

川西坳陷崇州沙溪庙组次生气藏成藏模式

杨映涛, 阎丽妮, 朱 丽, 张 玲, 孙意博

中国石化西南油气分公司勘探开发研究院, 四川 成都

Email: taoyingyang@163.com

收稿日期: 2020年12月21日; 录用日期: 2021年2月10日; 发布日期: 2021年2月19日

摘 要

针对川西坳陷崇州沙溪庙组次生气藏成藏主控因素及成藏模式不清的问题, 利用岩心物性、岩石薄片、储层流体包裹体测温、碳酸盐胶结物碳同位素等分析化验资料, 对崇州沙溪庙组气藏成藏地质条件、成藏主控因素及成藏模式进行了研究。结果表明: 崇州地区沙溪庙组构造、烃源、储层、输导等成藏地质条件有利, 上沙溪庙组成藏模式属于游离相运移的先致密后成藏, 天然气聚集成藏主要受砂体与烃源断层配置关系和相对优质储层发育程度控制, 天然气呈邻近烃源断层聚集成藏的特征; 下沙溪庙组成藏模式属于水溶相运移的边溶蚀边成藏, 天然气聚集成藏主要受砂体与烃源断层配置关系和构造位置控制, 天然气可远离烃源断层聚集成藏。研究成果对该区沙溪庙组下步油气勘探具有重要的指导意义。

关键词

孔隙演化, 成藏主控因素, 成藏模式, 沙溪庙组, 崇州地区, 川西坳陷

Accumulation Models of Secondary Gas Reservoirs in Shaximiao Formation, Chongzhou area, Western Sichuan Depression

Yingtao Yang, Lini Yan, Li Zhu, Ling Zhang, Yibo Sun

Exploration & Production Institute of Southwest Petroleum Branch Company of SINOPEC, Chengdu Sichuan

Email: taoyingyang@163.com

Received: Dec. 21st, 2020; accepted: Feb. 10th, 2021; published: Feb. 19th, 2021

Abstract

The main controlling factors and accumulation models of secondary gas reservoirs in Shaximiao Formation of Chongzhou area are not clear. Based on the analyses of laboratory data including drill

cores, rock slices, temperature measurement of fluid inclusion, carbon isotope of carbonate cement, combining with burial history and thermal evolution history analysis, the accumulation models are summarized and the main controlling factors are researched in study area. The study shows that Shaximiao Formation of Chongzhou area has superior accumulation conditions, especially in structure, hydrocarbon source, reservoir and conduction. The migration of upper Shaximiao Formation nature gas was mainly free phase, and reservoirs' densification was earlier than its major period of accumulation. By this time, the main accumulation controlled factors were the relation between sand body and hydrocarbon fault and development of high-quality reservoir, and reservoirs were distributed in hydrocarbon fault nearby. The migration of lower Shaximiao Formation gas was water soluble phase, the accumulation model was characterized by corroding and accumulating at same time. The reservoirs were formed in the part where is far from hydrocarbon fault, and mainly influenced by the relation between sand body and hydrocarbon fault and structural location. The research results could play a key role in future oil and gas exploration of Shaximiao Formation in study area.

Keywords

Porosity Evolution, The Main Controlling Factor of Tibet, Reservoiring Pattern, Shaximiao Formation, Chongzhou Area, Western Sichuan Depression

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

通过多年的持续勘探与开发,川西坳陷侏罗系沙溪庙组取得了较好的勘探效果,累计提交天然气探明储量近十亿方[1] [2] [3],但川西坳陷成都凹陷东部的崇州地区勘探效果较差。该区多轮的勘探实践与研究证实,沙溪庙组含气性较好,成藏模式复杂多样。前期对该区天然气成藏模式及成藏主控因素等认识不清,导致该区沙溪庙组油气勘探停滞不前。文章应用大量的岩心物性、岩石薄片、储层流体包裹体、碳酸盐胶结物碳同位素等分析化验资料,结合埋藏史、热演化史分析,在深入研究储层致密化史、天然气运移相态、成藏要素配置关系的基础上,明确了沙溪庙组气藏成藏主控因素及成藏模式,为该区沙溪庙组下步油气勘探工作提供具体的理论指导。

