙度中等;当含量达 10%以上时,孔、渗均差。

(2)X 衍射分析表明,第三系中 I/S 混层的演化具有明显的规律性,当埋深小于 2 500 m 时,I/S 混层矿物中以游离状蒙脱石为主,其相对含量 50%~60%,有序度 $R=0$,属无序混层;当埋深为 3 000 m 时,游离状蒙脱石基本消失,此时 I/S 中伊利石含量为 60%,其有序度 $R=$

1,属有序化型(部分有序型);在埋深达到 3 600 m 时,I/S 中伊利石比例为 75%~80%,当埋深达到 4 200 m 时,I/S 中伊利石比例高达 85%以上,有序度 $R=3$,属有序型(卡尔克博格

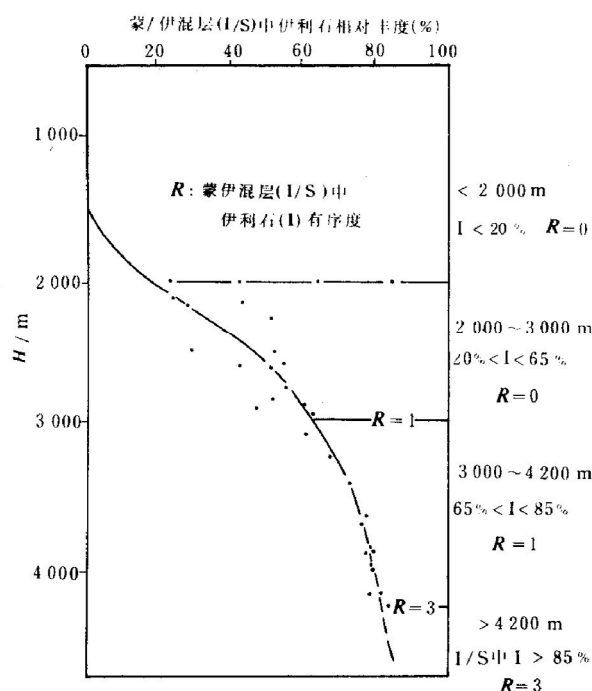


图4 伊/蒙混层矿物的演化

型),图4反映了随着深度的增加,I/S混层中由于伊利石化作用增强,其有序度也逐渐提高。

1.4 石英增生及长石钠长石化作用

石英增生是影响储层孔隙度的重要因素,第三系砂岩中石英增生明显受深度控制。当埋深小于2200m时,镜下未见有石英增生,当埋深2500~2600m时,镜下可见石英窄边状加大,自生石英呈共轴生长于碎屑石英表面,含量约1%~2%;随着埋深的进一步增加,石英增生丰度增高,深部储层(大于3000m)达5%~10%。

石英增生除受埋深控制外,还受岩石组分的影响。在相似埋深背景下,高成熟度砂岩比低成熟度砂岩石英增生强度高得多,如王徐庄地区,堡坝砂岩为长石石英砂岩,埋深2700~2800m增生石英含量达5%~

10%,而低成熟砂岩在此深度,石英增生含量仅2%左右。低成熟砂岩若达到5%~10%的石英增生量,其埋深则应达到3900~4000m。

在第三系砂岩中,随着埋深的增加,碎屑长石有钠长石化作用发生。通过镜下观察,结合电子探针对长石组分的分析发现,钠长石化的深度范围在2600~4000m,由此推测其形成温度为100~150℃,随着埋深增加,钠长石化作用程度增加。

1.5 溶解作用

不稳定组分(包括碎屑组分及胶结物组分)的溶解,在黄骅坳陷第三系砂岩中十分常见,它控制了次生孔隙的形成及分布,已明显地受埋深及地温的控制,故按埋深可以分为3种不同溶解作用。

1.5.1 浅部淋滤溶解

当埋深小于2000~2200m时,碎屑组分基本未受溶解,以原生粒间孔隙为主。当埋深达到2500~2600m时,由于淋滤作用,使粒间组分发生较大迁移,有时粒间除少量增生石英外(1%~2%),基本无其他形式的孔隙充填物,成为“无胶结”颗粒支撑的砂岩,储集性极好,面孔隙度达25%~30%。在此深度,富含长石的低成熟度砂岩,由于淋滤作用使长石组分局部溶解,形成扩大的粒间孔隙,有时甚至形成长石印模孔隙,扫描电镜下可见长石淋滤溶解之残骸,但仍具长石外形。次生孔隙占总孔隙的20%~30%(图1),此时岩石仍以原生孔隙为主。

