

文章编号: 1001-6112(2008)05-0494-05

# 高演化海相碳酸盐岩层系古温标的直接指标

——包裹体均一温度

秦建中, 饶丹, 蒋宏

(中国石油化工股份有限公司 石油勘探开发研究院 无锡石油地质研究所, 江苏 无锡 214151)

**摘要:**对川东北地区多口钻井岩心样品包裹体均一温度、盐度、密度等的系统分析发现,该地区具有 3 期烃类流体活动的迹象。包裹体均一温度与盐度、密度具有较好的相关性,在古今地温梯度变化不大的情况下,可以利用实测包裹体均一温度与古地温梯度推算当时的最大埋深或剥蚀厚度,恢复其热演化历史。储层最高包裹体均一温度与镜质体反射率、实测地温、伊利石结晶度等多项指标均具有较好的相关性,是现今开展海相高演化地区热史恢复的一项直接、有效的指标。

**关键词:**包裹体均一温度;热演化指标;剥蚀厚度;热史恢复;川东北地区

中图分类号: TE122

文献标识码: A

## DIRECT INDEX OF PALEOTEMPERATURE OF HIGH MATURE MARINE FACIES CARBONATE SEQUENCES —HOMOGENIZATION TEMPERATURE OF FLUID INCLUSIONS

Qin Jianzhong, Rao Dan, Jiang Hong

(Wuxi Research Institute of Petroleum Geology, Research Institute of Petroleum Exploration and Production, SINOPEC, Wuxi, Jiangsu 214151, China)

**Abstract:** Based on analyses of homogenization temperature, salinity and density of fluid inclusions in core samples from wells in the northeast of Sichuan Basin, there are 3 stages of hydrocarbon fluid activities in the region. Homogenization temperature, salinity and density of fluid inclusions are closely related. When ancient and present geothermal gradient changes are small, measured fluid inclusion homogenization temperature and palaeogeothermal gradient can be used to calculate the maximum burial depth or corrosional thickness, so as to restore thermal evolution history. Homogenization temperature of fluid inclusion,  $R_o$ , measured strata temperature and illite crystallinity are also closely related. They are direct and effective index used in thermal evolution history restoration in high mature marine facies regions.

**Key words:** homogenization temperature of fluid inclusions; thermal evolution index; corrosional thickness; thermal evolution history restoration; the northeast of Sichuan Basin

目前单一方法在应用于叠合盆地高演化海相碳酸盐岩地区热演化历史恢复时,均存在着不同程度的缺陷<sup>[1]</sup>。磷灰石裂变径迹和镜质体反射率是目前最常用的 2 种恢复沉积盆地热史的古温标<sup>[2~4]</sup>,但在下古生界海相层系中由于缺乏高等植物而无镜质体组分<sup>[5]</sup>,磷灰石在碳酸盐岩中也相对缺乏,使得目前常用的古温标方法无法在下古生界

海相层系中运用,必须探索新的古地温恢复方法来研究我国海相层系热历史。研究表明,针对高演化海相碳酸盐岩地层所经受的古温度问题,只有多种古温标并用、多种方法综合运用,才能精确恢复有机质的热演化史<sup>[6,7]</sup>,而岩石最高包裹体均一温度不失为高演化海相碳酸盐岩层系的一种有效、直接的古温标。

收稿日期: 2008-05-14; 修订日期: 2008-07-31。

作者简介: 秦建中(1957-),男,博士,教授级高级工程师,主要从事油气地质和地球化学研究。E-mail: qjz@mail.wuxisuo.com。

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2005CB422102)。

笔者主要针对四川盆地东部普光2井、普光5井、河坝1井等钻井岩心样品包裹体均一温度、盐度、密度等进行了系统测定,三者之间具有良好的对应关系。

## 1 包裹体均一温度与盐度、密度的关系

流体包裹体是岩石中矿物的晶体缺陷、空穴、孔隙、裂隙等捕获周围流体介质(液体、气体或熔体)形成的细小显微级的包裹物。流体包裹体特别是烃类包裹体,是油气生成、运移、聚集过程中被捕获在自生矿物、胶结物、矿物次生加大边以及愈合裂隙中的流体。它保存了流体被捕获时期的组成、性质和物理化学参数等油气藏形成的多种信息。通过测定包裹体相变参数(均一温度、冰点等)和成分含量(油、气、水等组分),可以计算其捕获时的热力学参数(温度、压力、流体密度、相态特征)和其他物理化学参数。

