

苏北溱潼凹陷戴南组一段次生孔隙 形成与分布特征

刘 伟

(地矿部华东石油地质局勘探开发规划研究院,扬州)

[内容提要] 次生孔隙是戴南组一段(E₂d¹)砂岩储层的主要孔隙类型,其分布与油气聚集关系密切。本文在沉积、成岩作用研究基础上,探讨了次生孔隙成因机理,指出有机酸的溶解作用是形成戴南组一段次生孔隙的主要原因,并根据有机质成熟生烃和粘土矿物的转变导致的泥岩压实异常特征,进行次生孔隙的横向分布预测,取得了凹陷不同构造带次生孔隙分布与油气聚集规律的新认识。

关键词 次生孔隙 成因 分布 苏北溱潼凹陷戴南组一段

溱潼凹陷位于苏北陆相新生界沉积盆地东台坳陷中部,是一个呈北东向展布的南深北浅、南陡北缓的箕状凹陷,面积约1200km²。戴南组一段是凹陷内主要产油目的层。

1 沉积、成岩特征

1.1 沉积特征

戴南组一段岩石为岩屑长石砂岩、长石砂岩和岩屑杂砂岩组合,下亚段为灰白色块状砂砾岩夹薄层灰黑色泥岩,自东向西砂体减薄变细,相变为灰黑色泥岩夹灰质粉砂岩及泥灰岩条带;上亚段为灰黑色泥岩。通过岩矿特征、古生物标志、粒度分布特征、沉积构造、地化特征(微量元素和生物标志化合物)、电测井曲线特征和地震反射结构特征综合分析,确定下亚段属于半深湖—滨浅湖的沉积环境。受瞬时山洪和断裂滑塌作用影响,在湖盆中形成近岸水下扇、滨湖冲积扇等岩相类型;上亚段属于半深湖相沉积。

1.2 成岩阶段和成岩相

应用岩石铸体薄片、全岩X光衍射分析、阴极发光、电子探针(能谱)和有机质热成熟度指标(镜质体反射率R^o、最高热解温度T_{max}、孢粉颜色及色变指数TAI)等手段研究岩石结构构造特点及其孔隙类型,自生矿物组合分布演化及形成顺序,泥岩中粘土矿物组合及其混层矿物的转化。戴南组一段从沉积埋藏以来经历了机械压实、胶结交代和溶解等复杂的成岩作用过程,处于早成岩阶段B期和晚成岩阶段A期,即有机质演化的半成熟—成熟带。

1.2.1 早成岩阶段B期

埋深1600m~2320m,古地温56℃~85.30℃,主要成岩标志R^o为0.4%~0.6%,孢粉颜

① 本文1996年8月26日收稿,1997年1月3日收修改稿。

色黄—棕黄色, $TAI < 3.18$, $T_{max} = 437^{\circ}\text{C}$, 相当于有机质演化的半成熟期。岩石处于半固结—固结状态, 胶结类型以孔隙式为主, 接触关系为点—游离状, 孔隙类型以原生孔隙为主(占60.65%), 该阶段以机械压实为主, 随埋深增加, 孔隙度降低迅速。泥质粘土矿物中蒙脱石开始明显向伊/蒙混层转化, 混层比70%~50%, 属无序混层(渐变带), 有序度为 R_0 。砂岩中粘土矿物由伊利石、高岭石、绿泥石和伊/蒙混层组成, 以片状高岭石和细小鳞片状伊利石为主, 绿泥石较少, 呈纤维状。石英具I级次生加大, 可见到方解石、白云石、黄铁矿呈不规则斑块状交代碎屑和方解石交代白云石现象, 溶蚀作用弱。