1.5.2 中深部广泛溶解

当埋深达到2500~3000m时,与凹陷生油门限基本吻合。此外,根据歧口凹陷不同钻井实测压力资料绘制的地层压力变化图,反映了地层压力及地温随深度的变化规律。由该图可知,当埋深达3000m时,压力系数为1.3,处于较高压力条件下,由于该深度段为有机质转化为油气的层段。有机质成熟过程中大量CO₂的释放与高压带持久接触,增加了孔隙水中的H⁺浓度溶解作用强烈,从而使区域范围内次生孔隙广泛发育,约占孔隙的50%。

1.5.3 深部溶解

当深度大于 3 000 m 时,压力系数为 1.3~1.6,处于异常高压带,由于强压实及胶结作用,原生孔隙大部分消失,次生孔隙占主导地位,可有粒内溶孔、粒间溶孔等,其中方解石胶结物及长石颗粒溶解极为普遍。此时,长石溶解常与钠长石化伴生,钠长石化的广泛发育及其发育强度可以作为次生孔隙发育带的识别依据。据统计,3 900~4 000 m 埋深范围内次生孔隙约占总孔隙的 80%。当埋深达到 4 200~4 400 m 时,原生孔隙几乎消失殆尽,次生孔隙占总孔隙的 95%~100%。

综上所述,可见次生孔隙的发育程度明显受埋深控制。当埋深小于 2 000 m 时,溶解作用不发育,以原生粒间孔隙为主;埋深为 2 500 m 左右,为浅部开启性地层水溶解阶段,次生孔隙开始发育,但仍以原生孔隙为主,占总孔隙的 70%~80%;埋深为 3 000 m 左右,为广泛溶解作用阶段,次生孔隙率为 50%;埋深大于 3 000 m,特别是大于 3 600 m,为深部溶解作用阶段,次生孔隙约占总孔隙的 80%;埋深为 4 200~4 400 m 时,由压实及白云石充填的原生孔隙基本消失,次生孔隙占 95%~100%,其总孔隙度及有效孔隙度已很小。

1.6 成岩序列

从以上成岩作用研究可以看出,埋深是砂岩成岩演化的最主要影响因素,它实际上也综合反映了地温、压力及水介质循环作用对砂岩孔隙演化的影响,其中深度 2 200~2 500 m 及 3 000 m,有着十分重要的意义。前者大体上反映早成岩阶段 A 期与 B 期的分界,后者为早成岩与晚成岩阶段的分界。早成岩阶段 A 期,地温小于 50℃,镜煤反射率 $R_o < 0.4\%$,I/S 混层中伊利石小于 20%,有序度 $R=0$,自生高岭石大量出现,机械压实作用强烈,孔隙度衰减梯度每百米达 1.2%~1.5%,以原生孔隙为主。早成岩阶段 B 期,地温 50~100℃,镜煤反射率 R_o 为 0.4%~0.6%,I/S 混层中伊利石占 20%~65%,有序度 $R=0\sim 1$ 。有机质成熟,硅质增生发育,高岭石减少,次生孔隙大量发育。3 000 m 以下,其地温超过 100℃,镜煤反射率 $R_o > 0.6\%$,处于正常与异常压力带,地层水开启与封闭的分界,从而在成岩方面 I/S 混层的有序度增加, $R=3$,高岭石消失,石英大量增生,白云石出现,次生孔隙为主的晚成岩阶段。综合以上分析,可以得出黄骅坳陷第三系成岩系列图(图 5)及成岩演化综合图(图 6)。成岩作用的变化规律,直接反映出储层孔隙演化及孔隙带的分带性。

