

四川盆地中西部上三叠统砂岩 非构造裂缝储层*

王洪辉 陆正元

(成都理工学院石油系, 四川成都 610059)

四川盆地中西部上三叠统砂岩的裂缝控制了流体的储集与渗滤能力。裂缝为非构造作用成因, 由差异压实作用、溶蚀作用、岩溶陷落作用及重力滑动作用形成。古残丘的高部位和较高部位是非构造裂缝网系最发育的地方, 也是布置探井和开发井的理想位置。

关键词 非构造裂缝 致密砂岩 形成 上三叠统 四川盆地

第一作者简介 王洪辉 男 33岁 副教授 煤田、油气地质与勘探

四川盆地中西部上三叠统为一套海湾-海陆交互-河湖相煤系地层, 储层主要分布于上三叠统须家河组二段(以下简称须二段)与香溪群二段、四段和六段(以下简称香二段、香四段、香六段)这几个层段的砂岩中, 储层属裂缝型或孔隙-裂缝型。裂缝是油气的重要储集空间和渗滤通道, 研究裂缝成因对扩大勘探领域和提高勘探效益有指导意义。

1 非构造裂缝的提出及其特征

研究区上三叠统砂岩储层, 普遍具有低孔、低渗、高含水饱和度等特点, 其裂缝在工业性流体的产出上占有主导地位。裂缝不发育的井很难产出工业性气流, 当然更不用说形成大气井和高产卤水井。关于裂缝成因, 前人认为是岩层受构造应力后变形的结果; 但是, 构造裂缝理论很难解释研究区缝洞系统的分布。

1.1 构造平缓不利于构造裂缝发育

川中地区受燕山、喜山等多期构造运动的影响, 褶皱、断裂等构造形变是存在的, 尤其是边界地区较为明显; 但构造形变规模和强度不大, 岩层倾角普遍小于 10° , 特别是在中部地区倾角一般不超过 3° 。在如此平缓的构造内, 除剪切缝比较发育外, 由褶皱产生纵张缝和横张缝等的可能性很小或发育程度很差。同时, 上三叠统背斜和鼻状等构造的形成, 也不能排除中三叠统侵蚀面古地貌的作用及影响, 也就是说披覆构造也是现今构造的组成部分。如果考虑到古地貌对现今构造的影响, 构造应力对褶皱形成继之产生裂缝的作用显然还要小。

1.2 构造裂缝有利部位与实钻缝洞发育带位置不一致

勘探实践表明, 构造裂缝有利部位与实钻缝洞发育带位置不一致, 如营山构造是川中地区褶皱强度、隆起幅度和圈闭面积均居首位的重要勘探目标, 普遍认为是寻找大、中型气田的理

* 国家“八·五”重点科技攻关项目研究成果(85-102)

想场所,首批4口探井均部署在主体构造的高点上,按构造应力形成裂缝的观点,这些井的缝洞应当比其他构造发育得多,获得工业气流的希望大,可钻探结果均为干井。在其它一些构造高点和长轴上部署的许多探井,虽然在上三叠统中也见到气侵、井漏和岩屑中有次生矿物等不同程度的显示,也均未获得预期效果。

形成鲜明对比的是,磨溪古残丘东南斜坡上的磨76井,于香二段放空1.2 m并发生大规模井漏,共漏失泥浆 69 m^3 ,与之同为同一缝洞系统的磨119井,在香二段中也有井漏和放空现象,经测试均获得了高产工业气流;西北坡的磨72井,从香四段加深到香二段时放空0.5 m,无阻流量达 $184 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。遂8井是遂南气田天然气储量上亿立方米、无阻流量超百万立方米的唯一大气井,它的位置亦不在有利于裂缝发育的鼻轴上而是在鼻状构造的翼部。

1.3 非构造裂缝的特征

陈立官教授等^[1]曾认为,在构造极为平缓的香溪群砂岩中,与差异压实作用有关的非构造成因裂缝在工业性流体的产出和储集方面占有显要的地位。通过进一步研究,我们认为上三叠统砂岩中存在多种不同成因的非构造裂缝。

这里所指的非构造裂缝(包括洞穴)是与构造应力作用无关,但对工业性流体的储集和产出起着控制作用的裂缝。其成因主要与沉积物的体积力或重力有关,但不包括沉积物干裂缝、成岩裂缝及油气源岩排烃过程等产生的微裂缝。它主要受古地貌和溶蚀作用控制。