2. 区域背景

崇州地区位于四川盆地川西坳陷成都凹陷东部,由于地处弱形变区,断裂及正向构造不发育,仅发育温江、马井背斜构造及F4、F5等断层。川西坳陷自晚三叠世以来,一直处于四川盆地陆相地层沉积中心,沉积了巨厚的上三叠统-白垩系地层,烃源岩主要位于上三叠统须家河组三段、五段,储层主要位于上三叠统须家河组二段、四段及侏罗系,其中侏罗系沙溪庙组地层厚度达700 m,主要由浅绿灰色、粉砂岩和棕褐色泥岩组成,砂岩厚度较大,含气性较好,是区内主要的天然气勘探层系[2] [3] (图1)。

3. 油气成藏地质条件

3.1. 烃源条件

气源对比研究成果表明[4] [5] [6],川西坳陷侏罗系沙溪庙组天然气主要来自下伏须家河组五段烃源岩,储层与烃源岩不直接接触,属于源储跨越型次生气藏。而崇州地区位于川西坳陷须家河组五段烃源岩生烃中心,须家河组五段暗色泥页岩厚度300~350 m,生烃强度达 $60\sim 80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{km}^2$,烃源条件好。

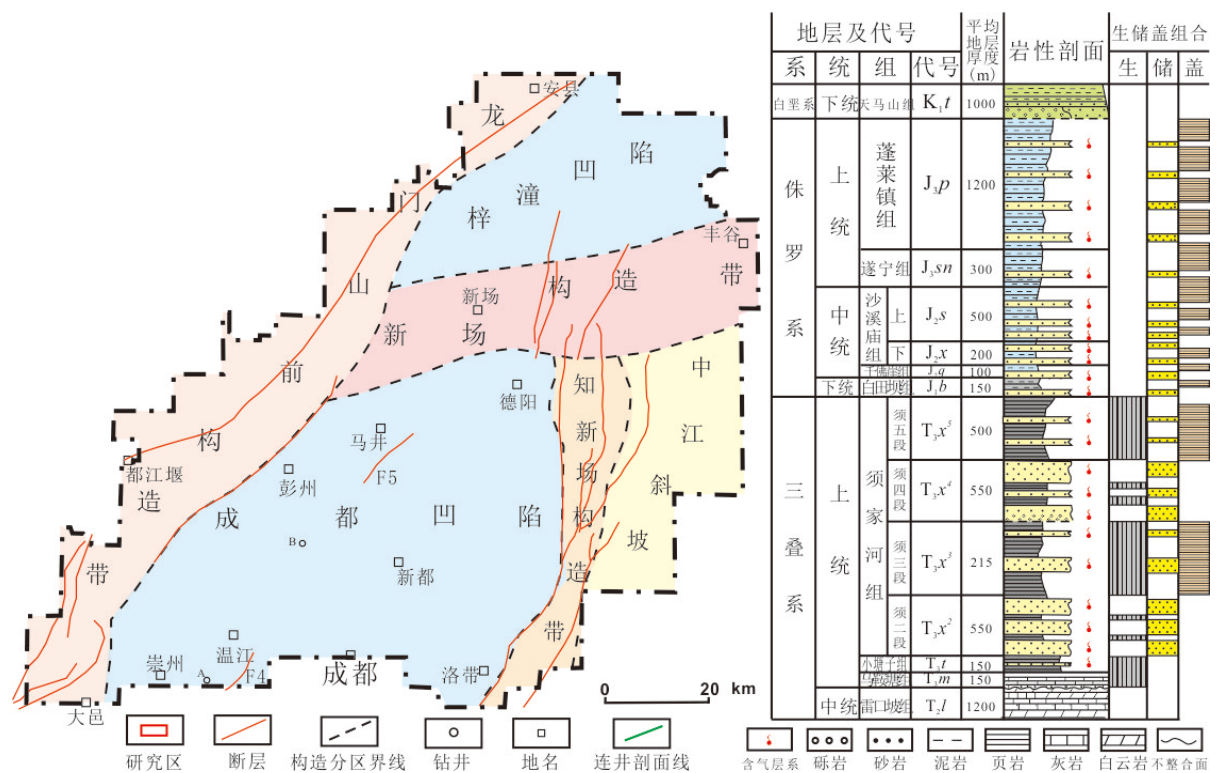


Figure 1. Division of structural units and stratigraphic column of Upper Triassic-Cretaceous in Western Sichuan depression, Sichuan Basin

