

# 川南地区热史及下寒武统筇竹寺组页岩热演化特征

江 强<sup>1,2</sup>, 朱传庆<sup>1,2</sup>, 邱楠生<sup>1,2</sup>, 曹环宇<sup>1,2</sup>

(1. 中国石油大学(北京)油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249;

2. 中国石油大学(北京)盆地与油藏研究中心, 北京 102249)

**摘要:**川南地区古生界海相页岩是我国页岩气勘探的主要目标层系之一。利用镜质体反射率古温标恢复了川南地区5口典型钻井的热史,在此基础上模拟了下寒武统筇竹寺组页岩的热演化过程。结果表明,川南地区在古生代热流值较低,二叠纪热流开始增大,川西南地区热流峰值约为 $110\text{mW}/\text{m}^2$ ,川东南地区为 $70\sim 90\text{mW}/\text{m}^2$ ,此后热流值快速降低,最终保持在 $55\sim 65\text{mW}/\text{m}^2$ 并持续至今。川南不同地区的筇竹寺组页岩由于热史和埋藏史的不同,使得烃源岩热演化过程存在差异。川东南地区筇竹寺组页岩在志留纪开始成熟,二叠纪快速演化并达到过成熟阶段。川西南地区筇竹寺组在石炭纪开始成熟,二叠纪在高热流作用下迅速成熟, $R_o$ 值达到2.5%,其中乐山—龙女寺古隆起地区的筇竹寺组在加里东期和二叠纪埋深相对较浅,烃源岩在古生代处于未成熟阶段,中一晚二叠世开始成熟,三叠纪末期进入高成熟阶段,侏罗纪—白垩纪在深埋增温作用下进入过成熟阶段。

**关键词:**热演化;页岩气;热史;筇竹寺组;川南地区

**中图分类号:**TE122.1

**文献标志码:**A

**文章编号:**1672-1926(2015)08-1563-08

**引用格式:**Jiang Qiang, Zhu Chuanqing, Qiu Nansheng, *et al.* Paleo-heat flow and thermal evolution of the Lower Cambrian Qiongzhusi shale in the southern Sichuan Basin, SW China[J]. Natural Gas Geoscience, 2015, 26(8): 1563-1570. [江强, 朱传庆, 邱楠生, 等. 川南地区热史及下寒武统筇竹寺组页岩热演化特征[J]. 天然气地球科学, 2015, 26(8): 1563-1570.]

## 0 引言

页岩气、页岩油等非常规油气资源逐渐成为现阶段油气勘探的热点和重点领域。四川盆地古生界发育有多套海相页岩层系,目前已在四川威远、长宁和重庆涪陵等地区的下寒武统筇竹寺组和下志留统龙马溪组等页岩层系中取得了页岩气勘探的重大突破<sup>[1-2]</sup>。研究表明,川南地区下寒武统筇竹寺组黑色页岩分布广泛、厚度大、有机质含量高<sup>[3-5]</sup>,威远、长宁等地区的筇竹寺组页岩孔隙度、含气量和脆性矿物含量较高,埋藏适中<sup>[6-8]</sup>,是四川盆地页岩气勘探开发的核心区。

盆地的热史和烃源岩热演化是油气资源勘探和评价的重要方面,其中热史决定了烃源岩的生烃演化过程,对油气生成、保存和液态油裂解成气等过程有重要的影响<sup>[9]</sup>。前人<sup>[10-20]</sup>已对四川盆地现今热状况和热史进行过大量的研究,根据钻孔测温和岩石热物性等数据得到的现今平均大地热流值为 $53.2\text{mW}/\text{m}^2$ <sup>[10]</sup>,具有克拉通盆地中低热流特征。通过地球动力学模型<sup>[11-14]</sup>、热史波动模型<sup>[15]</sup>以及镜质体反射率、磷灰石和锆石(U—Th)/He等古温标<sup>[16-20]</sup>等方法,前人普遍认为,四川盆地在古生代具有较低的热流值,在二叠纪—三叠纪有一个热流快

收稿日期:2015-04-28;修回日期:2015-05-22.

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“973”)项目(编号:2012CB214703);国家自然科学基金项目(编号:41125010);中国石油科技创新基金项目(编号:2013D-5006-0102)联合资助.

作者简介:江强(1992-),男,湖北麻城人,硕士研究生,主要从事含油气盆地分析与资源评价研究. E-mail:jiangqiang2016@126.com.

通讯作者:邱楠生(1968-),男,福建连城人,教授,博士生导师,主要从事盆地构造—热演化和油气成藏机理研究及教学工作.

E-mail:qiunsh@cup.edu.cn.