### 1.1 普光2井

针对普光气田普光2井飞仙关组( $T_1f$ )储层中的包裹体进行分析,据其赋存产状、均一温度、盐度、密度等可划分为3期:第一期主要是充填在白云岩重结晶后晶间溶洞的亮晶方解石中的流体包裹体,其盐度平均高达13.03%(图1a),密度平均为1.04 g/cm<sup>3</sup>(图1b),盐水包裹体均一温度分布在96~130℃之间,主峰温度在106~116℃之间

(图1c,d);第二期主要是产于方解石脉及溶蚀充填方解石中的包裹体,其盐度为5.32%~11.22%,平均只有8.18%(图1a),密度平均为0.98 g/cm<sup>3</sup>(图1b),盐水包裹体均一温度分布在139~161℃之间,主峰温度在146~156℃之间(图1c,d);第三期主要是产于溶洞石英晶体及方解石脉中的包裹体,其盐度平均为11.37%(图1a),密度平均为0.966 g/cm<sup>3</sup>(图1b),盐水包裹体均一温度分布在174~216℃之间,主峰温度在180~195℃之间(图1c,d),多呈长椭圆形、长方形和不规则形态分布,与前人研究成果相吻合<sup>[8,9]</sup>。

从普光2井 $T_1f$ 储层中3期包裹体来看,其产状主要赋存于亮晶方解石、方解石脉和溶洞石英晶体之中。亮晶方解石中的包裹体一般形成较早,均一温度低,气液比多小于10%,盐度高,密度大,与燕山运动早期( $J_2$ 末)和P及O-S<sub>1</sub>优质烃源岩大量生成轻质油气的温度及运移成藏时间相对应。溶洞石英晶体及方解石脉中的包裹体形成较晚,均一温度高,气液比多在15%~20%之间,盐度及密度低,与燕山运动晚期( $K_2$ 末)和油裂解气及P烃源岩大量生气的温度及运移成藏时间相对应。 $T_1f$ 储层中3期包裹体均一温度由100℃左右到200℃左右,气液比由小于10%增加到20%左右,盐度及密度也逐渐变低,基本上是连续形成的,反映出流体充注的连续性。