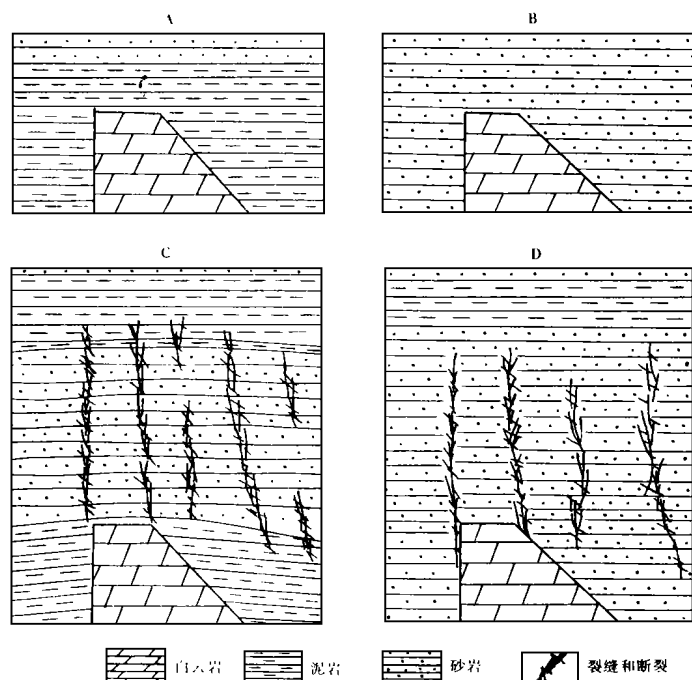


图1 非构造裂缝差异压实成因模式示意图

A, B—表示香二段刚开始沉积时的状态; C, D—表示差异压实后的状态

缝产生的主要原因。在香溪群沉积之前,印支运动使中三叠统雷口坡组以下地层整体抬升,遭受风化、淋滤与剥蚀,在侵蚀面上必然存在诸如残丘、陡坎、斜坡及沟槽等地形上的起伏,它们对香溪群特别是香一段和香二段沉积物的分布和厚度起着控制作用。图1为以雷口坡组古侵

非构造裂缝(包括洞穴)与构造裂缝有明显区别:(1)非构造裂缝无一定组系,比较杂乱;构造裂缝组系清楚,有一定规律。(2)非构造裂缝在很小范围如岩芯直径范围内,裂缝宽度有很大变化,小的不到1 mm,大的可超过3 cm;构造裂缝宽度变化很小。(3)非构造裂缝缝面粗糙不平;构造裂缝缝面平直,偶见擦痕。(4)非构造裂缝分布不普遍,但在香二段与香四段块状砂岩中,裂缝密度远比构造裂缝为大。(5)非构造裂缝常缝洞相伴,导致在致密砂岩中钻具放空;构造裂缝除个别特殊例证外,不与洞穴共存。

2 形成原因与地质条件

2.1 差异压实作用

陈立官教授等^[2]认为,差异压实作用是香溪群尤其是香二段中裂

蚀面为背景的差异压实理论模式, 残丘顶部水平, 左端为垂直陡坎, 右端为斜坡, 四周为水平地貌。图 1-A, C 与图 1-B, D 的差别是, 前者有香一段泥质沉积物, 后者香二段砂质沉积物直接覆盖在雷口坡组之上。由于雷口坡组的碳酸盐早已固结成岩, 可近似地认为不压实; 而泥质和砂质沉积物从开始沉积到固结成岩是一个连续性的压实过程。据罗蛰潭教授等^[3]研究, 当上覆载荷从零增加到 100 MPa 时, 无水粘土的孔隙度从 61.84% 下降到 10.17%, 而干的中粒石英砂孔隙度由 52.2% 下降到 26.15%。虽然后者比前者的压实程度要小一些, 但与基本上不压实的碳酸盐岩相比较也是甚为显著的, 何况试验研究中所用的上覆载荷远比香二段在地质历史时期中所经受的上覆压力小得多。

由于差异压实作用, 在残丘的四周的沉积物将产生相对位移, 裂缝即随之产生。由于地貌的多变性, 由此而产生的裂缝肯定不成组系分布, 且裂缝(包括洞穴)宽度变化很大并伴随有角砾及岩层的产状异常。很明显, 由差异压实作用所产生的裂缝, 因沉积补偿作用其发育程度将由下而上逐渐减弱, 这与裂缝发育带频率由香二段到香六段不断下降的统计规律是一致的。据统计, 川中 31 口未取芯的井中, 其裂缝发育段出现的频率是香二段占 67.7%, 香四段占 14.8%, 香六段仅占 8%。