速升高到最大值,然后快速下降的过程,此后热流逐渐降低至现今水平。而二叠纪出现高热流异常的现象被认为是由峨眉山玄武岩喷发事件造成<sup>[18]</sup>,并得到了数值模拟的证实<sup>[12]</sup>。

总体来看,以前的研究主要集中在四川盆地北部<sup>[15-16,19-20]</sup>或者盆地整体<sup>[10-14,18]</sup>的热状况,针对盆地南部的热史研究较少,对离峨眉山幔柱不同距离的川西南地区 and 川东南地区热史差异的研究比较缺乏。由此导致了人们对川南地区古生界页岩层系有机质热演化过程认识的不足,这制约了该地区海相页岩生气条件的评价和成藏条件的研究。

本文利用镜质体反射率( $R_o$ )古温标数据恢复了川南地区的热史,然后结合地层埋藏史的恢复结

果,模拟了该地区下寒武统筇竹寺组页岩有机质的热演化过程,为页岩气的成藏研究和资源评价提供了地热学的基础数据。

## 1 地质概况

四川盆地位于扬子板块西北侧,是在扬子克拉通基础上逐渐发展起来的一个叠合盆地。盆地的形成和发展主要经历了古生代—中生代早期的克拉通拗陷阶段以及晚三叠世—新生代晚期的前陆盆地阶段。川南地区包括川东高陡断褶带南部、川南低缓褶皱带和川西南低平褶皱带等构造单元<sup>[21]</sup>,处于加里东期乐山—龙女寺古隆起东南侧,包括印支期泸州古隆起的主体部分(图1)。

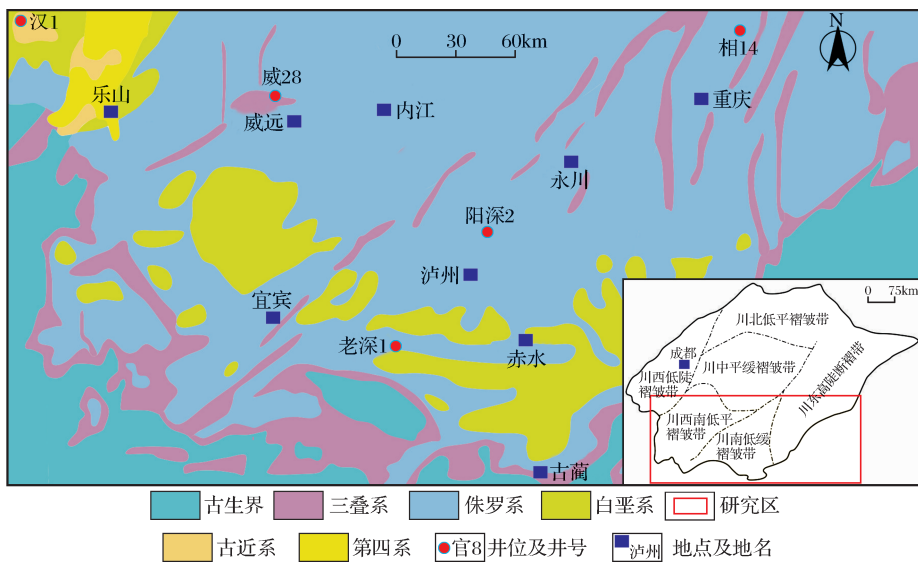


图1 川南地区地质简图与研究井位分布

Fig. 1 Geological setting and borehole locations in the southern Sichuan Basin

研究区的地层主要包括震旦纪—中三叠世期间沉积的海相地层和晚三叠世以后沉积的陆相碎屑岩。震旦纪到志留纪期间川南地区主要沉积的是滨浅海相的碎屑岩和碳酸盐岩,其中早寒武世期间,台地水体变浅,沉积了潮坪相和局限台地相的筇竹寺组泥页岩;早志留世期间的海退使得上扬子台地中的水下隆起出露水面,川南地区沉积环境是半封闭的滞留海盆,沉积物有龙马溪组的黑色炭质页岩。志留纪末期,加里东运动使得上扬子地区大部分抬升为陆,川南地区普遍缺失泥盆纪和石炭纪的地层。中晚石炭世海水西侵,该地区沉积了台地相的灰岩和白云岩。到了晚三叠世,上扬子台地大部分已上升为陆,川南地区结束了海相沉积,开始沉积河流相、湖泊相的砂岩、泥质粉砂岩和砾岩。目前,川南

地区地表主要出露的是三叠系、侏罗系和白垩系等中生代地层(图1)。

## 2 研究区热史恢复

### 2.1 原理和方法

用镜质体反射率等古温标进行模拟计算是目前沉积盆地古地温研究中最常用、精度较高的方法<sup>[22-24]</sup>。盆地内某一深度处的古地温是由古大地热流值、古埋深、岩石热导率、放射性生热率等热物性参数决定的,通过测试得到岩石热物性参数后,古地温就是古热流和古埋深的函数。模拟计算的具体步骤是:①恢复钻井的埋藏史,即通过文献调研利用前人研究成果或者模拟计算确定剥蚀厚度后,进行压实校正,结合现今残余厚度用回剥

法得到埋藏史;②将井剖面的地层分为若干构造层,从最上一构造层开始,对于每一个构造层,假定一个古热流路径和剥蚀量,利用 Easy%  $R_o$  模型<sup>[23]</sup> 计算相应的古温标值;③用计算得到的古温标值与实测的古温标值进行比较,通过反复修改热流值和剥蚀量,使计算的古温标值与实测值相吻合,最终得到该井的古热流演化路径。