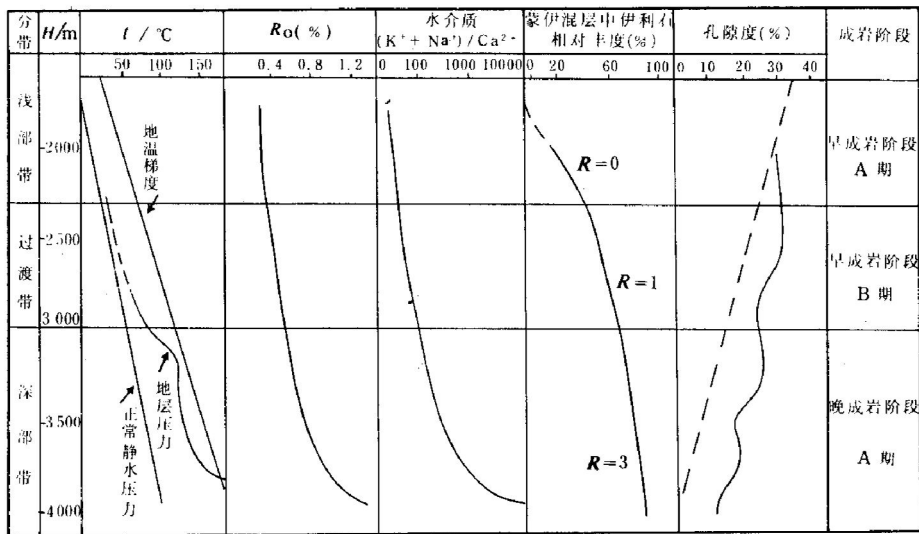


图 5 黄骅坳陷第三系砂岩成岩序列图

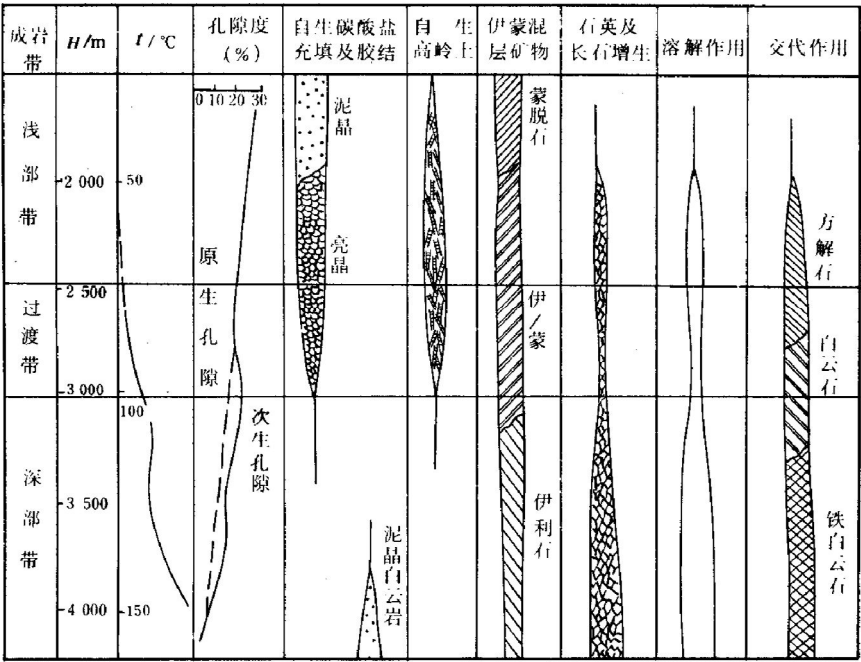


图 6 黄骅拗陷第三系砂岩成岩演化综合图

2 砂岩储层孔隙带的划分^[1]

根据埋藏深度对成岩作用及储集性的宏观控制,将第三系砂岩的孔隙演化划分成以下几个深度带(表 1)。

表 1 黄骅拗陷第三系孔隙深度带划分表

特 征	浅部带	过 渡 带		深 部 带	
		M ₁	M ₂	D ₁	D ₂
深度/m	<2 200	2 200~2 500	2 500~3 000	3 000~3 600	3 600~4 400
成岩作用	机械压实	机械压实、淋滤	硅质增生、溶解	溶解、硅质增生	溶解、硅质增生
地层水性质	开启性	开启性	开启性	非开启性	非开启性
次生孔隙(%)	<10	20~30	30~50	50~100	50~100
充填矿物	高岭石	自生泥晶碳酸盐以及高岭石	硅质增生	硅质增生、连晶方解石	硅质增生、铁白云石
钠长石化	无	开始发育	开始发育	强烈	强烈
孔隙度(%)	10~30	20~30	10~20	<10~20	<4~15
渗透率/10 ⁻³ μm ²	10~1 000	100~1 000	10~1 000	10~100	<1~100

2.1 浅部带(小于 2 200 m)

以原生孔隙为主,机械压实与高岭石含量是影响孔隙度的主要因素,上第三系砂体均属该带。

2.2 过渡带(2 200~3 000 m)

机械压实仍是原生孔隙度降低的重要因素,但影响强度降低,该带中以粒间淋滤,早期自

生矿物的充填为特征,次生孔隙开始发育,并可划分为2个亚带:

