

冀中饶阳凹陷下第三系沙河街组第三段 砂岩次生孔隙形成机制

张以明 侯方浩 方少仙

朱连儒 陶洪兴

(西南石油学院, 四川南充 637001)

(华北石油管理局, 河北任丘 062552)

沙河街组第三段砂岩在纵向上存在三个次生孔隙发育带, 储集空间均以长石的次生溶孔为主。有机质脱羧产生的酸性组分、特定成岩环境中矿物相之间的平衡反应和局部有利的孔隙保存条件, 是研究区次生孔隙发育和保存的主要原因。结合区域沉积环境、构造特点、埋藏成岩史, 预测划分出三个有利地带。

关键词 饶阳凹陷 沙河街组 长石砂岩 次生孔隙 形成机制

第一作者简介 张以明 男 32岁 工程师(硕士) 石油地质与储层地质

一、砂岩储集空间的构成

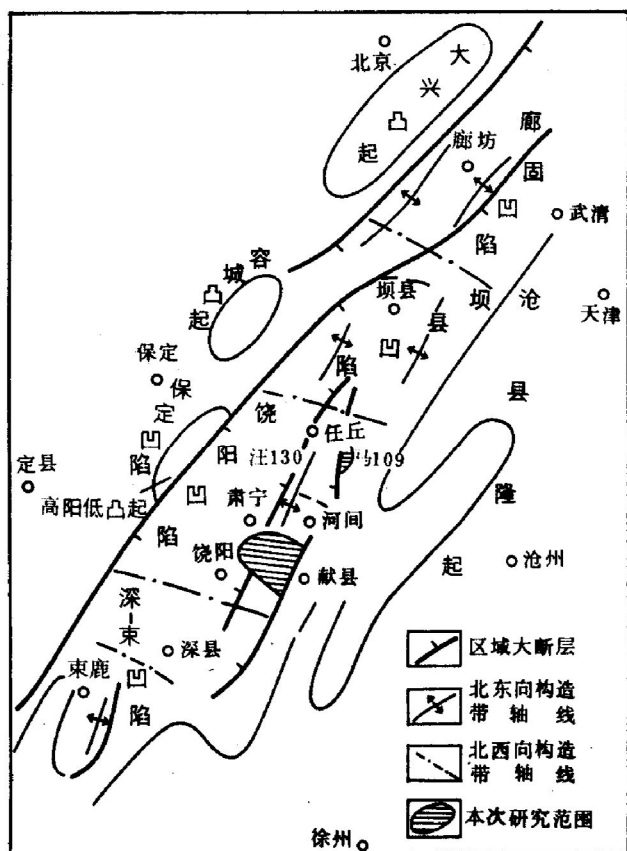


图1 饶阳凹陷区域位置略图

饶阳凹陷(图1)的沙河街组第三段(以下简称沙三段)埋深2000—5000 m, 大部分地区大于3000 m, 不同埋深的储集空间类型截然不同。2800 m以上, 以原生残余孔隙为主, 多为粒间孔和片状孔。随埋深加大, 机械和化学压实增强, 颗粒间线接触普遍出现和碳酸盐胶结物大量沉淀, 原生孔明显变小, 减少。埋深持续增加, SiO_2 等胶结作用增强, 使原生残余孔隙进一步降低, 最后趋于消失(表1)。随着原生孔隙的不断消失, 次生孔隙逐渐发育, 成为中—深部储层的主要储集空间。2800—3300 m扩大粒间孔、部分溶蚀孔、组分内溶孔、高岭石晶间孔和基质溶孔常见。溶蚀组分主要是长石、岩屑, 其次是碳酸盐和基质。3300 m以下扩大粒间孔减少, 铸模孔、特大孔出现, 高岭石晶间孔已逐渐被绿泥石晶间孔所代替。常见铁碳酸盐晶缘溶孔、长石部分溶蚀孔、粒缘孔等, 偶见石榴石、重晶石溶蚀, 反映了孔隙溶液性质在不同成岩阶段的变化。沙三段次生孔