## 2.2 模拟参数

模拟过程中用到的数据包括基础地质参数和古

温标数据。其中基础地质参数如现今地温梯度和大地热流、岩石热导率和放射性生热率等采用徐明等<sup>[10]</sup> 的数据,地层底界年龄参考了文献<sup>[21]</sup>,钻井分层和岩性等采用油田钻井的实测值,对于钻探深度不够、没有钻至下寒武统的钻井,参考了地震资料的分层数据和临近地区钻井的岩性资料。本文研究采用的古温标是镜质体反射率,共收集了多口油田钻井岩心测试的镜质体反射率数据,图 2 为川南地区 5 口典型钻井镜质体反射率—深度剖面图。

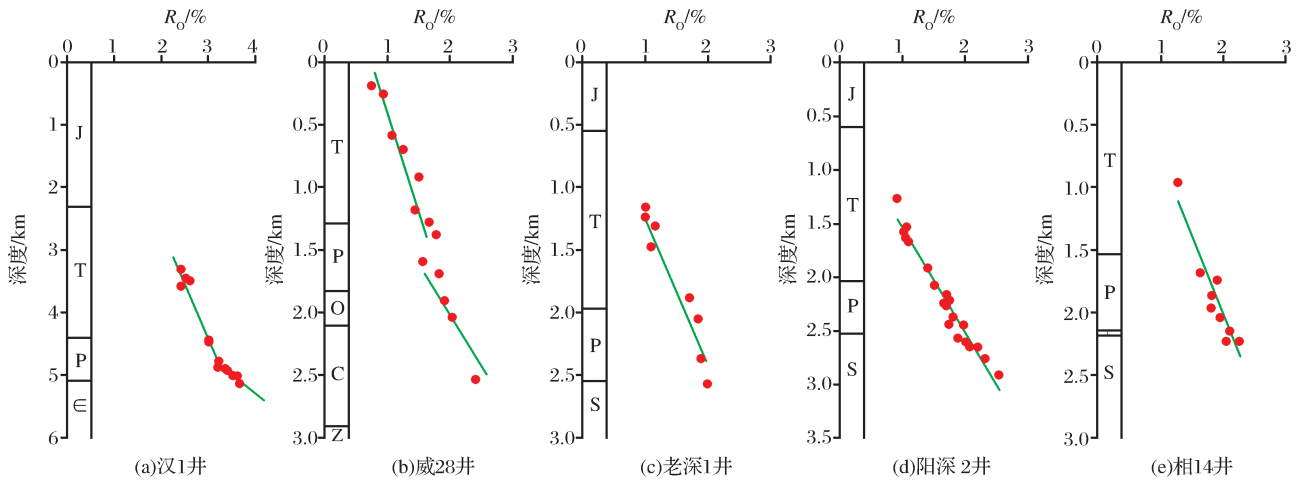


图 2 川南地区典型钻井镜质体反射率与深度的关系

Fig. 2 Vitrinite reflectance versus depth in typical wells in the southern Sichuan Basin

## 2.3 热史模拟结果

图 3 为汉 1 井热史恢复过程和结果。汉 1 井的镜质体反射率—深度剖面在中—上二叠统之间有一个明显的错断[图 3(a)],表明该井上二叠统之下的地层经历过较高的古地温,古地温梯度法计算结果表明该套地层所在的构造层曾经达到的最高古热流为  $114\text{mW/m}^2$ [图 3(b)]。图 3(c)是用古热流法模拟的汉 1 井的热流演化史,模拟过程中使计算得到的  $R_o$  值与实测的  $R_o$  值相拟合[图 3(d)]。热史恢复结果表明,汉 1 井所在地区二叠纪期间(约 260Ma)所达到的最高古热流为  $114\text{mW/m}^2$ ,晚二叠世以来,热流演化总体呈下降趋势,其中在晚二叠世—三叠纪热流下降较快,此后热流变化较为平缓,现今热流为  $55\sim 60\text{mW/m}^2$ 。

利用该方法恢复了川南地区 5 口典型钻井的热流演化史,这些钻井的热流史具有相似的演化规律(图 4):在二叠纪(260Ma 左右)出现一个热流高值,最高热流值为  $70\sim 110\text{mW/m}^2$ ,随后热流逐渐降低至现今的  $55\sim 65\text{mW/m}^2$ 。汉 1 井和威 28 井这 2 口位于川西南地区的钻井在二叠纪的最高古热流值达

$110\text{mW/m}^2$ ,而阳深 2 井、老深 1 井和相 14 井等位于川东南地区的钻井达到的最高古热流值为  $70\sim 90\text{mW/m}^2$ ,这说明川西南地区在二叠纪期间比川东南地区经历过更高的热历史。