1.2.2 晚成岩阶段A期

埋深2320m~3848m, 古地温 $85.3^{\circ}\text{C} \sim 128.88^{\circ}\text{C}$, 主要成岩标志 R° 为0.6%~1.2%, 孢粉颜色为棕黄—棕色, $TAI > 3.22$, $T_{max} \geq 443^{\circ}\text{C}$, 相当于有机质演化的成熟期。砂岩中粘土矿物以晶形完整的六方片状高岭石集合体和纤维状、片状伊利石为主; 绿泥石次之, 呈纤维状、不规则针状或花朵状集合体; 偶见片状黑云母。泥岩粘土矿物中蒙脱石明显向伊/蒙层转化, 混层比50%~30%, 根据混层比可以2700m为界细分为 A_1 和 A_2 两个亚期。 A_1 亚期混层比50%~35%, $R^{\circ} = 0.6\% \sim 0.8\%$, 处于低成熟阶段, 属部分有序混层(第一迅速转化带), 有序度为 R_0/R_1 ; 胶结、交代作用较强烈, 以方解石胶结为主, 随着埋深增加, 晶形由泥晶向粉—细晶变化, 常交代铁白云石、白云石和碎屑; 孔隙类型以原生孔隙为主(占62.56%)。 A_2 亚期混层比为35%~30%, 处于有序混层(第二迅速转化带), 有序度为 R_1 , $R^{\circ} = 0.8\% \sim 1.2\%$, 已进入有机质成熟大量生烃阶段, 油气生成过程中的脱羧和粘土矿物脱水形成的酸性流体对酸溶矿物的溶蚀作用, 使该段以次生孔隙占主导(56.19%); 胶结、交代作用较弱, 以方解石和菱铁矿胶结、交代铁白云石、白云石和碎屑为主, 偶见黄铁矿交代碎屑现象。随着岩石骨架的溶解, 岩石抗压能力减弱, 在3048m以下出现晚期压实作用。

成岩相是成岩作用及成岩阶段在平面上分布特征的总和, 基于各井所处的主要成岩作用类型研究, 结合构造、沉积埋深演化史的综合分析, 划分出压实、胶结、交代及溶蚀三种成岩相类型。

2 次生孔隙类型及成因机理

2.1 次生孔隙类型

次生孔隙类研究甚多, Schmid V. and McDonald D. A. 及朱国华等均得出了不同的分类原则及识别标志^{[1][2]}, 根据这些原则, 本区可归纳为五类九种(图1)。

2.2 次生孔隙成因机理

次生孔隙形成的首要条件是必须具备足够数量的原生孔隙及一定的酸溶性物质(碳酸盐胶结物和易溶碎屑), 这两个条件与沉积、成岩关系密切, 溱潼凹陷戴南组一段砂体发育, 陆源杂基少, 储层原生孔隙度高, 机械压实作用十分强烈, 对粒间孔隙体积的损失较小, 保留了较高的可保留原生孔隙度, 胶结物以碳酸盐为主, 长石及不稳定岩屑含量较高, 具备了形成次生孔隙的必要条件(表1)。其次是次生孔隙的形成必须有酸性成岩流体对酸溶物质的溶解, 戴南组一段成岩流体有两种类型, 一种是碳酸, 另一种是有机酸。

2.2.1 碳酸的溶解作用

孔隙中碳酸的形成有无机和有机两种成因。有机成因认为 CO_2 来源于沉积物中有机质成熟脱羧作用和生物化学作用, 其形成次生孔隙的过程可用I. D. Meshri(1986)图式表示