图 1. 四川盆地川西坳陷构造单元划分及上三叠统 - 白垩系地层柱状图

根据烃源岩热演化史研究可知[1] [2], 川西坳陷须五段烃源岩在 K₁ 早期(约 125 Ma)进入生排烃门限, 在 K₁ 中期(约 110 Ma)进入生排烃高峰期。此外, 区内发育的 F4、F5 等断层, 向下断至须家河组五段烃源层, 向上断至沙溪庙组, 对沟通烃源层与储层意义重大。

3.2. 储层条件

储层特征研究可知, 崇州地区上沙溪庙组储层岩性以中、细粒岩屑砂岩为主, 储层物性差, 孔隙度均值 7.36%, 渗透率均值 0.06 mD, 孔隙类型以剩余粒间孔为主; 下沙溪庙组储层岩性以灰色中、细粒岩屑长石砂岩为主, 储层物性好, 孔隙度均值 10.6%, 渗透率均值 0.2 mD, 孔隙类型以次生溶蚀孔为主。

储层成岩作用及孔隙演化研究结果表明(图 2、图 3), 早成岩期至中成岩 A 期的早期(约 120 Ma), 由于压实作用、胶结作用等破坏性成岩作用影响, 储层孔隙度持续下降, 上沙溪庙组降低至 9%左右, 下沙溪庙组降低至 5%左右, 此时储层均已致密化(孔隙度 < 10%); K₁ 中~晚期, 须五段烃源岩进入生排烃高峰期, 此时烃源岩生烃过程中所排出的有机酸沿烃源断层运移到沙溪庙组砂岩中, 对下沙溪庙组砂岩中长石等易溶矿物产生了强烈的溶蚀作用, 形成了较为发育的溶蚀孔隙, 使得下沙溪庙组砂岩孔隙度由 5% 逐渐改善到 11%左右, 而上沙溪庙组由于缺乏长石等易溶矿物, 溶蚀作用欠发育, 由于压实作用的增强, 砂岩孔隙度进一步降低至 7%左右。

3.3. 输导条件

3.3.1. 天然气运移相态

天然气运移相态是研究天然气运移的核心问题, 天然气从烃源岩排出后, 主要存在游离相和水溶相

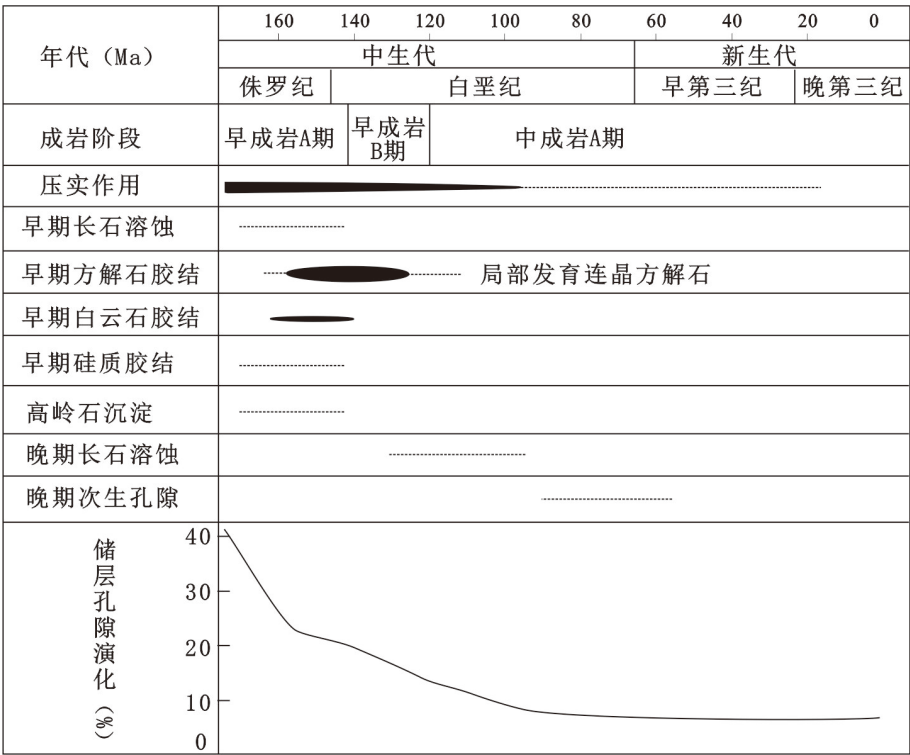


Figure 2. Diagenetic sequence and porosity evolution of the upper Shaximiao formation in Chongzhou area