镜质体反射率作为一种最高古地温计不能有效地重建最高古地温之前的热史,早期的热史信息被后期的热事件掩盖<sup>[24-25]</sup>,因此川南地区二叠纪之前的热史不能较好的重建。四川盆地在加里东期是扬子板块西缘的一个克拉通盆地,而克拉通型盆地的热状况较为稳定,热流值也比较低。何丽娟等<sup>[12-13]</sup> 利用地球动力学方法模拟的结果表明,四川盆地在二叠纪之前的热流值保持在  $50\sim 55\text{mW/m}^2$  之间。如果假定四川盆地古生代早期热流值为  $50\text{mW/m}^2$ ,并认为此后热流的变化是由新沉积地层的放射性生热作用引起,根据地层沉积速率和岩石的热物性参数(采用文献<sup>[10]</sup> 的数据)对热流值进行了估算。结果表明,川南地区古生代期间的热流值变化较小,保持在  $50\sim 55\text{mW/m}^2$  之间(图 4 中虚线部分),这与地球动力学模拟给出的结果一致。综合以上认识,得出了川南地区热流演化史。

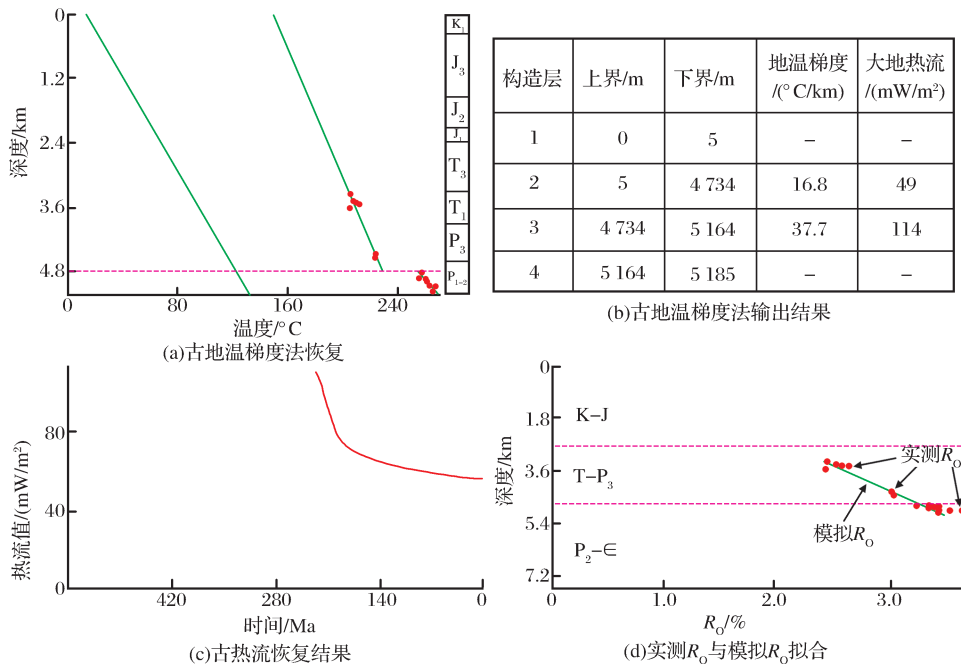


图 3 汉 1 井热史恢复结果  
Fig. 3 Thermal history reconstruction of well Han 1

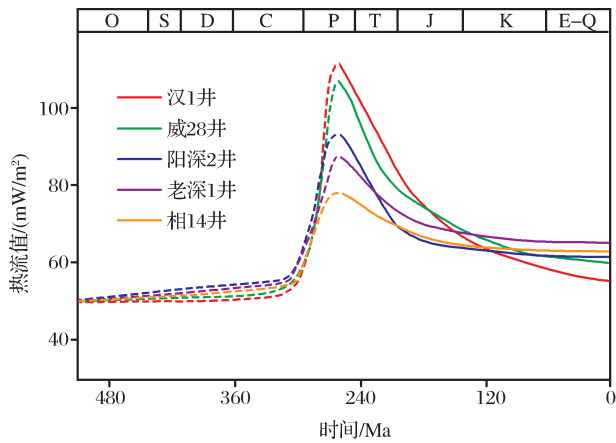


图 4 川南地区典型钻井热史恢复结果  
(虚线为推算的热流路径)  
Fig. 4 Thermal history of typical wells in the southern Sichuan Basin

### 3 页岩层系成熟度演化模拟

下寒武统筇竹寺组页岩在四川盆地全盆发育,其中在盆地南部厚度较大,川东南地区厚度达 450m,川西南资阳—威远地区厚度为 250~350m,长宁构造厚度达 650m<sup>[26-27]</sup>。川西南位于乐山—龙女寺古隆起之上的地区,由于加里东期的抬升剥蚀作用,筇竹寺组厚度相对较小,一般为数十米<sup>[27]</sup>。该套页岩主要形成于深水陆棚环境,有机质以 I 型为主,少量为 II<sub>1</sub>型,热演化程度较高,  $R_o$  值为 2%~4%<sup>[28-29]</sup>。有机

质含量高,  $TOC$  平均值为 2%~3%<sup>[27]</sup>。川南地区筇竹寺组现今埋深为 3 000~5 000m,其中川东南泸州地区埋深达 6 000m,川西南乐山一带埋深为 5 000m 左右、威远地区埋深小于 3 000m<sup>[28]</sup>。