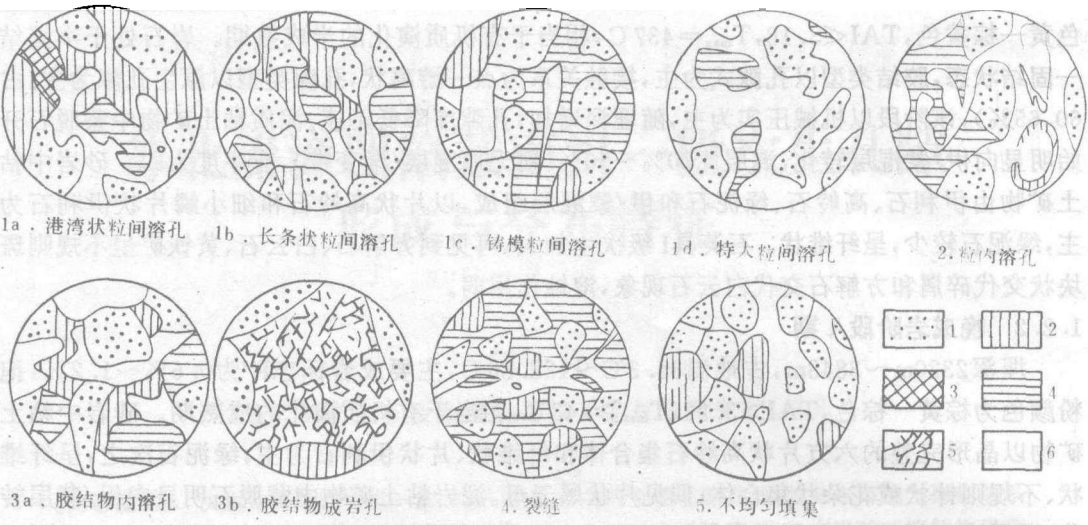


图1 苏北溱潼凹陷戴南组一段次生孔隙类型

1. 石英;2. 长石;3. 岩屑;4. 碳酸盐胶结物;5. 碳酸盐矿物重结晶;6. 孔隙

Fig. 1 Types of the secondary porosity in the first member of the Dainan Formation in the Qintong depression in northern Jiangsu

1=quartz;2=feldspar;3=lithic fragments;4=carbonate cement; 5=recrystallization of carbonate minerals;6=porosity

表1 苏北溱潼凹陷戴南组一段次生孔隙形成条件

Table 1 Formation conditions of the secondary porosity in the first member of the Dainan Formation of the Qintong depression in northern Jiangsu

原生孔隙度 (%)	压实作用所损失的孔隙度 (%)	可保留原生孔隙度 (%)	酸 溶 性 物 质		
			胶 结 物		长石及易溶岩屑 (%)
			方解石 (%)	白云石 (%)	
37.11	12.94	13.71	13.06	10.93	26.4

注:1. 原生孔隙度=20.91+22.9/特拉斯克分选系数(据Beard和Weyl,1973);

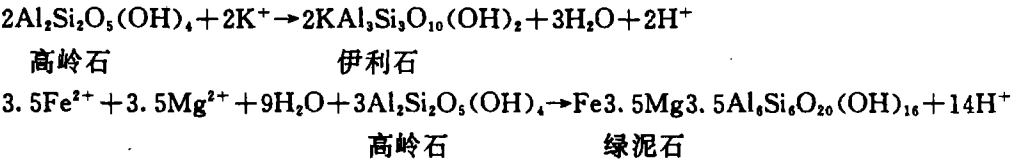
2. 可保留原生孔隙度=7.5×R^(-1.18)(R^{*}为镜质体反射率值,Schmoker,1990);

3. 压实作用所损失的孔隙度=原生孔隙度-可保留原生孔隙度-胶结物含量。

(图2)^[3]。无机成因则认为碳酸是由与火山活动有关的,沿深大断裂疏导进入砂岩孔隙中的帽源CO₂气形成;溱潼凹陷断阶带东段的CO₂气藏,被认为是这种成因的,其水合作用形成的碳酸,对砂岩储层中的碳酸盐胶结物的溶解作用十分明显。

2.2.2 有机酸的溶解作用

Surdam R. C. (1982)对次生孔隙成因曾作了系统的实验研究^[4],研究结果表明:有机酸是导致碳酸盐和硅酸盐溶解的主要因素。有机酸至少有两种来源:一种是沉积物中干酪根的羰基或酚基受热裂解或氧化裂解而产生,成因机理见图3;另一种是粘土矿物转化过程中产生的加氢作用,降低了孔隙水中pH值,而导致酸性矿物溶解。