图 2. 崇州上沙溪庙组储层成岩演化序列及孔隙演化

两种运移相态[7][8]。前人研究表明[9][10]，碳酸盐胶结物碳同位素可以指示成岩流体中碳的来源。当碳酸盐胶结物的 $\delta^{13}\text{C}$ 值较高，介于 -4‰ ~ 4‰ ，属于无机碳源； $\delta^{13}\text{C}$ 值介于 -4‰ ~ -35‰ ，属于有机碳源。储层碳酸盐胶结物碳同位素值较低说明储层受下伏须五段烃源岩排出的有机酸影响较大，此时须五段烃源岩生成的天然气在高温高压下大量溶解于水(层间水、吸附水、自由水等)、有机酸等形成的混合溶液中，并随之运移至储层中，导致储层碳酸盐胶结物碳同位素值较低，显示天然气以水溶相运移为主；反之，而较高的储层碳酸盐胶结物碳同位素值说明天然气以游离相运移为主。

根据崇州地区沙溪庙组 45 块储层碳酸盐胶结物碳同位素分析资料可知，上沙溪庙组储层碳酸盐胶结物碳同位素值相对较重，主要分布在 -8.1‰ ~ -2.52‰ 之间，平均 -4.65‰ ，反映上沙溪庙组天然气以游离相运移为主；下沙溪庙组储层碳酸盐胶结物碳同位素值主要分布在 -13.82‰ ~ 5.17‰ 之间，平均 -10.12‰ ，反映下沙溪庙组天然气以水溶相运移为主。

3.3.2. 天然气运移通道

对于川西坳陷侏罗系次生气藏来说，天然气运移路径主要为断层和砂岩输导层[1][7]。断层可以作为油气运移通道这一点已经形成共识，在很多盆地中发现沿断层分布的油气苗就是断层作为油气运移通道的直接证据。构造特征研究表明，崇州地区虽然整体位于弱形变区，但也发育沟通侏罗系储层与须家河组烃源层的断层，这对本区天然气垂向运移至关重要。

砂岩输导层是油气进行侧向运移的主要通道。由于崇州沙溪庙组天然气存在水溶相、游离相两种运移相态，水溶相在亲水的砂岩中运移，毛细管阻力大大减低[7]，侧向运移距离相对较远；而游离相天然气在砂岩输导层中运移受到较大的毛细管阻力，特别是储层致密化后，喉道半径变小，运移阻力变大，侧向运移距离较近。