在川南地区典型钻井热史和埋藏史恢复的基础上,利用镜质体反射率演化的动力学模型,模拟得到页岩层系的  $R_o$  演化过程。由于相 14 井、老深 1 井等钻井没有钻至下寒武统,因此本文选取了汉 1 井、威 28 井和阳深 2 井等 3 口钻遇下寒武统筇竹寺组页岩的深井,对筇竹寺组页岩的埋藏史进行了恢复(图 5),并结合热史的恢复结果模拟计算了下寒武统筇竹寺组页岩热演化过程(图 6)。

从模拟的 3 口典型钻井有机质成熟度史可以看出,汉 1 井筇竹寺组在中二叠世开始成熟,三叠纪处于成熟阶段,主要生成液态油,侏罗纪—早白垩世处于高成熟阶段,晚白垩世以后进入过成熟阶段;威 28 井筇竹寺组在石炭纪期间开始成熟,二叠世烃源岩快速演化,  $R_o$  值达到 2.5%,进入过成熟阶段;阳深 2 井筇竹寺组在志留纪开始成熟,二叠纪快速演化,进入过成熟阶段。

### 4 讨论

#### 4.1 川南不同地区热史的差异与峨眉山幔柱热效应

川西南地区汉 1 井和威 28 井的镜质体反射

率—深度剖面在中—上二叠统之间有一个明显的间断,界面之下的剖面斜率比界面之上要大。这说明中二叠统之下的地层比上部地层经历过更高的热历史。然而川东南地区的多口钻井没有出现这种现象,镜质体反射率—深度剖面多呈连续分布(图2)。热史反演结果也表明,川西南地区在二叠纪期间的古地表热流比川东南地区更高(图4)。

对于四川盆地二叠纪—三叠纪出现的异常高的热状况,前人已通过钻井的镜质体反射率<sup>[16-19]</sup>、磷灰石与锆石(U—Th)/He 年龄<sup>[20]</sup>等古温标的反演和地球动力学模型计算<sup>[11-12]</sup>等多种方法得出了相似的

结论,并推测峨眉山地幔柱的热效应是出现这种现象的原因<sup>[18]</sup>。峨眉山玄武岩主要分布于云南、四川和贵州3省境内<sup>[30]</sup>,峨眉山地幔柱作用的中心位于云南大理到四川米易一带,地幔柱的直径约为400km<sup>[31]</sup>。根据地幔柱作用导致的碳酸盐岩重力流、海底深切谷的充填等事件沉积作用的分布范围,认为地幔柱在发生岩浆底侵作用阶段的直径可达800~1000km<sup>[32]</sup>。显然,川东南的大部分地区和川西南地区都位于受影响的范围内,而且川西南地区比川东南地区离地幔柱更近,受到的影响也应该更大,这与模拟得到的热史结果是相符合的。

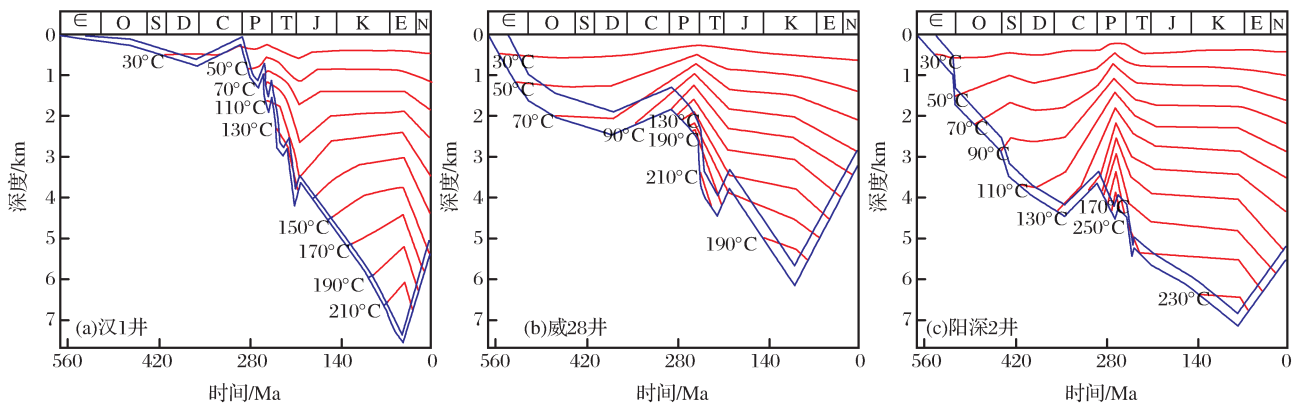


图5 川南地区典型钻井筇竹寺组地层温度和埋藏史

Fig. 5 Temperature and burial history of the Qiongzhusi shale of typical wells in the southern Sichuan Basin