Carothers 和 Kharka(1978) 和 Surdam R. C. 等人(1989), 对碳酸盐胶结的储层次生

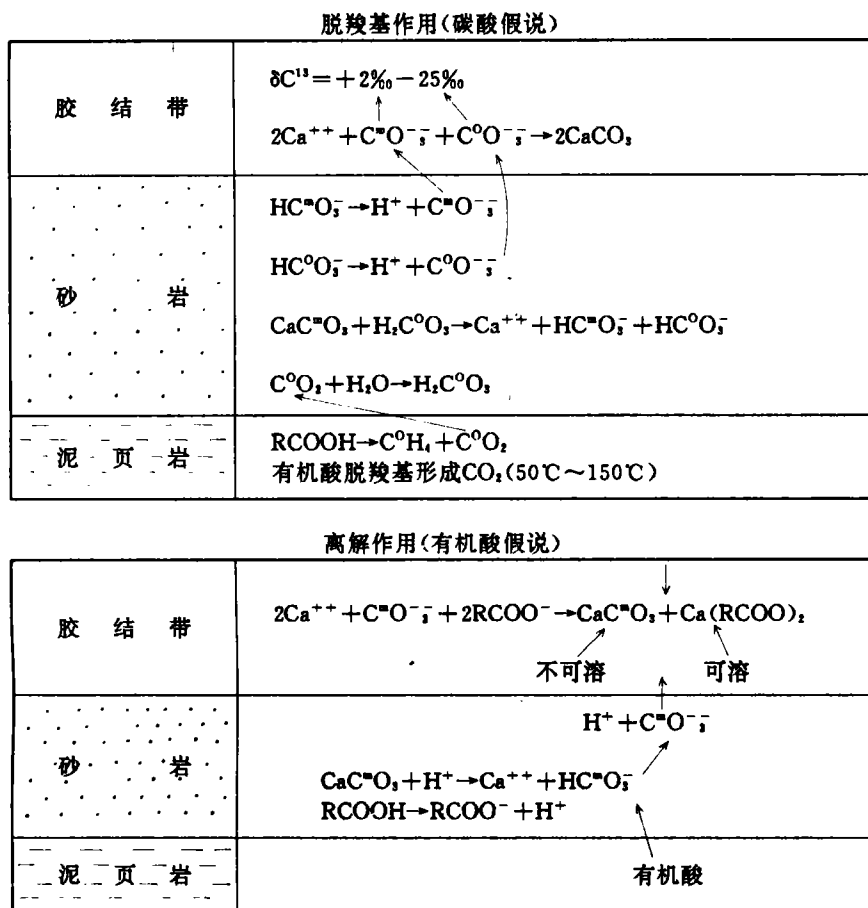


图2 次生孔隙的成因机理(据I. D. Meshri, 1986)

Fig. 2 Genetic mechanism of the secondary porosity(after I. D. Meshri, 1986)

孔隙成因研究表明,在80℃~140℃(120℃)^{[5][6]}温度范围是成岩作用最强烈带,成岩作用产生的大量短链(二元)羧酸增加了成岩流体的酸溶性,造成脱碳酸盐作用,使孔隙增生(形成次生孔隙);大于或小于这个温度只能增加 P_{CO_2} ,从而缓冲了pH值的酸度,导致碳酸盐脱结作用发生,不利于次生孔隙形成。溱潼凹陷戴南组一段盆地热史模拟表明与上述温度适应的深度是2300m~3300m,这个深度恰是当今戴南组一段次生孔隙的分布范围,与此相对应的是混层粘土矿物的两个迅速转化带(层间水脱出时期)和有机质热成熟阶段(图3),说明有机质成熟和粘土矿物的脱水而产生的酸溶性物质的溶解作用是形成戴南组一段次生孔隙的主要原因。

3 次生孔隙分布预测

3.1 次生孔隙分布

根据沉积、成岩作用和孔隙分布特征,本区戴南组一段可分成六个孔隙发育带(表2),在2700m以上以原、次生混合孔为主(次生孔隙仅占37.44%),2700m~3048m以次生孔隙为主(占56.19%),且随埋深增加,次生孔隙度增大(图3)。溶解作用常和胶结、交代作用交替进行,导致次生孔隙发育带与低孔隙带相间出现的格局,溶解作用造成大量次生孔隙,戴南