为了半定量地阐述差异压实作用对裂缝形成的控制作用, 假设残丘的高度为 50 m, 香一段的泥质沉积物恰好将残丘埋设, 其上沉积了香二段砂质沉积物。当香二段砂质沉积物厚度达 250 m 时(大体相当于香二段顶界), 残丘周围香一段沉积物顶界所产生的最大位移, 可作如下估算。

泥质沉积在埋藏深度不断增大时, 其孔隙度 Φ 的变化公式为

$$\Phi = \Phi_0 e^{-ch}$$

式中 Φ_0 为沉积时的孔隙度/%, 一般取 65%; Φ 为某一埋藏深度的孔隙度/%; h 为埋藏深度/m; c 为压实系数, e 为指数函数底数(为一常数 $e = 2.718\ 281\ 828$)。

估算结果, 香一段泥质沉积物顶面比残丘高点的最大下降幅度为 15~20 m, 如此大的下降幅度必然使香二段砂质沉积物向下塌陷, 在残丘的陡坎和斜坡处形成裂缝、洞穴和断裂。裂缝、洞穴和断裂和规模决定于:

2.1.1 残丘规模

残丘规模越大, 差异压实作用的幅度也越大, 裂缝的规模和范围也越大; 但随着沉积补偿作用的延续, 离残丘面越远, 裂缝的规模与范围将越小, 最后将完全消失。

2.1.2 泥质沉积物的厚度变化

泥质沉积物的厚度变化愈大, 差异压实程度愈高, 尤其是香一段厚度变化愈大, 上覆岩石香二、四段中的裂缝网系也愈大。如果缺失了香一段, 则上覆砂岩的裂缝将显著减少。

2.1.3 残丘坡度

坡度太大或近于垂直时, 裂缝的范围仅局限于陡坎附近的狭窄地带; 坡度太小接近于水平时, 差异压实作用很微弱, 不利于形成较大的裂缝网系。

2.1.4 局部地形变化

斜坡绝不是均一的, 往往有小凹、小凸或平台相间隔, 凹地与平台均不利于裂缝形成, 很可能起到分割裂缝网系的作用, 这可能是香溪群砂岩中产生多裂缝系统的主要原因之一。

2.2 溶蚀作用

碳酸盐岩储层中溶蚀作用形成次生孔洞屡见不鲜, 而砂岩能否因溶蚀作用产生洞穴形成

工业储层的问题却很少有人注意。磨76井在香二段放空1.2 m并获高产气流的现实,引起了我们对砂岩洞穴成因的思考。我们实地调查了四川盆地的许多野外地质剖面,在地表砂岩露头中见到了类似碳酸盐岩中那样有相当规模的溶蚀洞穴,为确定砂岩因溶蚀而产生洞穴提供了直接依据。

砂岩中最易溶解的是碳酸盐胶结物,其次是长石特别是斜长石颗粒,有时也偶见浊沸石被溶蚀后的溶孔砂岩。砂岩中的石英、长石颗粒也可以被碳酸盐岩交代从而成为易溶组分,有利于次生孔隙的形成。据张河清等^{*}研究,香二段中的部分砂岩成岩早期碳酸盐化强,铁方解石含量达21.4%~27.6%,平均为25%,呈细-中粒他形晶充填孔隙,在后期压实过程中有的经重结晶形成大片连晶;成岩晚期碳酸盐化很弱,铁方解石含量小于8.7%,平均为0.8%,普遍分布于成岩较晚的近镶嵌状砂岩中,呈粉-细晶他形晶零星充填孔隙。总体看来,川中地区香溪群砂岩中铁方解石胶结物含量很低,通常为1%左右,但局部很富集,形成灰岩砂质或灰质砂岩透镜体。据对磨溪地区9口井的粗略统计,香溪群各段均有灰质砂岩存在,但以香一、三、五段居多,累计厚度为4.8~105.6 m,香二段中的灰质砂岩多出现在该段的中下部,多者达7层,单层厚度为0.17~2.04 m。灰质砂岩的存在为以后的溶蚀奠定了物质基础。