隙的发育经历了由少增多、再减少的过程。

表1 饶阳凹陷沙三段砂岩孔隙类型、面积率与埋深的关系

井号	井深	岩性	原生孔隙			次生孔隙					实测物性	
			孔隙类型	镜下面积率(%)	孔径(μm)	孔隙类型	镜下面积率(%)	孔径(μm)	面积率(%)	φ(%)	K(10 ⁻³ μm ²)	
马205	1848.29	粗粉砂岩	粒间	21.1	100	粒间扩大孔,粒内孔,长石选择性溶孔	5.2	45	26.7	27.4	790	
马205	1910.54	粗粉—细砂岩	粒间	17.5	85	长石选择性溶孔,粒内孔,解理孔	4.1	38	21.6	22.6	45	
马109	2014.23	细砂岩	粒间	17.3	120	部分溶蚀孔,粒缘孔,碳酸盐部分溶蚀	5.5	52	22.8	24.1	237	
马109	2103.23	粉—细砂岩	粒间	12.2	105	蜂窝孔,粒缘孔,选择性溶蚀孔,部分溶蚀	3.4	80	15.0	16.5	8.4	
留401	2894.5	细—粉砂岩	片状、粒间	1.5	35	粒内孔,颗粒部分溶蚀,长石选择性溶蚀	6.8	90	8.3	—	—	
留17-6	2993.05	中—细砂岩	片状、粒间	4.7	60	特大孔,粒内孔,铸模孔,碳酸盐部分溶蚀	13.2	143	17.9	20.0	179.0	
留17-50	3085.13	细砂岩	片状、粒间	4	53	基质溶孔,粒内孔,伸长状孔,选择性溶蚀	14.1	185	18.1	—	—	
留459	3125.01	中—细砂岩	片状、粒间	2.8	58	特大孔,扩大粒间孔,基质溶孔,部分溶蚀	16.0	240	18.8	21.2	470.0	
留412	3347.20	细砂岩	片状	2.3	38	扩大粒间孔,选择性溶蚀,碳酸盐部分溶蚀	12.1	120	14.4	17.3	23.7	
留88	3455.86	粉砂岩	片状	0.6	29	粒内孔,晶间孔,收缩缝	3.0	44	3.6	7.4	1.1	
留425	3541.63	细—粉砂岩	片状	0.8	12	粒内孔,铸模孔,晶间孔,杂基部分溶蚀	4.4	67	5.2	9.5	0.37	
留101	3643.80	细砂岩	片状	1.2	10	特大孔,粒缘孔,碳酸盐部分溶蚀,收缩缝	11.3	95	12.5	15.4	32.5	
留494	3766.51	中细砂岩	片状	1.5	13	粒内孔,铸模孔,蜂窝孔,选择性溶蚀	13.3	105	14.8	14.8	35.0	
留70-114	3833.74	粉—细砂岩	片状	0.8	7	扩大粒间孔,选择性溶蚀,杂基部分溶蚀	13.0	135	13.8	—	—	
宁301	4192.41	细—粉砂岩	片状	0.5	9	铸模孔,粒内孔,选择性溶蚀	10.7	96	11.2	12.12	1.28	
宁301	4333.00	细砂岩	片状	0.1	5	扩大粒间孔,特大孔,碳酸盐部分溶蚀	15.1	153	15.2	20.8	—	
宁301	4413.02	中—细砂岩		0		特大孔,扩大粒间孔,杂基部分溶蚀	12.5	120	12.5	13.10	<1	
宁古6	4524.00	粉—细砂岩		0		杂基溶孔,铸模孔,粒缘孔,颗粒部分溶蚀	5.8	88	5.8	—	—	

二、次生孔隙及其特征

次生孔隙之所以成为沙三段砂岩的主要储集空间,是由其地质条件决定的:(1)饶阳凹陷新生代以来持续沉降,有机质演化迅速;(2)长石砂岩与生油岩互层,有机质熟化时产生的有机酸和CO₂可直接进入砂层;(3)埋深大于2800 m时,泥岩中的Ⅱ型干酪根都已成熟;(4)泥岩的成岩作用可提供大量的流体;(5)断层、裂缝发育,成为流体的良好通道。

(一) 孔隙类型

沙三段砂岩中次生孔隙普遍常见长石解理溶缝孔、蜂窝状孔、河曲状粒内孔(图版I-2, 5, 6, 7, 8),高岭石晶间孔(图版I-1),碳酸盐晶间、晶缘孔,重晶石胶结物内溶孔、石榴石部分溶蚀孔,伸长孔、特大孔(图版I-4, 5)等22种孔、缝类别(图2)。归纳为三种成因类型和九种基本结构单元(表2)。