M_1 : 2 200~2 500 m,以淋滤作用为主,“无胶结”砂岩或部分孔隙为自生碳酸盐充填,自生高岭石孔隙充填物受溶解含量降低。

M_2 : 2 500~3 000 m,以硅质增生胶结作用为特征,溶解作用广泛形成次生孔隙发育带。

2.3 深部带(大于3 000 m)

以原生孔隙基本消失,次生孔隙的大量发育为特征,硅质增生碳酸盐胶结交代及铁白云石充填,大大降低储层孔隙度,亦可划分为2个亚带:

D_1 : 3 000~3 600 m,位于异常高压之上台阶,压力系数为1.3,硅质增生,钠长石化,方解石连晶胶结使储集性变差,但长石含量高的砂岩(体),仍有较好的储集性。

D_2 : 3 600~4 400 m,位于异常高压之下台阶,压力系数1.3~1.6,硅质胶结及白云石充填使大量次生孔隙进一步消失。

上述深度带的划分,在宏观上能基本体现黄骅坳陷第三系储层孔隙的赋存及演化特点。

3 沉积环境对储层孔隙演化的影响

除了上述埋藏过程中所引起的一系列成岩作用的影响外,沉积环境对砂岩储集性也有一定的影响,对于浅埋储层,其影响有时还十分明显。

不同沉积环境的沉积条件和沉积方式不同,从而造成砂体的组分与结构的差异。碎屑颗粒粗、分选好、单层厚、隔层少的砂体,其物性优于细而薄的砂体,如河道砂体、堡坝砂体及三角洲砂体均具较好的储集性,而浊积砂体及各种近源扇砂体,因砂质杂基多或分选差而储集性较差。在浅层,成岩作用较弱时,沉积作用影响具体表现在粒度与孔渗呈明显的线性关系(图7),随着粒度变细,储集性变差。

沉积环境对储层的影响,最主要的还是反映在不同相带储集性有较大差别,这是由于不同相带岩石组分结构变化较大,从而对其储集性的影响更为明显^[2]。对于相同埋深的各种环境的砂体,其主体亚相储集性都大大地优于其它亚相(表2)。

对于相同环境不同埋深的砂体,其成岩作用则起决定性作用,如北大港同生断层两侧的沙河街组一段下部重力流砂体,北翼埋深2 500~2 700 m,以原生孔隙为主,成岩作用以早期泥晶胶结为特征,而下降盘歧北凹陷中重力流砂体,埋深达3 900~4 000 m,以次生孔隙为主,其成岩作用十分复杂,出现硅质增生、粘土矿物转化、晚期白云石充填等等。又例如,王徐庄第三系沙河街组二至三段堡坝砂体,由于同生断裂作用,两侧落差600 m,埋深2 200 m一侧,原生粒间孔十分发育,孔隙几乎“无胶结”,而在埋深2 800 m一侧,由于石英增生(含量5%~10%),而使原生孔隙骤然降低,从而造成断层两侧砂体物性较大的差别(表3),同样孔南地区