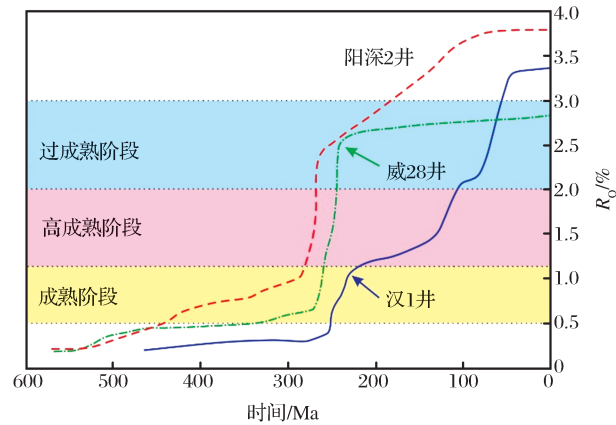


图6 川南地区典型钻井筇竹寺组页岩热演化  
Fig. 6 Thermal evolution of the Qiongzhusi shale of typical wells in the southern Sichuan Basin

4.2 川南不同地区筇竹寺组页岩热演化的差异

烃源岩在地质历史时期的成熟度演化受控于地层温度史,是地温梯度和埋藏深度的函数。川南不同地区由于热史和埋藏史的不同,导致下寒武统筇竹寺组页岩热演化过程也存在差异。

加里东期盆地的热状况较为稳定,地表热流值

比较低,此时川南地区筇竹寺组烃源岩热演化程度比较低,普遍处于未成熟阶段,只有川东南地区筇竹寺组埋深较大,烃源岩开始成熟。二叠纪期间,盆地出现了一次热流峰值,川南地区地表热流值最高达80~110mW/m<sup>2</sup>,在此期间筇竹寺组页岩热演化明显加快。川东南地区筇竹寺组埋深较大,烃源岩快速演化并在短时期内达到过成熟阶段。川西南地区、特别是位于乐山—龙女寺古隆起之上的地区,尽管热流值比川东南地区更大,但由于筇竹寺组埋深相对较浅,使得烃源岩热演化较川东南地区慢,在三叠纪期间处于成熟阶段,侏罗纪到白垩纪期间的深埋增温作用使烃源岩达到过成熟阶段。

川南不同地区筇竹寺组埋藏史的差异对烃源岩热演化过程有重要的影响。饶松等<sup>[33]</sup>根据震旦系一下古生界加里东期埋深的差异,将四川盆地的地层沉积样式分为浅埋—抬升—深埋—抬升型和半深埋—抬升—深埋—抬升型,其中前者在加里东期的埋深相对较小,主要分布在加里东期的古隆起上,烃源岩热演化模拟结果表明,筇竹寺组页岩在此期间处于未成熟阶段(如汉1井)。半深埋—抬升—深

埋一抬升型的地区,筇竹寺组烃源岩在加里东期已经成熟,开始进入生油阶段(如图6中阳深2井)。研究区西北缘处于乐山—龙女寺古隆起之上,志留纪末—石炭纪期间,上扬子地区抬升并遭受剥蚀,古隆起顶部剥蚀严重<sup>[34]</sup>,如汉1井下古生界残余厚度只有数十米,下寒武统与二叠系呈不整合接触,晚二叠世期间筇竹寺组埋深仅1000m左右,地层温度为90~100℃(图5)。而川西南地区古隆起之外的区域以及川东南地区在同时期的埋深分别达到3000m和4000m,地层温度分别为200℃和250℃(图5),因此烃源岩热演化过程更快,在数十个百万年内迅速进入过成熟阶段(图6)。由此可知,在二叠纪期间普遍处于高热流值背景之下,川南不同地区埋藏深度的差异对于烃源岩成熟度演化的影响尤为显著。

#### 4.3 川南地区筇竹寺组页岩气形成条件

川南地区下寒武统筇竹寺组页岩有机质含量高<sup>[27]</sup>,有机质类型以I型为主<sup>[28]</sup>,具备良好的烃类生成物质基础。有机质热演化模拟结果也表明,该套页岩层系在地质历史时期经历了油气生成的各个阶段,尤其是二叠纪及后期的高热流和深埋作用对于液态油裂解成气的过程十分有利,因此该地区具有良好的页岩气生成条件。

与常规天然气资源不同,页岩气主要是以游离态和吸附态的形式赋存于页岩之中的天然气,页岩层系的温度和热演化对于页岩中天然气游离态和吸附态的转变、有机质的吸附能力以及页岩的储集性能等都有非常重要的影响<sup>[3,5]</sup>。从川东南和川西南等地区筇竹寺组热演化模拟的结果来看,与川西南地区相比,川东南地区筇竹寺组页岩中天然气的生成时期相对较早,这2个地区筇竹寺组热演化过程和古地温演化过程的差异势必会导致页岩气成藏过程中游离气与吸附气的相对含量、页岩对天然气的吸附能力和储集性能等方面的差异,在具体的成藏过程的研究、页岩气保存和改造条件的评价等方面应当予以重视。