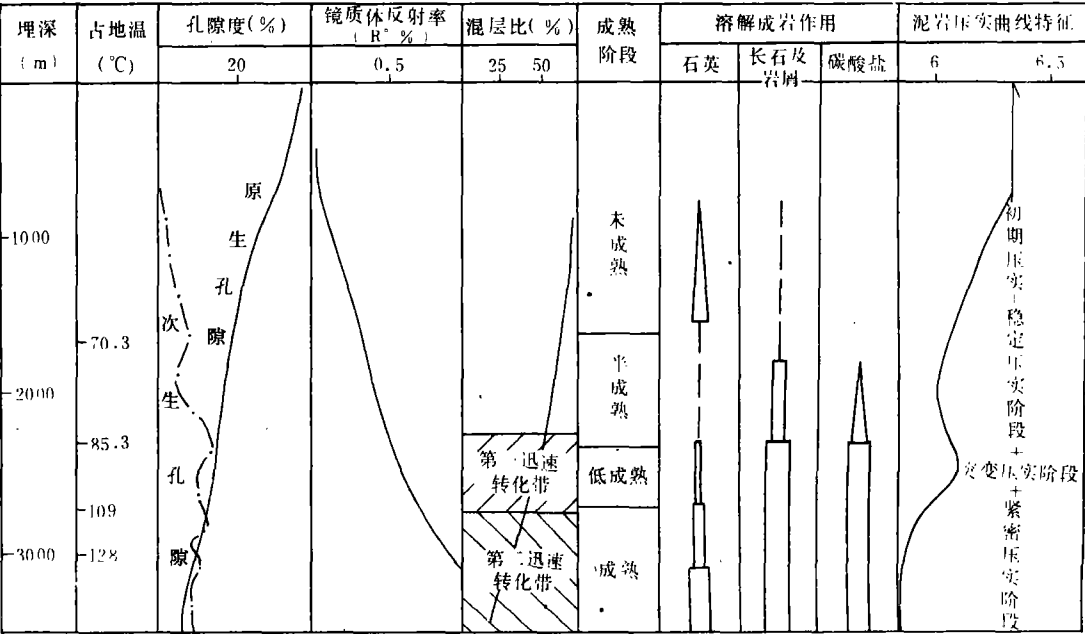


图3 苏北溱潼凹陷戴南组一段次生孔隙成因模式

Fig. 3 Genetic model of the secondary porosity in the first member of the Dainan Formation in the Qintong depression in northern Jiangsu

表2 苏北溱潼凹陷戴南组一段孔隙发育带分布

Table 2 Distribution of the secondary porosity zones in the first member of the Dainan Formation in the Qintong depression in northern Jiangsu

孔隙发育带 (代表井)		原生孔隙为主发育带			次生孔隙为主发育带		
		I (A5)	Ⅰ (A130)	Ⅱ (A203)	Ⅳ (A161)	V (A79)	Ⅵ (A109)
分布特征	分布深度(m)	<2100	2140~2343.0	2353~2700.0	2705~2813.0	2823~2907.0	2950~3021.0
	次生孔隙度(%)	7.14	12.93	9.21	12.14	10.62	12.79
	次生孔隙占实测孔隙度百分比	28.43	50.28	33.62	52.71	53.18	62.69

注:次生孔隙度=实测孔隙度-可保留原生孔隙度

组一段平均增加约9.92%。3048m 以下压实、压溶作用增强,原、次生孔隙降低。

次生孔隙的平面分布与沉积、成岩相带关系密切,不同砂体和不同沉积相带的沉积时水动力条件不同,造成岩石成份、结构、构造、胶结物含量及杂基含量的明显差异。凹陷中部草舍—储家楼段处于水下扇扇中—扇中前缘相带,沉积水动力较强,砂体发育,分选好,泥质等杂基含量较少,原生孔隙度较高,胶结物类型以酸溶性碳酸盐矿物为主,是溶蚀成岩相分布区,次生孔隙较发育;凹陷东西两端分别属于水下扇扇根和浅湖亚相,以自生粘土矿物胶结为主,次生孔隙欠发育(图4)。