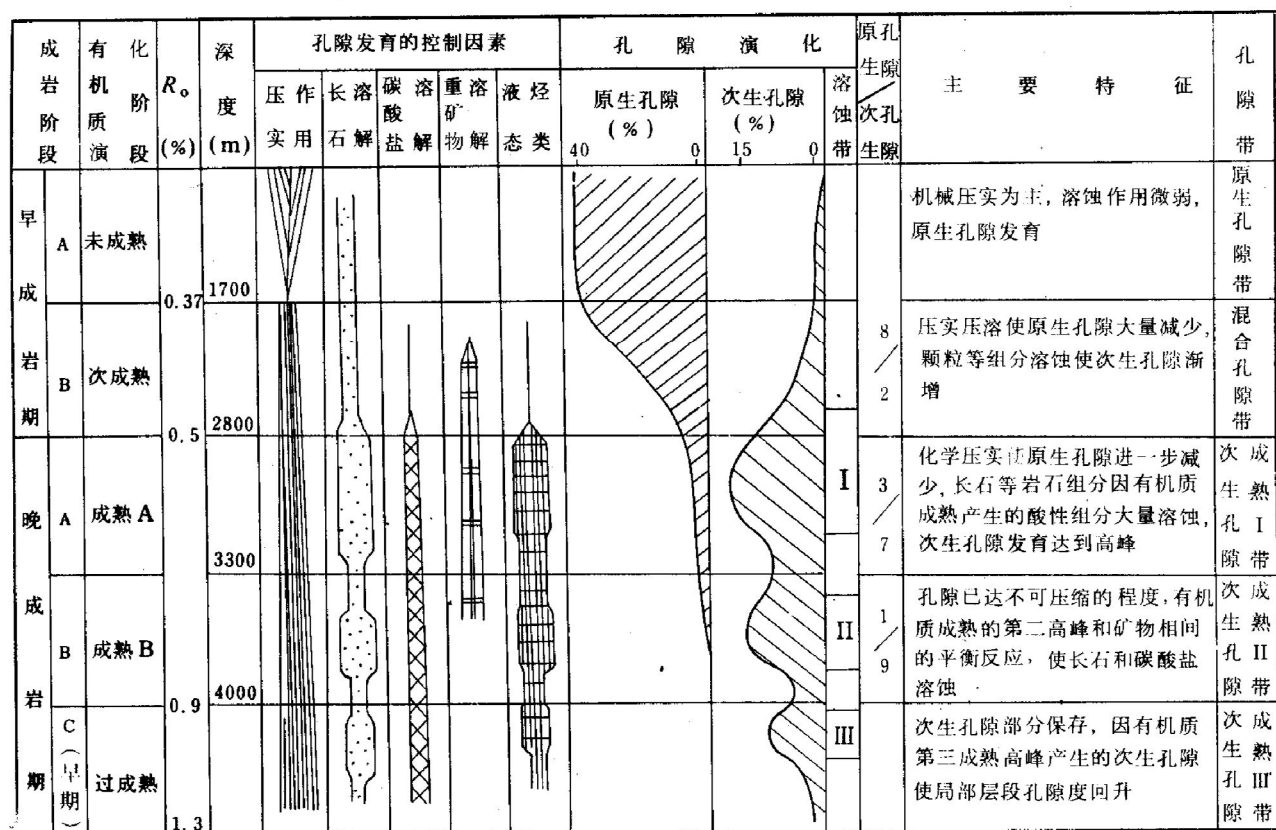


图 2 饶阳凹陷沙三段砂岩孔隙结构演化

表 2 沙三段砂岩中次生孔隙的成因类型及其特征

成因类型	基本结构单元	特 征
溶蚀型	次生粒间孔隙	骨架颗粒之间的溶蚀孔隙, 包括粒(晶)缘孔、部分溶蚀孔、基质或胶结物溶孔等
	组分内孔隙	以长石内溶孔最常见, 其次是碳酸盐颗粒和岩屑内溶孔
	基质孔隙	泥质、灰(云)泥基质内溶孔或基质与颗粒间的溶孔, 以灰(云)泥基质内溶孔最常见
	铸模孔	以长石铸模孔为主, 碳酸盐颗粒铸模孔较常见
	特大孔	长石等颗粒的粒内孔, 与粒间孔连为一体, 或由粒间胶结物溶蚀而成
破裂缝	裂 缝	主要指构造缝(岩石内裂缝)和成岩缝(颗粒内压张缝和破裂缝)
复合型	晶间孔、贴粒缝、收缩缝	为基质或胶结物收缩、收缩-溶蚀、破裂-溶蚀等成因产生的次生孔隙, 数量不多