地下有利于灰质砂岩中碳酸钙被溶蚀的条件有3:(1)在沉积与成岩过程中,由差异压实和重力滑动作用所产生的裂缝和断裂为地下水的流动提供了良好通道,使溶蚀后的物质一部分被带到别的地方,一部分保留在水中,一部分在裂缝或孔隙中沉淀下来形成单晶、晶簇或他形晶;(2)香一、三、五段等泥质岩中的有机质在漫长的热解脱羧基过程中,不断分离出CO₂并溶于水形成不饱和的酸性水,大大提高了地层水对方解石等的溶解度;(3)厚500~700 m的上三叠统从沉积到成岩过程中长期延续不断的压实作用,会排出大量的自由水和吸附水作为溶剂的来源。

岩芯中见到了溶蚀洞穴。蓬21井井深2 239.4~2 246.8 m香四段岩芯中缝洞十分发育,岩芯表面似蜂窝状,有洞345个,平均洞密度为46.6个/m,最大洞为mm:52×9×17;裂缝103条,裂缝密度为13.9条/m,缝洞彼此相通:该段测试日产水316.8 m³,气31 200 m³(折算产量)。蓬7井钻至井深2 367~2 371.62 m香二段时发生严重井喷,喷出大量黑色及深灰色灰质粉砂岩、细砂岩碎块,岩块最大为cm:30×18×18;非构造成因的缝洞甚为发育,均为方解石和石英半充填。方解石脉宽一般为3 mm,最宽达20 mm,晶体一般为mm:1×3,最大为mm:3×2;石英晶体一般为mm:10×6。岩石表面空洞颇多,最大者长为10 mm,宽3~5 mm,一般为mm:3×1×1。

2.3 岩溶陷落作用

岩溶陷落柱是由易溶蚀的碳酸盐岩和硫酸盐岩,在强烈的溶蚀作用下形成大量岩溶空洞,因而失去对上覆岩层的顶托力,在重力作用下上覆岩层向溶蚀空间塌落而形成的筒形柱体(图2)。岩溶是形成陷落柱的基本条件。四川盆地中三叠统嘉陵江组和雷口坡组有巨厚的岩盐、硬石膏层,以及易溶蚀的碳酸盐岩层,在印支期长期淋滤与溶蚀作用下,具备形成陷落柱的条件。陷落柱的典型实例有:

(1)合川县全济煤矿香溪群煤层大巷中有不少陷落柱,横断面为椭圆形,长轴直径数m到

* 张河清,裴记伏. 川中遂南气田T_h²砂岩成岩变化与孔隙关系探讨(川中矿区研究所科研报告). 1980

60 m,由砂、页角砾及煤屑组成。角砾大者超过 1m,小者仅数 cm,大小混杂,不显层理。陷落柱往往贯穿上下几个煤层,其邻近地段发现有小型拖引的正断层^[5]。

(2) 四川盆地南部海潮构造海 1 井在嘉陵江组侵蚀面以下 85.7 m 取芯,发现 10 个大溶洞内部充填香溪群的灰绿色铝土质泥岩、黑色砂质泥岩及灰岩角砾,溶洞垂直高度 2.4~7.21 m。阳高寺构造阳 17 井、68 井等均在嘉陵江组侵蚀面以下发现了大小不等的古溶洞,洞内充填香溪群页岩、煤、泥质粉砂岩、砂质页岩等。

(3) 古宋大坡顶剖面距雷口坡组侵蚀面顶约 100 m 的雷口坡组露头中,有一长 70 m,宽 10 m,面积约 700 m² 的香溪群砂岩块体,砂岩产状杂乱,在其与四周的白云岩接触带中见砂岩角砾和白云岩角砾组成的角砾岩。

这些洞穴内的沉积物都是上覆香溪群岩层由于失去支撑力而向古岩溶洞穴塌陷的结果。陷落柱之上的裂缝和空间很可能成为油气储集空间的一部分。

2.4 重力滑动作用

前人研究认为^[6],印支期形成的泸州古隆起(图 3)的 NW 侧,雷口坡组侵蚀面向 NW 方向倾斜的总坡度为 0.3°。雷口坡组侵蚀面的坡度从总体上看是很小的,但局部地方大于 2°是肯定存在的,这就为重力滑动创造了必要条件^[7]。