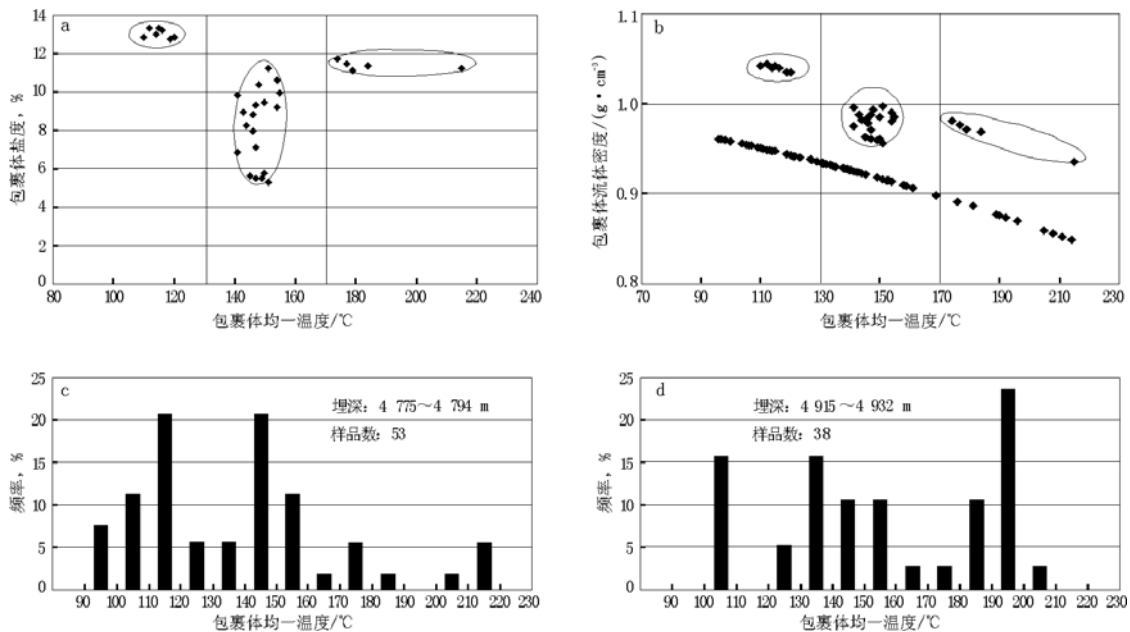


图1 四川盆地普光2井 $T_1f$ 流体包裹体均一温度、盐度及密度分布

Fig. 1 Homogenization temperature, salinity and density of fluid inclusions in Feixianguan Formation of Lower Triassic in Well Puguang 2 in the Sichuan Basin

### 1.2 河坝1井

从河坝1井  $T_1f$  储层流体包裹体均一温度与密度的关系来看,同样存在3期(图2):第一期均一温度与现今实测地温相当,约95~120 °C,密度为0.94~0.96 g/cm<sup>3</sup>,包裹体发育在溶孔充填亮晶方解石和方解石脉中,可能是现今或  $J_2$  沉积末期形成的,正是大量形成低熟稠油或原油的时期,此时,印支运动使得地层整体抬升、剥蚀,由海相转化为陆相,也正是P和  $T_1$  碳酸盐岩储层流体运移、溶蚀(有机酸、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S等)、重结晶形成晶间孔等的时期,可形成古油藏;第二期包裹体均一温度约为125~145 °C,密度为0.92~0.94 g/cm<sup>3</sup>,可能形成于  $J_3$  沉积末期,正是原油或轻质油气形成的高峰阶段,燕山早期构造运动使得  $T_1$  浅滩相或滩礁相白云岩中的流体发生运移、溶蚀,发育构造缝等孔隙,更为重要的是,  $T_1f$  之上发育了嘉陵江组( $T_2j$ )和雷口坡组( $T_2l$ )的区域性石膏盖层,在  $T_1$  形成了古轻质油气藏;第三期最高实测包裹体均一温度约160~175 °C,密度为0.89~0.91 g/cm<sup>3</sup>,可能形成于  $K_1$  沉积末期,一方面使得  $T_1$  古油气藏裂解形成天然气(干气),另一方面芦苇沟组( $P_2l$ )及五峰组( $O_3w$ )—拉垆组( $S_1l$ )优质烃源岩干酪根及分散在储层或烃源岩中的可溶有机质也可大量热裂解形成天然气。

## 2 包裹体均一温度、 $R_o$ 与实测地温、埋深的关系

### 2.1 普光气田

普光2井、普光5井等储层实测包裹体均一温度随埋藏深度的变化趋势基本上分期次呈直线分布(图3)。第一期古地温与现今地温基本相当,地温梯度在2.03 °C/hm左右。到第三期( $K_2$ )古地温梯度在2.27 °C/hm左右,略有增加。从地温梯度来看,由  $J_2$  末到现今变化范围不大,在2.0~2.3 °C/hm之间。因此,可以利用普光2井  $T_1f$  二段储层实测包裹体均一温度与古地温梯度来推算当时的最大埋深或剥蚀厚度:晚白垩世时,  $T_1f$  最大埋藏深度约为8000 m,剥蚀厚度约为3100 m;晚侏罗世末时,  $T_1f$  最大埋藏深度约为6500 m,剥蚀厚度约1600 m;中侏罗世末时,  $T_1f$  最大埋藏深度约为4150 m,与残留厚度4180 m相当。