## 5 结论

(1)川南地区在早古生代地表热流值较低,中—晚二叠世出现热流高峰,其中川西南地区热流峰值为110mW/m<sup>2</sup>左右,川东南地区为70~90mW/m<sup>2</sup>,此后热流逐渐降低,现今为55~65mW/m<sup>2</sup>。峨眉山地慢柱的上涌和岩浆底侵作用是川南地区二叠纪期间出现热异常事件的原因,川东南和川西南等地

区与峨眉山地慢柱距离的不同造成了二者热史的差异。

(2)川南地区下寒武统筇竹寺组页岩的热演化是由热史和埋藏史共同控制的,川西南地区位于乐山—龙女寺古隆起上的区域内,筇竹寺组页岩在加里东期埋深较小,处于未成熟阶段,二叠纪期间热流的升高使得烃源岩快速演化并进入成熟阶段,侏罗纪期间的深埋增温作用使烃源岩进入过成熟阶段。川西南其他区域的筇竹寺组在石炭纪期间开始成熟,二叠纪期间的高热流和较大的埋深使烃源岩快速演化,进入过成熟阶段。川东南地区的筇竹寺组在志留纪期间开始成熟,二叠纪期间快速演化, $R_o$ 值达到2.8%,进入过成熟阶段。

#### 参考文献(References):

- [1] Guo Tonglou, Zhang Hanrong. Formation and enrichment mode of Jiaoshiba shale gas field, Sichuan Basin[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2014, 41(1): 28-36. [郭彤楼, 张汉荣. 四川盆地焦石坝页岩气田形成与富集高产模式[J]. *石油勘探与开发*, 2014, 41(1): 28-36.]
- [2] Wu Wei, Huang Shipeng, Hu Guoyi, *et al.* A comparison between shale gas and conventional gas on geochemical in Weiyuan area[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(12): 1994-2002. [吴伟, 黄世鹏, 胡国艺, 等. 威远地区页岩气与常规天然气地球化学特征对比[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(12): 1994-2002.]
- [3] Zhang Jinchuan, Nie Haikuan, Xu Bo, *et al.* Geological condition of shale gas accumulation in Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(2): 151-156. [张金川, 聂海宽, 徐波, 等. 四川盆地页岩气成藏地质条件[J]. *天然气工业*, 2008, 28(2): 151-156.]
- [4] Wang Shejiao, Wang Lansheng, Huang Jinliang, *et al.* Accumulation conditions of shale gas reservoirs in Silurian of the Upper Yangtze region[J]. *Natural Gas Industry*, 2009, 29(5): 45-50. [王社教, 王兰生, 黄金亮, 等. 上扬子区志留系页岩气成藏条件[J]. *天然气工业*, 2009, 29(5): 45-50.]
- [5] Wang Xiang, Liu Yuhua, Zhang Min, *et al.* Conditions of formation and accumulation for shale gas[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2010, 21(2): 350-356. [王祥, 刘玉华, 张敏, 等. 页岩气形成条件及成藏影响因素研究[J]. *天然气地球科学*, 2010, 21(2): 350-356.]
- [6] Zou Caineng, Dong Dazhong, Wang Shejiao, *et al.* Geological characteristics, formation mechanism and resource potential of shale gas in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2010, 37(6): 641-653. [邹才能, 董大忠, 王社教, 等. 中国页岩气形成机理、地质特征及资源潜力[J]. *石油勘探与开发*, 2010, 37(6): 641-653.]
- [7] Dong Dazhong, Cheng Keming, Wang Yuman, *et al.* Forming conditions and characteristics of shale gas in the lower Paleo-