(二) 孔隙的纵向分布特征

次生孔隙是岩石组分经受各种成岩作用的综合反映, 是矿物成分、有机质熟化、成岩温度、压力、地下流体性质等诸多因素的敏感性函数。沙三段砂岩中, 由于成岩环境地化性质的旋回性和有机质螺旋式的阶段性熟化过程^{*}, 导致纵向上发育三个次生孔隙带, 其深度分别为 2800—3300 m, 3650—3800 m, 4200—4450 m。它们分别处于晚成岩 A 阶段、B 阶段和 C 阶段的早期 (图 2, 3)。

* 张以明. 河北省冀中拗陷饶阳凹陷下第三系沙河街组第三段砂岩储层的成岩作用与孔隙演化. 硕士论文, 1991

第一次溶蚀作用发生于有机质成熟 A 期,即晚成岩作用 A 阶段的早、中期,所产生的次生孔隙量较后两次都大,但局部常被后期胶结物充填,影响了储集性能。第二次溶蚀作用发生于有机质成熟 B 期,即晚成岩作用 B 阶段的中期,易于保存,是有利的储层。第三次溶蚀作用发生于有机质过成熟早期,相当于晚成岩作用 C 阶段的早期,发生的时间晚、埋深大,揭示了深部储层的勘探前景。此外,在早成岩作用 B 阶段,即有机质半成熟期也有少量次生孔隙形成,成为原生-次生孔隙混合带。

三、次生孔隙形成机制

(一) 混合孔隙带

1700—2800 m 区间,次生孔隙逐渐发育,

与原生孔隙之比约为 2:8,成为以原生孔隙为主的混合孔隙发育带(图 2)。该成岩阶段,由于沙三段砂岩储层上覆为百余米厚的特殊岩性段(灰岩、油页岩、泥灰岩与暗色泥岩间互层),导致有机质因生物降解和热降解产生的 CO_2 、 H_2S 等酸性组分挥发受阻,形成具有溶蚀能力的酸性溶液,导致部分次生孔隙产生。

同时,该深度区间处于大气水作用范围,经计算下渗深度达 3030 m^{*}。沙河街组地层水的氢氧同位素 $\delta\text{D}-59.95\text{‰}-69.88\text{‰}$ 、 $\delta^{18}\text{O} 8.3\text{‰}-9.9\text{‰}$,据其组成概算,亦说明地层水中有古大气降水混入^{**}。薄片时常可见强烈钙化的(主要发生在早成岩 B 的末期)致密砂层内,连晶方解石胶结或交代的颗粒边缘大都具有溶蚀状港湾,表明在方解石大量沉淀以前,曾发生过强烈的溶蚀作用和交代作用。就目前资料看,本区大气淡水的影响主要发生在早成岩期 B 阶段,既对混合带中次生孔隙的形成有重要意义,对晚成岩 A 阶段的次生孔隙也有一定影响。

该带次生孔隙数量不大,多为扩大的原生粒间孔和粒内孔。由于这时岩石固结程度尚差,所形成的次生孔隙易遭后期破坏。

(二) 第一溶蚀次生孔隙带

沙三段砂岩在 2800—3300 m 之间的岩石组分较广泛的地溶蚀,主要是长石,其次有岩屑、基质和碳酸盐组分。其成因主要与有机质热演化过程中释放的大量 CO_2 和有机酸有关。

本区沙三段砂岩中长石溶蚀远比碳酸盐溶蚀发育,尤其以第一溶蚀带为最,约占次生孔隙总量的三分之二。

Meshri 认为有机酸氢离子供体容量比碳酸盐氢离子大 6—350 倍。在 25℃、0.1MPa 条件下,若溶液中 H_2CO_3 为主要的 H^+ 供体,方解石和微斜长石与酸性组分的反应如下:

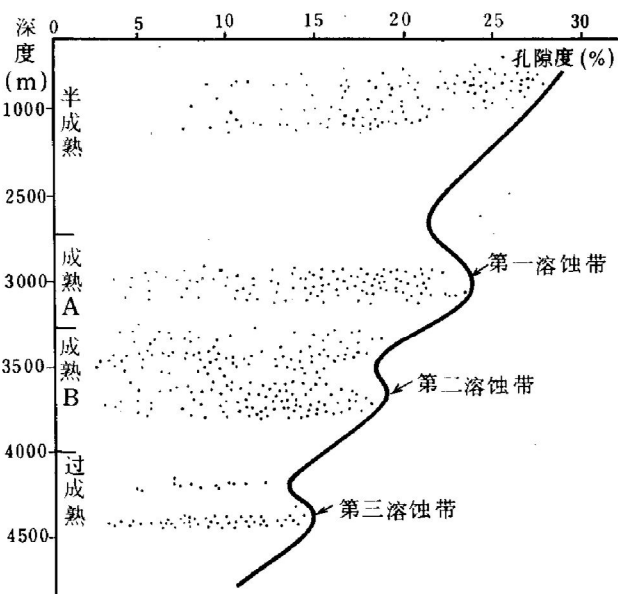


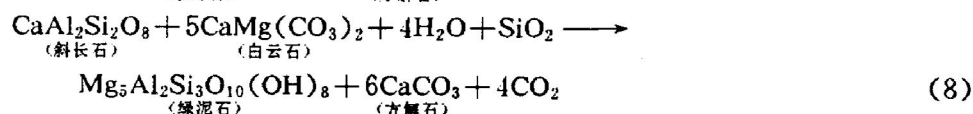
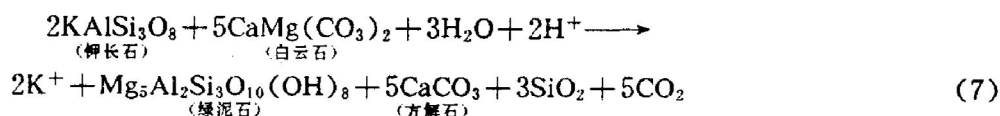
图 3 饶阳凹陷沙三段砂岩孔隙度-埋深关系图

* 张以明,河北省冀中拗陷饶阳凹陷下第三系沙河街组第三段砂岩储层的成岩作用与孔隙演化,硕士论文,1991

** 赵宝忠,华北油田研究院内刊,1984,13



岩石骨架颗粒溶蚀,导致丰富的次生孔隙产生:



假设 1m^3 的砂岩中长石 10% (其中钾长石和斜长石各占 50%)、石英 60%、白云石 20%, 若 1/2 的白云石参加上述反应, 生成的 CO_2 引起砂岩中斜长石、钾长石和碳酸盐的部分溶蚀, 三者消耗 CO_2 的比例为 1/2、1/4、1/4, 由反应式 (7) 生成 CO_2 68034 g, 可溶解斜长石 107494 g、钾长石 107494 g、方解石 39119 g, 相应产生的孔隙度各为 3.9%、4.2%、1.5%, 即共同形成新的孔隙 9.6%, 反应式 (8) 能生成 54427 g CO_2 , 溶解斜长石 85995 g、钾长石 85995 g、方解石 31296 g, 分别产生 3.1%、3.4%、1.2% 的孔隙, 即增加总孔隙度 7.7%。实际上, 上述反应共存于同一成岩体系中。因此, 次生孔隙的形成可能比上面的计算值还要大。第二溶蚀带内, 针叶状、玫瑰花朵状及绒球状自生绿泥石发育 (图版 I-8), 含量占岩石体积的 4.5%, 相对含量达 54%, 作为孔衬层或分布于次生孔隙中。说明上述矿物相平衡的无机反应导致此期次生孔隙的形成。

(四) 第三溶蚀次生孔隙带

韩家村构造沙三段埋深大于 4000 m, 局部层段孔隙度高达 20.8%。次生孔隙的特征是: (1) 特大孔存在, 且比较常见 (图版 I-4); (2) 与特大孔相邻的铁碳酸盐受溶蚀成斑点状; (3) 斜长石加大边具溶蚀迹象 (图版 I-3)。深层次生孔隙的发育是多种因素综合作用的结果。