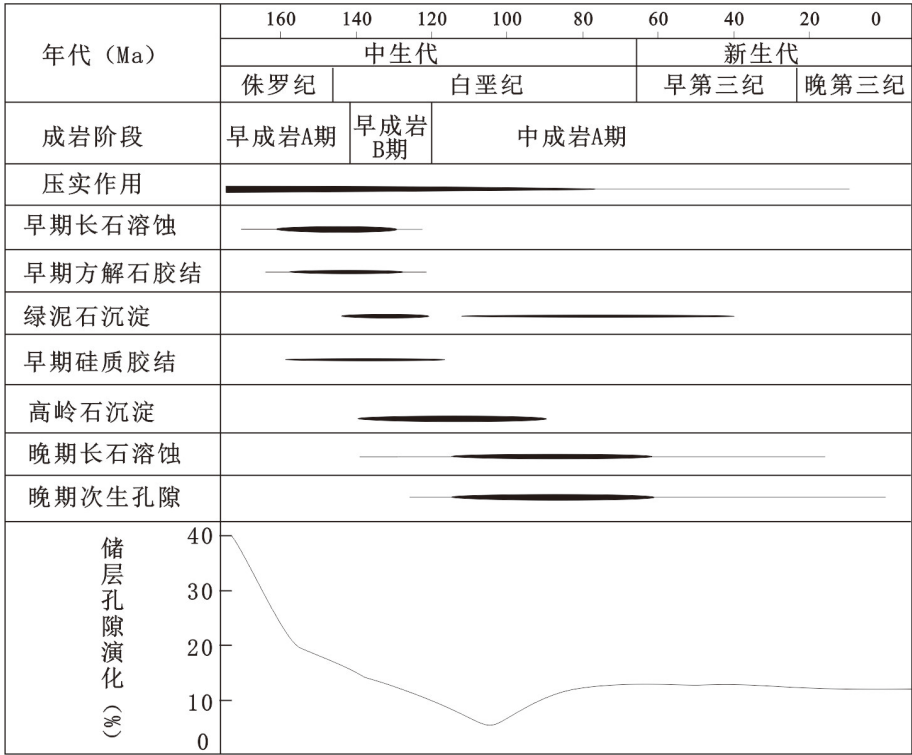


Figure 3. Diagenetic sequence and porosity evolution of the lower Shaximiao formation in Chongzhou area

图 3. 崇州下沙溪庙组储层成岩演化序列及孔隙演化

3.4. 成藏配置条件

烃源岩生排烃高峰期、油气藏成藏期以及储层致密化时期的配置关系决定油气藏的成藏过程。通过测量与油气包裹体共生的含烃盐水包裹体的均一温度，结合埋藏史和热史研究，便可确定油气藏的成藏期[11] [12] [13]。根据崇州地区沙溪庙组储层流体包裹体均一温度的统计可知，上、下沙溪庙组包裹体均一温度主峰值分别位于 110℃~120℃之间、110℃~130℃之间，结合埋藏史和热史分析(图 4)，可知上、下沙溪庙组主成藏期分别为 K₂ 中期~E₁ 早期和 K₂ 晚期~E₁ 早期，可以认为上、下沙溪庙组同期成藏。

结合烃源岩排烃高峰期、储层致密化史的研究可知，须五段烃源岩在 110 Ma 左右进入排烃高峰期，上、下沙溪庙组主成藏期均晚于 100 Ma，而上、下沙溪庙组储层致密化时间位于 120 Ma 左右，但沙溪庙组储层致密化之后，90 Ma 左右由于受到溶蚀作用的改善，孔隙度显著增大，故崇州上沙溪庙组气藏属于“先致密后成藏”，而下沙溪庙组气藏属于“先致密，边溶蚀、边成藏”。

4. 成藏主控因素及成藏模式

综合构造、烃源、储层、输导条件及成藏配置等方面的研究，通过对研究区典型井进行解剖可知，崇州沙溪庙组气藏存在两种成藏模式，即：游离相运移的先致密后成藏和水溶相运移的边溶蚀边成藏。

4.1. 游离相运移的先致密后成藏

此类成藏模式具有以下特点：邻近烃源断层，砂岩与 F4 烃源断层配置关系好，烃源条件有利；储层致密，储层孔隙度一般小于 7%，天然气运以游离相运移为主；储层在成藏期前已致密化，后期次生孔隙不发育，导致天然气侧向运移距离近，天然气近烃源断层聚集。此类气藏主要分布在上沙溪庙组，成藏