3.2 次生孔隙预测

次生孔隙分布于有利的沉积、成岩相带和有机质成熟、混层粘土矿物两次层间水迅速脱出时期。而有机质成熟生烃和粘土矿物的转变又引起泥岩压实异常,所以可以利用泥岩突变压实预测次生孔隙的横向展布^[7]。图5是横切凹陷的泥岩压实曲线剖面,从断阶带—深凹带—斜坡

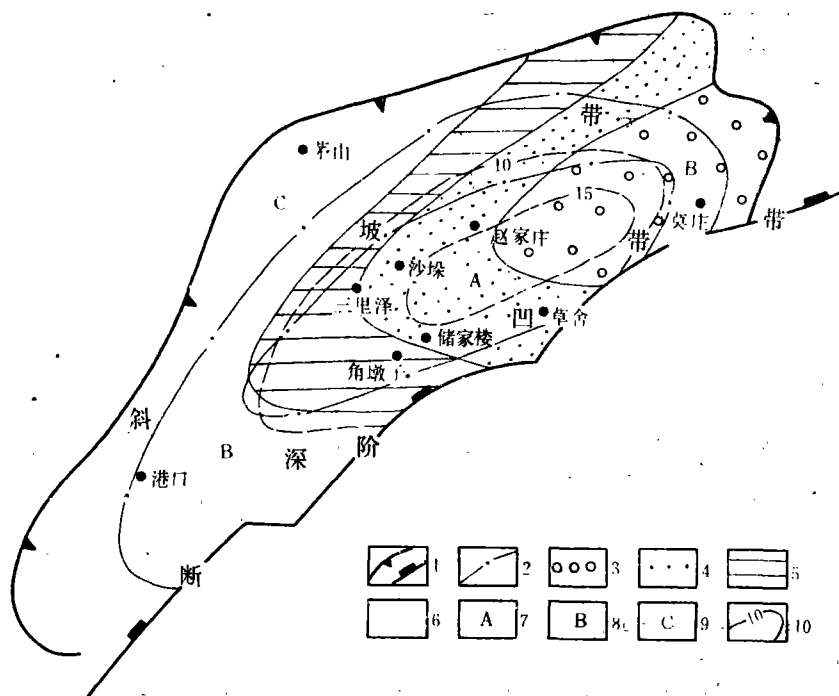


图4 苏北溱潼凹陷戴南组一段次生孔隙平面分布图

1. 边界; 2. 成岩相界线; 3. 水下扇扇根; 4. 水下扇扇中; 5. 水下扇扇端; 6. 滨浅湖;
7. 溶蚀成岩相; 8. 自生粘土矿物胶结成岩相; 9. 压实成岩相; 10. 次生孔隙度(%)

Fig. 4 Plan showing the distribution of the secondary porosity in the first member of the Dainan Formation in the Qintong depression in northern Jiangsu

1=boundary line; 2=diagenetic facies boundary; 3=proximal fan of a subaqueous alluvial fan; 4=middle fan of a subaqueous alluvial fan; 5=distal fan of a subaqueous alluvial fan; 6=littoral-shallow lake; 7=solution diagenetic facies; 8=cementation-diagenetic facies of authigenic clay minerals; 9=compaction-diagenetic facies; 10=secondary porosity (in %)

带,随着凹陷结构变化,泥岩压实异常曲线由浅—深—浅,相应地,这些关键井的次生孔隙分布也具相同变化规律。为了更深入地分析不同构造区带储层次生孔隙分布特征,笔者利用四条泥岩压实异常特征曲线与次生孔隙发育分布的对应关系,并根据同一沉积组合在相同的成岩作用下具有相似的演变规律的原则,由已知推测未知,首先对关键井所处的圈闭次生孔隙进行定量计算,然后再推测与其岩性组合相似的同一构造带上相邻圈闭的次生孔隙分布,从而建立起凹陷不同构造区带的次生孔隙分布模型,后续钻井已验证了预测的准确性(表3)。