### 2.2 河坝1井

利用实测  $R_o$ 、包裹体均一温度与实测地温,结合残留地层厚度和构造图,可估算河坝1井的剥蚀厚度。

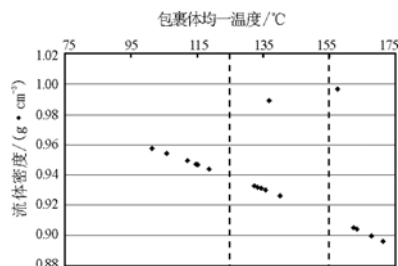


图2 四川盆地河坝1井流体包裹体均一温度与密度的关系  
Fig. 2 Relation between fluid inclusion homogenization temperature and density in Well Heba 1 in the Sichuan Basin

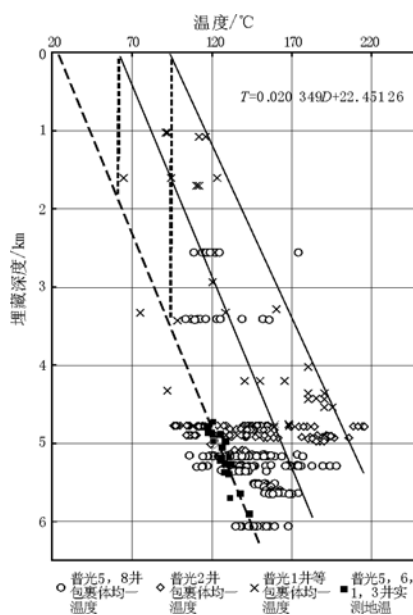


图3 四川盆地普光气田各层包裹体均一温度、实测地温与埋藏深度的关系

Fig. 3 Relation between fluid inclusion homogenization temperature, measured strata temperature and burial depth in the Puguang Gas Field, the Sichuan Basin

实测  $R_o$  随埋藏深度增加呈半对数直线变化的方程为:  $D = 3183.3 \ln(R_o) + 403.82$ , 式中  $D$  为埋藏深度, m。当接近地表、 $R_o$  值约为0.20%~0.25%时,深度约为-4500~-4000 m(图4,5),推算该井最大剥蚀厚度约为4000~4500 m(该井未有火成岩活动)。这与第三期最高实测包裹体均一温度推算的最大埋藏深度约为3800 m基本相当,考虑到实测包裹体均一温度比捕获时形成温度略低,4000 m应相对可靠。

## 3 多种热演化指标的关系

温度是控制有机质热演化或原油裂解气的决定性因素,沉积盆地的古今地温或地温梯度是埋藏深度或有机质成熟度的函数,一般来说,古(今)埋藏深度越大,古(今)地温越高,有机质成熟度越高。

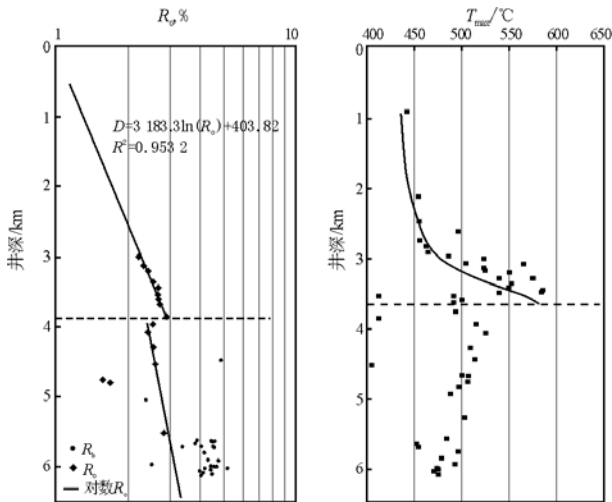


图 4 四川盆地河坝 1 井有机质热演化剖面  
Fig. 4 Profiles of carbonate thermal evolution in Well Heba 1 in the Sichuan Basin