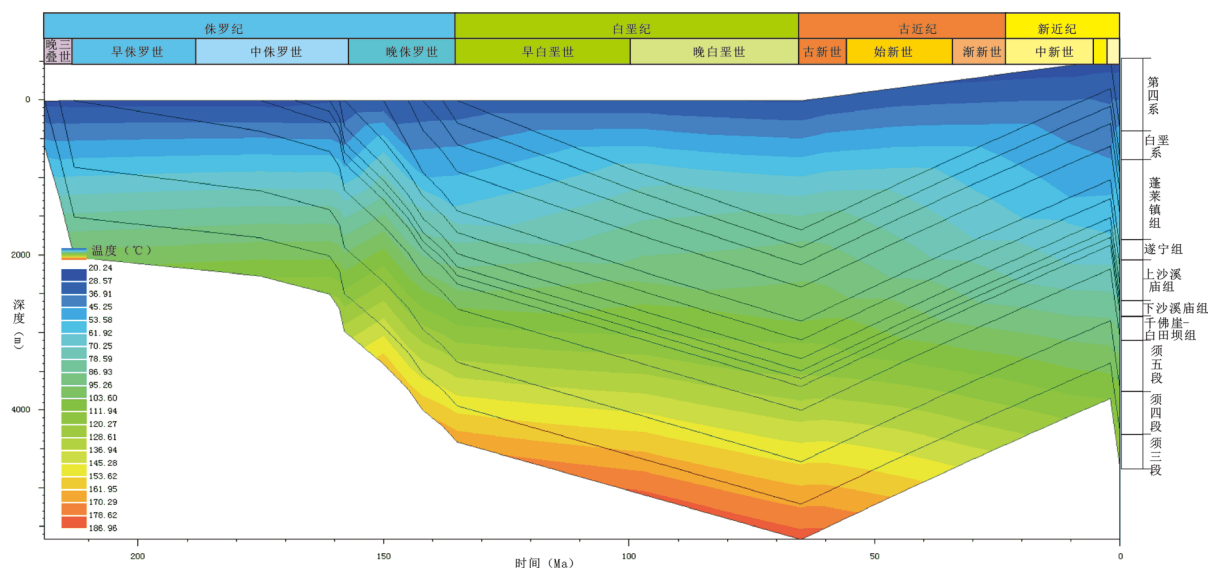


Figure 4. Burial history and thermal evolution of Chongzhou area
图 4. 崇州地区埋藏史及热演化史图

主控因素为砂体与烃源断层配置关系良好、发育相对优质储层，天然气呈近烃源断层聚集成藏的特征，以 A 井上沙溪庙组为代表(图 5)。A 井位于温江背斜南翼，距离 F4 烃源断层较近(5 km)，砂体与烃源断层配置关系良好。A 井所处的上沙溪庙组河道砂体物性差，孔隙度均值 6.8%，但 A 井局部发育孔隙度大于 10%的相对优质储层，天然气在相对优质储层中聚集成藏，该井测试获 1.5 万方/天的工业气流。

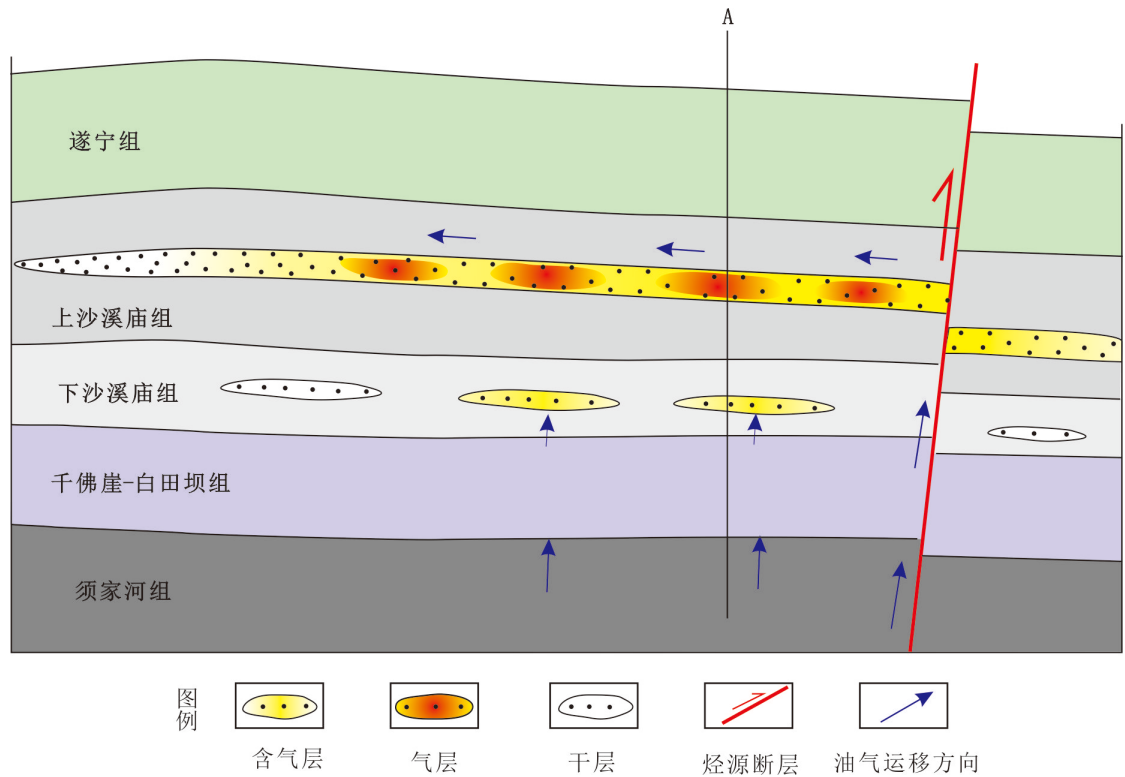


Figure 5. Gas reservoir profile of the upper Shaximiao formation of A well
图 5. A 井上沙溪庙组气藏剖面图