4 次生孔隙形成与油气聚集时间探讨

油气进入储层可以抑制各种化学成岩作用,阻止自生矿物充填,使原、次生孔隙免遭破坏同时也妨碍了次生孔隙的进一步发育。因此,可以将油气聚集作为次生孔隙终止发育的标志。

据色、质谱及碳同位素油源对比分析,本区戴南组一段有两种成油组合,一种是戴南组一段自生自储成油组合(如储家楼油田),另一种是阜宁组生,戴南组一段储的成油组合(如草舍油田)。盆地地史、热史模拟表明,阜宁组烃源岩在29.3Ma的三垛组一段沉积时已进入主要生、排油期,而戴南组一段烃源岩至少要到盐城组一段沉积后期(2Ma)才能进入生油门限,因此,戴南组油气聚集的主要时期不会早于盐城组一段沉积末期。铸体薄片和荧光薄片研究认为戴南组一段以次生粒间孔隙储油为主,表明油气的聚集时间晚于戴南组一段次生

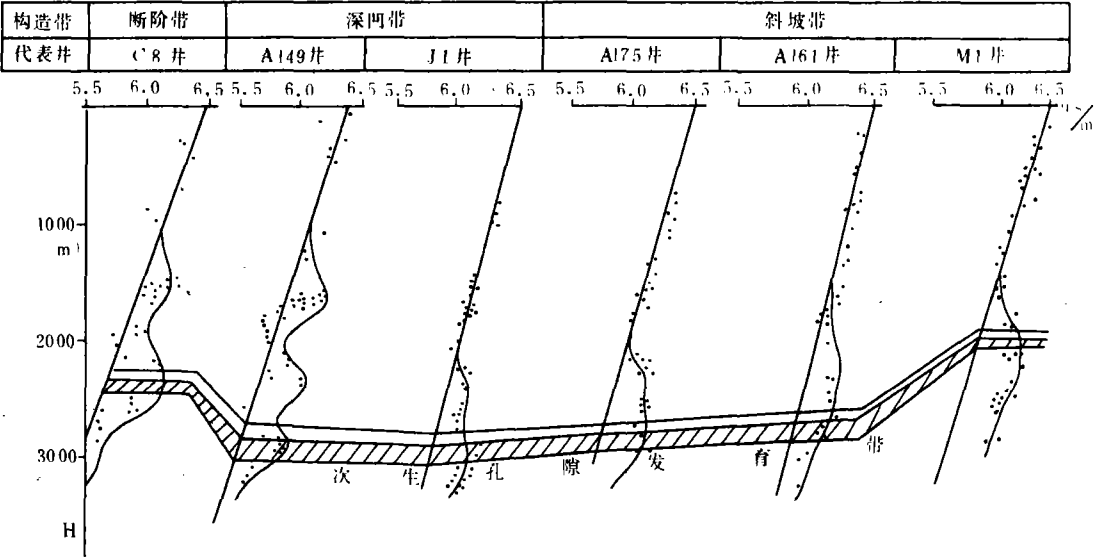


图5 苏北溱潼凹陷不同区域构造部位泥岩压实特征与次生孔隙分布
Fig. 5 Diagram showing the curves for the mudstone compaction and distribution of the secondary porosity in different tectonic zones in the Qintong depression in northern Jiangsu

表3 苏北溱潼凹陷戴南组一段次生孔隙分布预测
Table 3 Predicted distribution of the secondary porosity in the first member of the Dainan Formation in the Qintong depression in northern Jiangsu

构造区带		断阶带	深凹带			斜坡带	
		草舍中断块	储家楼	角墩子	三里泽	沙垛—赵家庄	茅山
次生孔隙分布	预测深度(m)	2320~2422.0	2827~3020.0	2820~2893.0	2690~2840	2522~2725	2042~2050.0
	次生孔隙度(%)	11.47	13.85	13.85	12.21	11.55	4.77