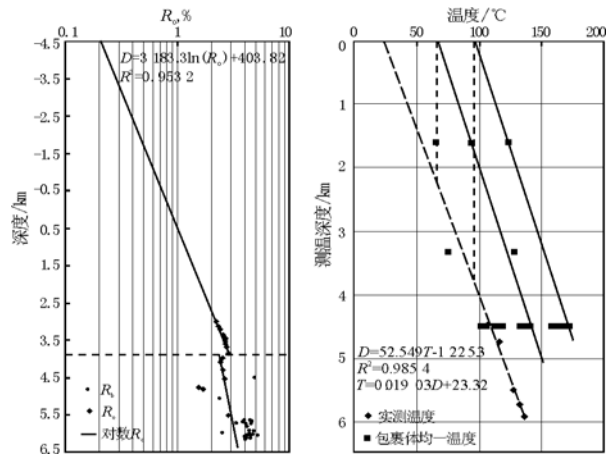


图 5 四川盆地河坝 1 井  $R_o$ 、实测地温和包裹体均一温度与埋藏深度的关系  
Fig. 5 Relation between  $R_o$ , measured strata temperature, fluid inclusion homogenization temperature and burial depth in Well Heba 1 in the Sichuan Basin

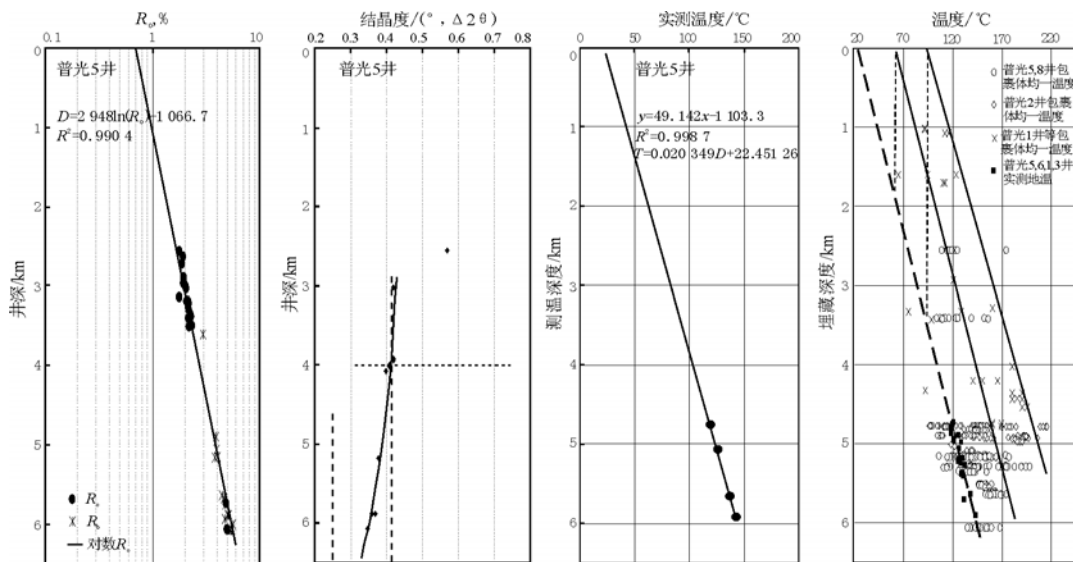


图 6 四川盆地普光气田  $R_o$ 、伊利石结晶度、实测地温、包裹体均一温度随埋藏深度变化热演化剖面  
Fig. 6 Relation between  $R_o$ , illite crystallinity degree, measured strata temperature, fluid inclusion homogenization temperature and burial depth in the Puguang Gas Field, the Sichuan Basin