1. 绿泥石包壳的存在有利于延长孔隙寿命

这种颗粒包壳对孔隙有极好的保存作用, 主要表现在 (1) 绿泥石包壳的抗压强度高, 能有效地分散上覆压应力, 降低压实压溶的强度; (2) 包壳封闭颗粒, 减少了石英、长石等颗粒次生加大的成核基质, 有利于孔隙的保存; (3) 绿泥石包壳在其形成环境中具有较高的稳定性, 隔绝或减少了孔隙水与岩石组分的接触, 使地层水中胶结物的来源减少, 抑制了后继的胶结作用。这样, 绿泥石包壳因其屏蔽作用使早期形成的次生孔隙可以保存到较大深度。

2. 矿物相平衡反应产生部分次生孔隙

饶阳凹陷有机质成熟的第三高峰在 4000 m 左右*。此时, 液态烃已开始向凝析气转化, 该过程释放部分 CO_2 。由于第二溶蚀带的长石、石英、白云石等反应物在该带仍普遍存在, 另一方面, 有机质成熟晚期脱氢生成大量 H^+ , 无机反应 (7)、(8) 仍然可以进行。因此, 前面谈到的矿物相之间的平衡反应所产生的各种溶孔可以继续产生, 构成了过成熟期次生孔隙的一部分。长石加大边的溶蚀 (图版 I-3) 就是很好的佐证。

温度大于 120°C 时, 羧酸开始发生热脱羧作用 ($\text{HCOOH} \longrightarrow \text{CH}_4 + \text{CO}_2$)。根据硫酸盐还原反应的热动力学和 Tissot 模型, 硫酸盐的热还原反应大约 135°C 开始发生。这些反应的产物为 CO_2 、 OH^- 、 H_2S 。霍洛多夫指出, 在主要成油期之后, 从有机质中离析出来的主要成分是 CO_2 、 H_2S ^[5]。这些活性组分会使长石和碳酸盐等不稳定组分溶蚀, 也是深部储层中次生孔隙形成的重要因素。

* 梁狄刚, 冀中拗陷的油气生成, 华北油田研究院内刊, 1983

四、次生孔隙有利分布区预测

通过薄片、扫描电镜,结合多种测试和测井资料分析,得出研究区沙三段砂岩的次生孔隙分布(图4)。在此基础上,综合考虑研究区的沉积环境、构造特点、埋藏成岩史,对凹陷内沙三段储层次生孔隙发育的有利区块进行预测,为下一步勘探战场的选择提供依据。