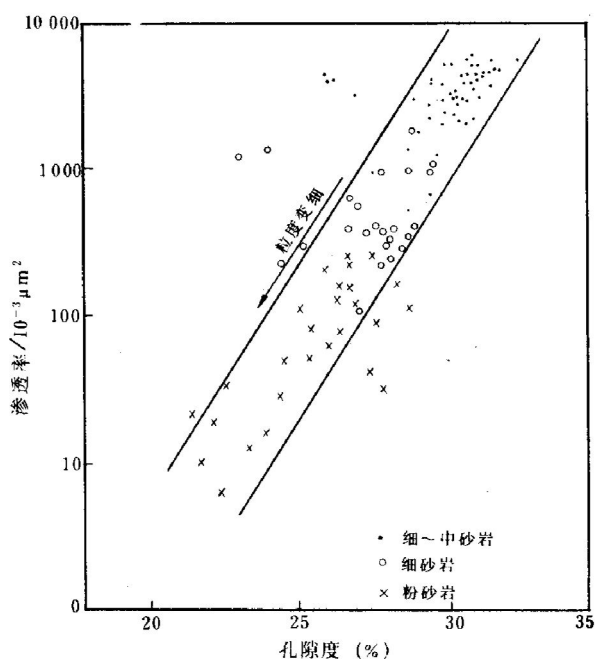


图7 港521井砂岩粒度与孔隙度、渗透率关系图

表 2 各种沉积砂体不同亚相的储集性

地 区	砂体类型 (埋深/m)	亚 相	层位	孔隙度(%)	渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$
马西	高密度 流砂体 (3 900)	水道中心	E_{S1}^F	14.8	7.9
		水道前缘	E_{S1}^F	12.6	4.4
		水道侧缘	E_{S1}^F	9.6	2.9
段六拔	冲积扇 (2 900~3 500)	扇根河道	E_{K1}	14.4	9.66
		扇中河道	E_{K1}	14.5	2.36
		河道间及扇端席状砂	E_{K1}	9.5	0.4
枣园	水下扇 (2 800)	扇中水道	E_{K2}	23	147.3
		水道间	E_{K2}	18.5	9.6
		扇端席状砂	E_{K2}	18	7.3
唐家河	三角洲 (2 200~2 500)	河口坝主体	Ed_3	30	3 000
		河口斜坡	Ed_3	25	500
		斜坡末稍	Ed_3	18	150
北大港	曲流河 (900~1 400)	曲流砂坝	Nm_1	34.2	1 255.4
		天然堤	Nm_1	26	193.6
		泛滥平原	Nm_1	8	14.0

孔店组冲积扇砂体,由于发育在盆地不同构造位置,其埋深变化较大,储集性却随着埋深增加而变差(表 4)。

表 3 南大港断层两侧堡坝砂体储集性的变化

构造位置	断层上升盘		断层下降盘
亚相	坝主体	坝斜坡-外缘	坝主体
孔隙度(%)	28.4	20.5	16
渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	2 454	259 (最高 2 058)	58.8

表 4 不同埋深的冲积扇砂体储集性的变化

地区	埋深/m	孔隙度(%)		渗透率/ $10^{-3}\mu\text{m}^2$	
		最大	平均	最大	平均
风化店	2 000	45.8	28.9	9 450	2 531
王官屯	2 300~2 500	28.8	20	1 876	163.3
小集	3 000~3 600	21.8	14	1 045	43.4

由此可见,影响黄骅拗陷砂体储集的诸多因素中,最直接的控制因素是埋藏深度及温度,其次是沉积环境,而区域构造背景、构造作用则是在更高的层次上控制着各类砂体的成岩演化及孔隙分布。

4 几点认识

(1)黄骅拗陷第三系砂岩储层,其孔隙演化有明显的分带性,按深度可分为浅部带(小于 2 200 m)以原生孔隙为主;过渡带(2 200~3 000 m)次生孔隙占总孔隙的 30%~50%和深部带(大于 3 000 m)以次生孔隙为主。

(2)砂岩储层所经历的成岩变化属于正常埋藏成岩序列,深度决定了机械压实作用及一系列成岩作用规律性变化,从而导致孔隙演化的分带性,对黄骅拗陷第三系砂岩来说,其中

2 200~2 500 m 及 3 000 m,这两个深度具有重要意义,前者是早成岩阶段 A、B 期的分界,后者是早成岩与晚成岩阶段的分界,各种成岩现象及孔隙演化在此分界面上下都有明显的变化。

(3)在浅部,沉积环境对储层的影响较明显,在深部,相同沉积环境的不同亚相的孔隙度有较大差别;但在相同环境不同深度的条件下,深度仍起主要作用,沉积环境的影响不明显。而储层的埋藏深度取决于沉积的区域构造背景及其后来的构造变动。

参 考 文 献

- 1 郑浚茂,庞明. 碎屑储集岩的成岩作用研究. 武汉:中国地质大学出版社,1989. 110~120
- 2 Schorer M. Parameters influencing porosity in sandstones;a model for sandstone porosity prediction. AAPG Bull,1987, 71:485~491

DIAGENESIS AND PORE ZONATION OF SANDSTONE RESERVOIRS IN HUANGHUA DEPRESSION

Zheng Junmao

(Chian University of Geosciences, Beijing)

Wu Renlong

(Institute of Petroleum Geology, MGMR, Beijing)

Abstract

The diagenesis of Tertiary sandstone reservoirs in Huanghua Depression varied obviously with the increase of buried depth and it should belong to normal buried diagenesis. The characteristics and evolution degrees of the reservoir porosity differ differently with the buried depth of the reservoirs, and based on this, the reservoir porosity could be classified into three zones: 1. shallow zone with the buried depth less than 2 200 m and primary porosity playing the main part; 2. transitional zone with buried depth between 2 200~3 000 m and secondary porosity occupying 30%~50%; 3. deep zone with buried depth greater than 3 000 m