从普光 5 井  $R_o$ 、伊利石结晶度<sup>[10]</sup>、实测地温和包裹体均一温度随埋藏深度的热演化剖面可知(图 6), 普光地区  $S_1$ 、 $P_2$  及  $T_1$  等烃源岩在现今埋藏深度达到 1 800 m 时,  $R_o$  约为 1.3%, 地层实测温度 60 °C, 最高包裹体均一温度为 135 °C 时, 进入凝析油湿气阶段; 当现今埋藏深度达到 3 150 m 时,  $R_o$  约为 2.0%, 地层实测温度 87 °C, 最高包裹体均一温度为 165 °C 时, 进入干气甲烷生成阶段; 当现今埋藏深度达到 4 000 m 时,  $R_o$  约为 3.0%, 伊利石结晶度为 0.42°( $\Delta 2\theta$ ), 地层实测温度 105 °C, 最高包裹体均一温度为 175 °C 时, 可能进入干气阶段。

从以上多种热演化指标反映的地质热历史来看, 储层最高包裹体均一温度与  $R_o$ 、实测地温、伊利石结晶度等多项指标均具有较好的相关性, 是现今开展海相高演化地区热史恢复的一项直接、有效指标, 结合相关地质背景及其他热演化指标, 可以恢复其热演化历史, 计算剥蚀量, 再造油气演化、充注历史。

### 4 结论

1) 包裹体常规分析显示川东北地区具有 3 期烃类流体活动迹象, 包裹体均一温度与盐度、密度

具有较好的相关性,流体活动晚期至现今具有较好的保存条件。

2)在古今地温梯度变化不大的情况下,可以利用实测包裹体均一温度与古地温梯度推算当时的最大埋深或剥蚀厚度,恢复其热演化历史。

3)储层最高包裹体均一温度与  $R_o$ 、实测地温、泥岩声波时差、伊利石结晶度等多项指标均具有较好的相关性,是现今开展海相高演化地区热史恢复的一项直接、有效指标。

参考文献:

- 1 邱楠生,李慧莉,金之钧. 沉积盆地下古生界碳酸盐岩地区热历史恢复方法探索[J]. 地学前缘,2005,12(4):561~567
- 2 常 远,刘 锐,杨 嘉. 磷灰石裂变径迹技术与地学应用综述[J]. 上海地质,2004,(1):47~53

- 3 刘祖发,肖贤明,傅家谟等. 海相镜质体反射率用作早古生代烃源岩成熟度指标研究[J]. 地球化学,1999,28(6):580~588
- 4 王 玮,周祖翼. 镜质体反射率剖面反演中的不确定性分析[J]. 石油实验地质,2008,30(3):292~296
- 5 王飞宇,何 萍,程顶胜等. 镜状体反射率可作为下古生界高过成熟烃源岩成熟度标尺[J]. 天然气工业,1996,16(4):14~18
- 6 肖贤明,吴治君,刘德汉等. 早古生代海相烃源岩成熟度的有机岩石学评价方法[J]. 沉积学报,1995,13(2):112~119
- 7 刘 进. 流体包裹体在盆地热史研究中的应用与问题讨论[J]. 河南石油,2006,20(4):13~17
- 8 蔡立国,饶 丹,潘文蕾等. 川东北地区普光气田成藏模式研究[J]. 石油实验地质,2005,27(5):462~467
- 9 马永生,蔡勋育,郭彤楼. 四川盆地普光大型气田油气充注与富集成藏的主控因素[J]. 科学通报,2007,52(1):149~155
- 10 秦建中,付小东,腾格尔. 川东北宣汉—达县地区三叠—志留系海相优质烃源层评价[J]. 石油实验地质,2008,30(4):367~374

(编辑 韩 或)

(上接第 493 页)

参考文献:

- 1 Curiale J A. Origin of solid bitumens, with emphasis on biological marker results[J]. Organic Geochemistry, 1986,10:559~580
- 2 George S C, Herbert Volk, Manzur Ahmed, et al. Biomarker evidence for two sources for solid bitumens in the Subu wells: Implications for the petroleum prospectivity of East Papuan Basin[J]. Organic Geochemistry, 2007,38:609~642
- 3 秦建中,李志明,刘宝泉等. 海相优质烃源岩形成重质油与固体沥青潜力分析[J]. 石油实验地质,2007,29(3):280~285
- 4 Hwang R S, Teerman S, Carlson R. Geochemical comparison of reservoir solid bitumens with diverse origins[J]. Organic Geochemistry, 1998,29:505~518
- 5 王一刚,刘志坚,文应初. 川东石炭系储层有机包裹体、储层沥青与烃类运聚关系[J]. 沉积学报,1996,14(4):77~83
- 6 李艳霞,钟宁宁. 川东石炭系气藏中固体沥青形成机理探讨[J]. 石油实验地质,2007,29(4):402~404
- 7 胡守志,付晓文,王廷栋等. 储层中的沥青沉淀带及其对油气勘探的意义[J]. 天然气地球科学,2007,18(1):99~103
- 8 谢增业. 川东北飞仙关组鲕滩储层沥青与天然气成藏过程[J]. 天然气工业,2004,24(12):17~19
- 9 杨家静. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起震旦系油气藏形成演化研究[D]. [学位论文]:成都:西南石油学院,2002
- 10 徐世琦. 加里东古隆起震旦—寒武系成藏条件[J]. 天然气工业,1999,19(6):7~10
- 11 谢增业,田世澄,魏国齐等. 川东北飞仙关组储层沥青与古油藏研究[J]. 天然气地球科学,2005,16(3):283~288

- 12 张 林,魏国齐,吴世祥等. 四川盆地震旦系—下古生界沥青产烃潜力及分布特征[J]. 石油实验地质,2005,27(3):276~280
- 13 徐国盛,袁海峰,马永生等. 川中—川东南地区震旦系—下古生界沥青来源及成烃演化[J]. 地质学报,2007,81(8):1143~1152
- 14 陈文正. 再论四川盆地威远震旦系气藏的气源[J]. 天然气工业,1992,12(6):28~32
- 15 戴金星,王廷栋,戴鸿鸣等. 中国碳酸盐岩大型气田的气源[J]. 海相油气地质,2000,5(1~2):143~144
- 16 戴金星. 威远气田成藏期及气源[J]. 石油实验地质,2003,25(5):473~480
- 17 黄籍中,陈盛吉. 震旦系气藏形成的烃源地球化学条件分析[J]. 天然气地球科学,1993,(4):16~20
- 18 王顺玉,戴鸿鸣,王海清等. 四川盆地海相碳酸盐岩大型气田天然气地球化学特征与气源[J]. 天然气地球科学,2000,11(2):10~17
- 19 尹长河,王廷栋,王顺玉等. 威远震旦系天然气与油气生运聚[J]. 地质地球化学,2000,28(1):78~82
- 20 尹长河,王廷栋,王顺玉等. 威远—资阳震旦系干酪根与油裂解气的鉴别[J]. 沉积学报,2001,19(1):156~160
- 21 王顺玉,李兴甫. 威远和资阳震旦系天然气地球化学特征与含气系统研究[J]. 天然气地球科学,1999,10(3-4):63~69
- 22 孙 玮,刘树根,马永生等. 四川盆地威远—资阳地区震旦系油裂解气判定及成藏过程定量模拟[J]. 地质学报,2007,81(8):1153~1159
- 23 张 林,魏国齐,李熙喆等. 四川盆地震旦系—下古生界高过成熟烃源岩演化史分析[J]. 天然气地球科学,2007,18(5):726~731

(编辑 徐文明)