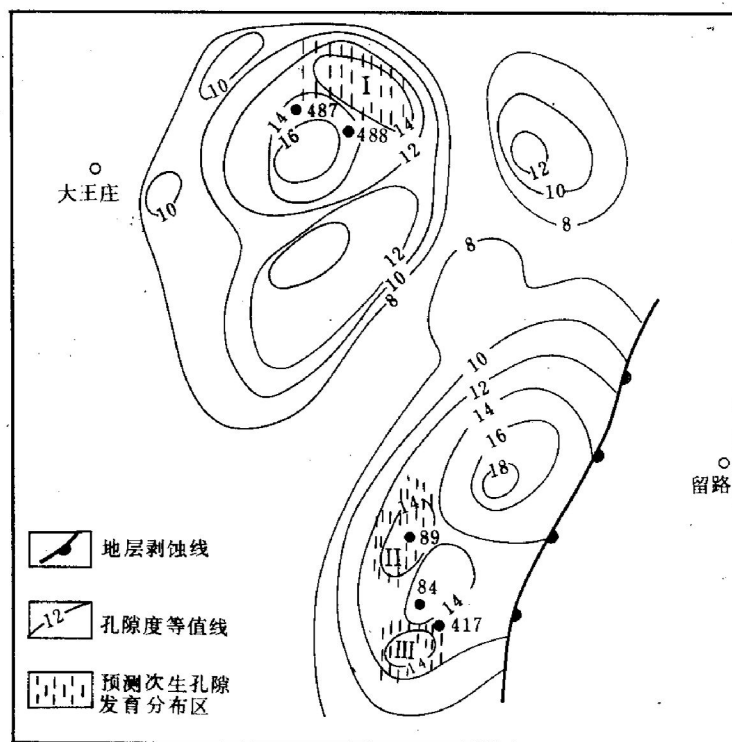


图4 饶阳凹陷沙三段砂岩次生孔隙的分布与预测

的交替部位,成岩过程中地下水活跃。沙三段埋深适中,可望找到仅次于留459断块的次生孔隙发育的中、低渗储层。

研究过程中,华北油田研究院电镜室、华北油田勘探三公司地质大队给予了大力支持,并得到西南石油学院陈景山教授的热情帮助,谨致谢意。

参考文献

- 1 方少仙等. 油气储层研究的某些进展. 见: 中国石油天然气总公司科技发展局编. 储层评价研究进展. 北京: 石油工业出版社, 1990. 54—64
- 2 朱国华. 成岩作用与砂层(岩)孔隙的演化. 石油与天然气地质, 1982, 3 (3): 195—203
- 3 张晓鹏等. 有机二氧化碳在碳酸盐溶孔形成中的作用及其定量讨论. 海相油气区石油地质, 1988, 2 (1, 2)
- 4 朱稼祥等. 苏北高邮凹陷一段砂岩矿物和孔隙成岩机理的探讨. 沉积学报, 1989, 7 (3)
- 5 西北大学地质系编译. 碎屑岩的成岩作用. 西安: 西北大学出版社, 1986

1. 大王庄构造北翼(I区) 该区为大王庄构造北端的围斜部位,处于大王庄鼻状构造与肃宁生油洼槽之间的过渡地带,沉积环境为三角洲前缘。成岩过程中,深洼内大量有机质成熟生成丰富的有机酸、烃类,首先途经该区,然后向大王庄构造的高部位运移。因此,该区具有近水楼台的有利条件,极易形成各种次生孔隙。预测该区存在以扩大粒间孔、粒缘孔为主要类型的次生孔隙发育区。

2. 留88附近南北向条带状地带(II区) 该区是留西洼槽与留西断阶带的过渡部位,与大王庄构造北翼具有相似的成岩及次生孔隙形成条件。另外,沙三时该区为三角洲与坝、滩的交替地带,成岩过程中是献县凸起、留西断阶带向留西洼槽的泄水区,地下水比较活跃,应是次生孔隙发育的有利地区。

3. 留84-留417井连线以南地区(III区) 沙三时该区为河流与三角洲

SECONDARY PORE FORMATION MECHANISM OF THIRD MEMBER OF SHAHEJIE FORMATION, RAOYANG DEPRESSION

Zhang Yiming Hou Fanghao Fang Shaoxian

(Southwest Petroleum Institute, Nanchang, Sichuan)

Zhu Lianru Tao Hongxing

(North China Petroleum Administration, Renqiu, Hebei)

Abstract

Three developmental zones of secondary pores could be recognized vertically in the 3rd member feldspathic sandstone of the Shahejie Formation. The pore spaces are primarily feldspathic dissolution pores. The acidic composition resulted from organic matter decarboxylation, balance-reactions between mineral phases in special diagenetic environment and favourable conservation conditions in local places are the main cause for the development and preservation of the secondary pores in study area. three favourable zones have been divided in prediction according to their depositional environment, structural feature and burial diagenetic history.

图版 I 说明

1. 沥青充填粒间孔和高岭石晶间孔。C 方解石, K 高岭石, B 充填的沥青。留 88 井, 井深 3444.00 m, Es₃, 铸体片, ×120, 单偏光。
2. 长石内河曲状溶孔。F 长石、P 孔隙。留 496 井, 井深 3705.84 m Es₃, 薄片, ×120, 正交光。
3. 长石砂岩中次生孔隙发育, 长石边缘都有溶蚀现象。F 长石, Fr 长石自生加大边, P 孔隙。宁 301 井, 井深 4417.25 m, Es₃, 薄片, ×60, 正交光。
4. 长石砂岩中特大孔发育 (p)。宁 301 井, 井深 4410.82 m, Es₃, 薄片, ×60, 正交光。
5. 长石溶蚀强烈。留 425 井, 井深 3542.00 m, Es₃, SEM, ×170。
6. 长石溶蚀强烈仅剩残晶, 附近有书页状自生高岭石生成。留 101 井, 井深 3756.50 m, Es₃, SEM, ×800。
7. 长石被溶蚀成蜂窝状。留 101 井, 井深 3761.50 m, Es₃, SEM, ×350。
8. 绿泥石包壳发育, 右中为斜长石沿解理溶蚀。留 101 井, 井深 3759.40 m, Es₃, SEM, ×300。