* 已经钻井验证

孔隙的形成时间。由此推断第二种成油组合类型(即草舍油田)戴南组一段次生孔隙形成的时期约在距今43.6Ma~29.3Ma之间,第一成油组合类型(即储家楼油田)戴南组一段次生孔隙形成的主要时期应在43.6Ma~2Ma,前者是阜宁组有机质成熟脱羧形成的酸性成岩流体的溶解所致,后者则是戴南组一段上部暗色泥岩成熟脱羧形成的酸性成岩流体溶解的结果。

5. 结论

- 1、戴南组一段孔隙类型以次生粒间孔为主,可分为五类,随埋深增加,次生孔隙愈发育,纵向上可形成六个孔隙发育带。
- 2、戴南组一段次生孔隙是碳酸(为主)和有机酸对碳酸盐胶结物的溶解造成,发育的理想深度范围为2300m~3300m,温度为80℃~140℃,使戴南组一段孔隙度平均增加9.92%。
- 3、次生孔隙分布预测模型给未经勘探的构造提供了目的层物性分布特征的信息,为勘探决策提供了依据。
- 4、戴南组一段以次生孔隙储油为主,根据盆地地史、热史和运移聚集中模拟研究确定的油气充填时间发生在距今29.3Ma~2Ma前的三垛组一段—盐城组一段,推论戴南组一段次

生孔隙形成的主要时间约在距今43.6Ma~2Ma 地史时期。

本院费富安教授指导研究并审阅全文,谨表谢忱。

参 考 文 献

- 1 Volkmar Schmid and David A. McDonald. (陈荷立, 汤锡元译). 砂岩成岩过程中的次生储集孔隙. 石油工业出版社, 1982
- 2 朱国华. 沉积成岩作用(砂岩的成岩作用). 科学出版社, 1992
- 3 Meshri, I. D. On the reactivity of carbonic organic acids and generation of secondary porosity. SEPM, 1986, 121-123
- 4 Surdam, R. C. Steven and Leara, J. Role of organic and inorganic reactions in development of secondary porosity in sandstone. AAPG Bulletin, 1982, 66(5), 635
- 5 Carothers, W. W. and Kharaks, Y. K. Aliphatic acid anions in oil-field water-implications for origin of natural gas. AAPG. Bulletin, 1978, 62, 2441-2453
- 6 Ronald, C. Surdam, R. C. et. al, Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. AAPG. Bulletin, 1989, 73(1), 1-23
- 7 胡见义、黄第藩等. 中国陆相石油地质理论基础. 石油工业出版社, 1991
- 8 邱世祥、祝总祺等. 碎屑岩储集层的孔隙结构及其成因对油气运移的控制作用. 西北大学出版社, 1991

FORMATION AND DISTRIBUTION OF THE SECONDARY POROSITY IN THE FIRST MEMBER OF THE DAINAN FORMATION IN THE QINTONG DEPRESSION, NORTHERN JIANGSU

Liu Wei

*Design Institute of Petroleum Explorayion and Development,
East China Bureau of Petroleum Geology*

ABSTRACT

The secondary porosity is the major porosity type of sandstones reservoirs in the first member of the Dainan Formation in the Qintong depression, northern Jiangsu. The distribution of the secondary porosity is closely related to oil and gas accumulation. The author inquires, on the basis of the studies of diagenesis, into the genetic mechanism of the secondary porosity and owes its origin to the dissolution of organic acids. Some speculations upon the horizontal distribution of the secondary porosity were also made by the author in the light of organic maturity and compaction anomaly of the mudstones caused by clay mineral transformation, thus resulting in the improvement of the knowledge of the distribution of the secondary porosity and oil and gas accumulation in different structural zones in the study area.

Key words: secondary porosity, genesis, distribution, first member of the Dainan Formation of the Qintong depression in northern Jiangsu