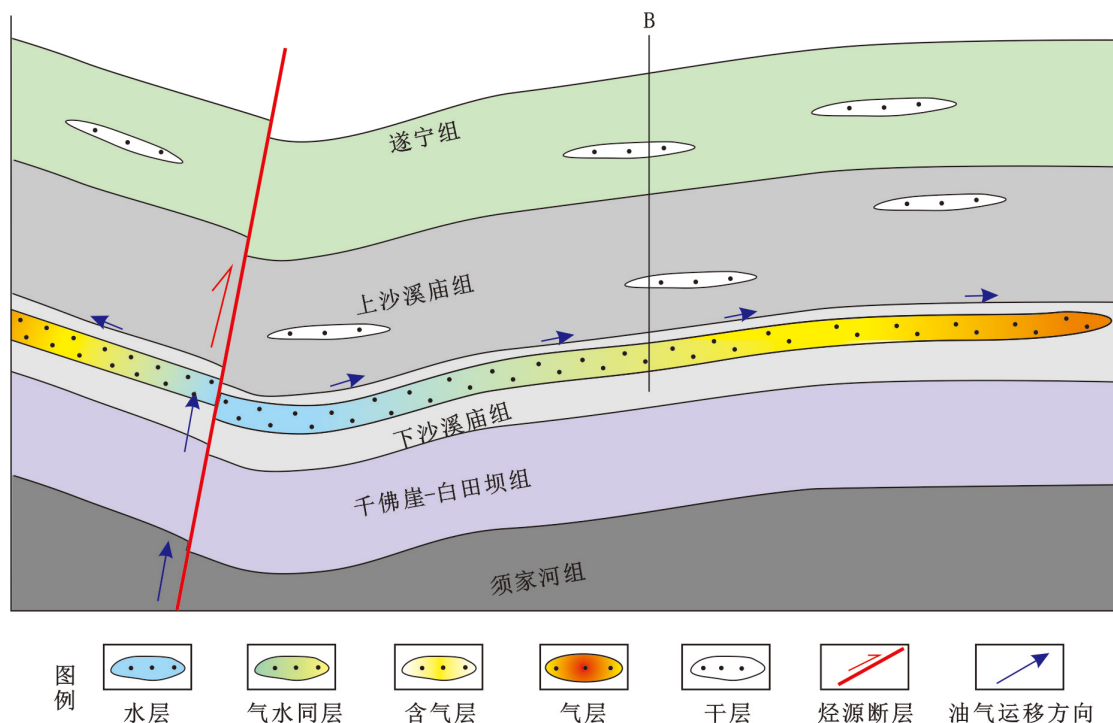


Figure 6. Gas reservoir profile of the lower Shaximiao formation of B well

图 6. B 井下沙溪庙组气藏剖面图

4.2. 水溶相运移的边溶蚀边成藏

此类成藏模式具有以下特点：砂岩与 F5 烃源断层配置关系良好，储层物性好，储层孔隙度一般大于 10%，天然气以水溶相运移为主；储层在成藏期前已致密化，但后期溶蚀孔的发育极大改善储层品质，天然气侧向运移距离近较远，此类气藏主要分布在下沙溪庙组。由于天然气以水溶相运移为主，构造位置对水溶气的后期脱溶至关重要，故此类气藏的成藏主控因素为砂体与烃源断层配置关系良好以及位于构造高部位，天然气可远离烃源断层聚集成藏，以 B 井下沙溪庙组为代表(图 6)。B 井位于温江背斜北部斜坡带，距离 F5 烃源断层较远(18 km)，砂体与烃源断层配置关系较好。B 井所处的下沙溪庙组河道砂体物性好，以岩屑长石砂岩为主，孔隙度 12.5%~19.13%，储集空间以粒间溶蚀扩大孔为主。碳酸盐胶结物碳同位素资料显示，下沙溪庙组天然气以水溶相运移为主，由于所处构造位置较高，对水溶相天然气的后期脱溶有利[7][14][15]，天然气聚集在构造高部位成藏，该井测试获 1.2 万方/天的工业气流。