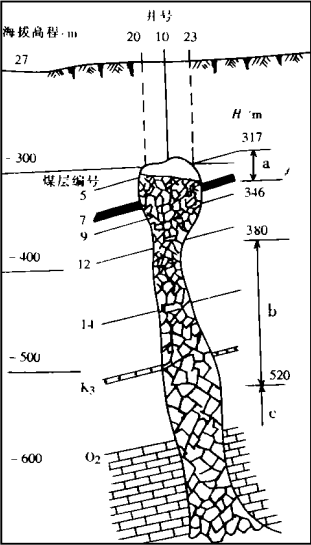


图 2 陷落柱剖面图(据[4])
K₃—唐山灰岩; O₂—奥陶纪灰岩;
a—顶部充填加压段; b—中部注浆截堵段; c—下部堵水加固段

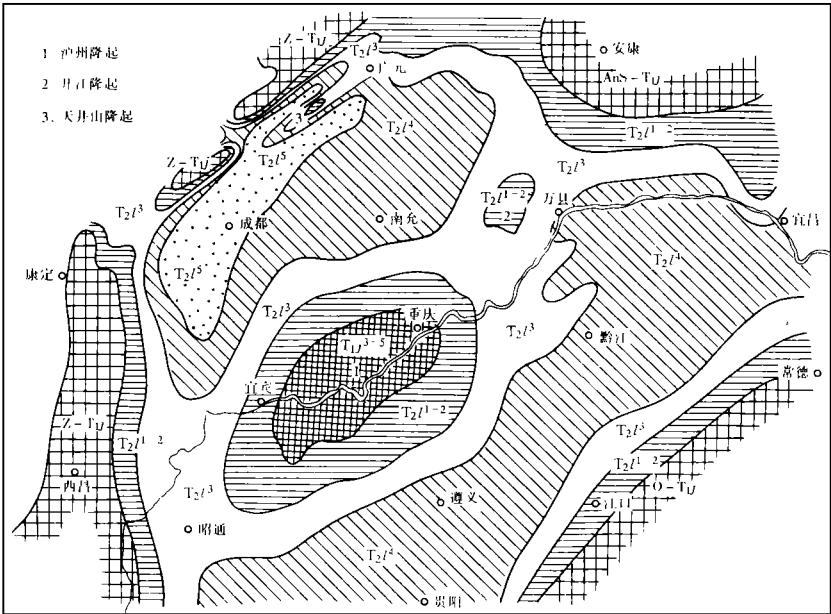


图 3 四川盆地晚三叠世前古地质图(据[6])

AnS-T₂¹—前志留系-下三叠统嘉陵江组; O-T₂¹—奥陶系-下三叠统嘉陵江组; Z-T₂¹—震旦系-下三叠统嘉陵江组; T₂¹⁻⁵—下三叠统嘉陵江组一五段; T₂¹⁻²—中三叠统雷口坡组一、二段; T₂^{1-3,4,5}—中三叠统雷口坡组三一五段

四川盆地上三叠统须一段分布范围较广,沉积中心在大邑、彭县附近,向东超覆于雷口坡

组及嘉陵江组之上,厚度明显减薄,一般厚 50~400 m,这也为重力滑动创造了条件。沉积物的顺坡滑动使岩层发生变形,当作用较强时,岩石遭到强烈的揉皱,破碎成块,具有角砾状外貌。遂 40 井 2 229~2 269 m 香二段的岩芯中多处见顺层擦痕及滑动变形构造;在井深 2 251.71 m 处的泥质粉砂岩的底部见到重力滑动作用形成的叠瓦式正断层,断面上陡下缓,断面倾角为 30~60°,断距 2~10 mm,在其下的泥质层中还可见到滑动变形构造。磨 65 井 1 927~1 980.25 m 井段香四段岩芯上也多处见顺层擦痕,并在 1 976.4 m 深处见到滑动变形构造。平落 4 井 3 697.28~3 697.57 m 香一段深灰色细砂岩岩芯中见到滑动下塌面形成的 4 条阶梯状微型正断层,且底部具有滑动面。

重力滑动或滑塌的作用力既有垂直分力又有水平分力,垂向分力使松散沉积物压实,水平分力使沉积物沿斜坡下滑并产生沿斜坡方向的拉张力。在拉张力的作用下斜坡上部的沉积物受到拉张会形成裂缝和断裂,加之沉积物压实的不均一性等地质因素的影响,局部岩层产状会发生明显变异,与区域地层产状形成鲜明对照。如遂 40 井 2 253~2 255.73 m 井段香二段位于产状水平的泥质砂岩层之下,岩层陡立,倾角 70~90°,高角度斜交缝、垂直裂缝及洞穴发育,岩芯破碎,见有 29 条张性缝、16 个洞穴。又如磨 65 井 1 930.17~1 971.19 m 井段香四段岩芯,地层倾角高达 30°左右,比该构造正常地层倾角大 10 倍左右。