5. 结论

- 1) 崇州地区沙溪庙组构造、烃源、储层条件有利，上沙溪庙组天然气以游离相运移为主，下沙溪庙组天然气以水溶相运移为主；断至下伏烃源层的烃源断层以及与烃源断层相接的砂岩输导层为天然气垂向、侧向运移的主要通道。
- 2) 崇州地区上沙溪庙组属于游离相运移的先致密后成藏，天然气聚集成藏主要受砂体与烃源断层配置关系和相对优质储层发育程度控制，天然气呈邻近烃源断层聚集成藏的特征；下沙溪庙组属于水溶相运移的边溶蚀边成藏，天然气聚集成藏主要受砂体与烃源断层配置关系和构造位置控制，天然气可远离烃源断层聚集成藏。
- 3) 根据崇州地区上、下沙溪庙组成藏主控因素及成藏模式，结合构造解释、储层预测成果，落实上、

下沙溪庙组圈闭资源量约 440 亿方, 对研究区乃至川西坳陷沙溪庙组次生气藏下步勘探具有重要的指导意义。

基金项目

国家科技重大专项“四川盆地碎屑岩层系油气富集规律与勘探评价”(2016ZX05002-004)。

参考文献

- [1] 杨克明, 朱宏权, 叶军, 等. 川西致密砂岩气藏地质特征[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 154-325.
- [2] 杨映涛, 李强, 姜镭. 成都凹陷沙溪庙组气藏富集规律研究[R]. 成都: 中石化西南分公司勘探开发研究院, 2016.
- [3] 谢刚平, 朱宏权, 叶素娟, 等. 四川盆地叠覆型致密砂岩气区地质特征与评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 110-116.
- [4] 祝金利, 邹越, 陈冬霞. 川西坳陷中段中、浅层天然气来源与碳同位素地球化学特征[J]. 岩性油气藏, 2011, 23(6): 18-22.
- [5] 蔡开平, 廖仕孟. 川西地区侏罗系气藏气源研究[J]. 天然气工业, 2000, 20(1): 36-41.
- [6] 沈忠民, 张勇, 刘四兵, 等. 川西坳陷中段原、次生气藏天然气特征及运移机制探讨[J]. 矿物岩石, 2011, 31(1): 83-88.
- [7] 李明诚. 石油与天然气运移[M]. 北京: 石油工业出版社, 2012: 121-189.
- [8] 叶素娟, 朱宏权, 李嵘, 等. 天然气运移有机-无机地球化学示踪指标——以四川盆地川西坳陷侏罗系气藏为例[J]. 石油勘探与开发, 2017, 44(4): 549-560.
- [9] Hudson, J.D. (1977) Stable Isotopes Limestone Lithification. *Journal of Geological Society*, **133**, 637-660.
<https://doi.org/10.1144/gsjgs.133.6.0637>
- [10] Suess, E. and Whiticar, M.J. (1989) Methane-Derived CO₂ in Pore Fluids Expelled from the Oregon Subduction Zone. *Palaeogeography*, **71**, 119-136. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(89\)90033-3](https://doi.org/10.1016/0031-0182(89)90033-3)
- [11] 刘学珍, 杨迎春, 周翔. 鄂尔多斯盆地代家坪地区延长组原油成因及成藏期次[J]. 新疆石油地质, 2019, 40(4): 414-421.
- [12] 郝鹏, 藏春艳, 贺银军, 等. 利用流体历史分析技术研究渤海海域黄河口凹陷北部陡坡带油气成藏过程[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(18): 164-170.
- [13] 卢双舫, 谷美维, 张飞飞, 等. 徐家围子断陷沙河子组致密砂砾岩气藏的成藏期次及类型划分[J]. 天然气工业, 2017, 37(6): 12-20.
- [14] 杨映涛, 李琪, 张世华, 等. 水溶气脱溶的关键时期研究——以成都凹陷沙溪庙组为例[J]. 岩性油气藏, 2015, 27(3): 65-70.
- [15] 秦胜飞, 李金珊, 李伟, 等. 川中地区须家河组水溶气形成及脱气成藏有利地质条件分析[J]. 天然气地球科学, 2018, 29(8): 1152-1159.