重力滑动可能是古残丘高部位产生大缝大洞的重要因素。以磨 76 井为例,古残丘斜坡顶端的缝洞,难于用差异压实作用圆满解释,但可用重力滑动水平分力拉张作用来说明,当然也可能有溶蚀作用的进一步改造。另外,遂 37 井钻至 2 382~2 390.6 m 香二段井喷时喷出的岩块中见到 mm: 45×35×15 的方解石晶体,一般为 mm: 25×15×10,由此可能推断地下有相当大的缝洞存在。

3 分布规律及预测

理论模型、实验模拟和矿场生产资料均已表明,古残丘斜坡的高部位和较高部位是非构造缝洞网系最发育的地方,也自然是探井或开发井的理想位置。找准这些部位的关键是把钻井资料和地震剖面结合起来,根据香一段、香一至香二段及香一至香四段的厚度变化寻找古残丘斜坡。对于尚未钻井的地区,可将中三叠统侵蚀面构造图与香二段或香四段顶面构造图相叠合,在同一区块内前者等高线较密集,后者等高线较稀疏的地方,也即是香一段至香二段或香四段厚度变异大的地方,便是古残丘斜坡所在地。只要有了符合实际的地震构造图,不难找到古残丘斜坡的高部位和较高部位。当然有钻井资料与地震剖面配合就更为有利。在研究中,我们和川中矿区共同预测的磨 72 井,在加深到井深 2 102.0 m 香二段时放空 0.5 m,获得无阻流量为 $184 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流,其成功的关键就在于找准了古残丘斜坡的高部位。该斜坡反映在构造图上是香一段顶等高线较密和香四段顶等高线较稀的地方,也就是香一段至香四段厚度变异大的区块。该井的加深成功已初步证明,我们所提出的一套非构造裂缝(包括洞穴)成因理论和预测方法,很可能是在构造极平缓地区甚至向斜内,寻找天然气局部富集带的有效新途径。

另外,非构造缝洞发育的地方岩石强度大大减弱,在构造应力作用下很容易产生断裂,断裂方向和部位很可能与理想应力作用结果不协调。与构造应力不协调断层可作为非构造缝洞发育的重要标志(也不能否认与构造应力协调的断层附近可能有非构造缝洞发育)。

致谢: 本项研究得到项目负责人陈立官教授的悉心指导,谨致诚挚谢意。

参 考 文 献

1 陈立官, 程光瑛, 李鸿智. 油气田数学地质. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989. 67~ 70

2 陈立官, 陆正元, 夏先禹等. 川中香溪群中与差异压实作用有关的非构造缝储层. 成都地质学院学报, 1991, 18(1): 20~ 27

3 罗蛰潭, 何开华, 王允诚等. 砂泥岩压实实验与油气初次运移研究. 成都: 四川人民出版社, 1982. 66~ 75

4 开滦矿务局, 煤科院地质勘探分院, 煤科院建井研究所. 开滦范各庄矿岩溶陷落柱特大突水灾害的治理. 煤田地质与勘探, 1986, (2): 51~ 59

5 钱学溥. 石膏喀斯特陷落柱的形成及其水文地质意义. 中国岩溶, 1988, 7(4): 344~ 348

6 张继铭, 唐泽尧, 王丽霜等. 中国石油地质志(卷 10), 四川油气区. 北京: 石油工业出版社, 1989. 82~ 86

7 刘宝珪. 沉积岩石学. 北京: 地质出版社, 1979. 88~ 100

NONTECTONIC FRACTURED SANDSTONE RESERVOIRS OF
UPPER TRIASSIC IN MIDDLE- WEST SICHUAN BASIN

Wang Honghui Lu Zhengyuan

(Department of Petroleum, Chengdu Institute of Technology, Chengdu, Sichuan)

Abstract

The fractures in Upper Triassic sandstones in middle-west ares of Sichuan Basin has controlled the reservoiring and penetration of fluids. The fracture forming mechanism in Upper Triassic of the area is mainly nontectonic origin, including differential compaction, corrossion, karst collapse and gravity sliding. The top and upper parts of paleo-unaka are favourable places for nontectonic fracture system, thus they are perfect places for both test wells and development wells.