- zoic of the Upper Yangtze region, China[J]. *Oil & Gas Geology*, 2010, 31(3): 288-299. [董大忠, 程克明, 王玉满, 等. 中国上扬子区下古生界页岩气形成条件及特征[J]. *石油与天然气地质*, 2010, 31(3): 288-299.]
- [8] Zhao Pei, Li Xianqing, Tian Xingwang, *et al.* Study on micro-pore structure characteristics of Longmaxi Formation shale gas reservoirs in the southern Sichuan Basin[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(6): 947-956. [赵佩, 李贤庆, 田兴旺, 等. 川南地区龙马溪组页岩储层微孔隙结构特征[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(6): 947-956.]
- [9] Zheng Jianjing, Gao Zhandong, Wang Yadong, *et al.* Application progress of structure-thermochronology in petroliferous basin analysis[J]. *Natural Gas Geoscience*, 2014, 25(10): 1491-1498. [郑建京, 高占冬, 王亚东, 等. 构造—热年代学在含油气盆地分析中的应用进展[J]. *天然气地球科学*, 2014, 25(10): 1491-1498.]
- [10] Xu Ming, Zhu Chuanqing, Tian Yuntao, *et al.* Borehole temperature logging and characteristics of subsurface temperature in the Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(4): 1052-1060. [徐明, 朱传庆, 田云涛, 等. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(4): 1052-1060.]
- [11] Zhou Jiangyu, Wu Chonglong, Han Zhijun, *et al.* Crustal thermal structure model and thermal evolution along the Sichuan Basin segment of the Heishui-Quanzhou geotraverse[J]. *Acta Geologica Sichuan*, 1997, 17(3): 161-167. [周江羽, 吴冲龙, 韩志军, 等. 黑水—泉州地质断面四川盆地地区段的地壳热结构模型及热演化史[J]. *四川地质学报*, 1997, 17(3): 161-167.]
- [12] He Lijuan, Xu Hehua, Wang Jiyang. Thermal evolution and dynamic mechanism of the Sichuan Basin during the Early Permian-Middle Triassic[J]. *Science China: Earth Science*, 2011, 41(12): 1884-1891. [何丽娟, 许鹤华, 汪集阳. 早二叠世—中三叠世四川盆地热演化及其动力学机制[J]. *中国科学: 地球科学*, 2011, 41(12): 1884-1891.]
- [13] He Lijuan, Huang Fang, Liu Qiongying, *et al.* Tectono-thermal evolution of Sichuan Basin in Early Paleozoic[J]. *Journal of Earth Sciences & Environment*, 2014, 36(2): 10-17. [何丽娟, 黄方, 刘琼颖, 等. 四川盆地早古生代构造—热演化特征[J]. *地球科学与环境学报*, 2014, 36(2): 10-17.]
- [14] Huang Fang, Liu Qiongying, He Lijuan. Tectono-thermal modeling of the Sichuan Basin since the Late Himalayan period[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2012, 55(11): 3742-3753. [黄方, 刘琼颖, 何丽娟. 晚喜山期以来四川盆地构造—热演化模拟[J]. *地球物理学报*, 2012, 55(11): 3742-3753.]
- [15] Chen Meitao, Tang Liangjie, Yang Ning, *et al.* Establishment and application of the thermal wave model of the deposition in the northern Sichuan Basin[J]. *Journal of Xi'an Shiyou University: Natural Science Edition*, 2005, 20(6): 12-16. [陈梅涛, 汤良杰, 杨宁, 等. 四川盆地北部热史波动模型的建立和应用[J]. *西安石油大学学报: 自然科学版*, 2005, 20(6): 12-16.]
- [16] Lu Qingzhi, Hu Shengbiao, Guo Tonglou, *et al.* The background of the geothermal field for formation of abnormal high pressure in the northeastern Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(5): 1110-1116. [卢庆治, 胡圣标, 郭彤楼, 等. 川东北地区异常高压形成的地温场背景[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(5): 1110-1116.]
- [17] Lu Qingzhi, Ma Yongsheng, Guo Tonglou, *et al.* Thermal history and hydrocarbon generation history in western Hubei-eastern Chongqing area[J]. *Chinese Journal of Geology*, 2007, 42(1): 189-198. [卢庆治, 马永生, 郭彤楼, 等. 鄂西—渝东地区热史恢复及烃源岩成烃史[J]. *地质科学*, 2007, 42(1): 189-198.]
- [18] Zhu Chuanqing, Xu Ming, Yuan Yusong, *et al.* Palaeogeothermal response and record of the effusing of Emeishan basalts in Sichuan Basin[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(6): 474-482. [朱传庆, 徐明, 袁玉松, 等. 峨眉山玄武岩喷发在四川盆地的地热学响应[J]. *科学通报*, 2010, 55(6): 474-482.]
- [19] Wu Qun, Peng Jinning. Burial and thermal histories of north-eastern Sichuan Basin: A case study of well Puguang 2[J]. *Petroleum Geology & Experiment*, 2013, 35(2): 133-138. [吴群, 彭金宁. 川东北地区埋藏史及热史分析——以普光 2 井为例[J]. *石油实验地质*, 2013, 35(2): 133-138.]
- [20] Qiu Nansheng, Qin Jianzhong, Brent I A McInnes, *et al.* Tectonothermal evolution of the northeastern Sichuan Basin: Constraints from apatite and zircon (U-Th)/He ages and vitrinite reflectance data[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2008, 14(2): 223-230. [邱楠生, 秦建中, Brent I A McInnes, 等. 川东北地区构造—热演化探讨——来自(U-Th)/He 年龄和  $R_o$  的约束[J]. *高校地质学报*, 2008, 14(2): 223-230.]
- [21] Wang Mijun, Bao Ci, Xiao Mingde, *et al.* *Petroleum Geology of China (Vol. 10): Sichuan Petroliferous Region* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 1989: 96-109. [王必君, 包茨, 肖明德, 等. 中国石油地质志(卷十): 四川油气区[M]. 北京: 石油工业出版社, 1989: 96-109.]
- [22] Lerche I. Inversion of multiple thermal indicators: Quantitative methods of determining paleoheat flux and geological parameters. I. Theoretical development for paleoheat flux[J]. *Mathematical Geology*, 1988, 20(1): 3-36.
- [23] Sweeney J J, Burnham A K. Evaluation of a simple model of vitrinite reflectance based on chemical kinetics[J]. *AAPG Bulletin*, 1990, 74(10): 1559-1571.
- [24] Qiu Nansheng, Hu Shengbiao, He Lijuan. *Principles and Applications on Thermal Regime of Sedimentary Basins* [M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2004: 53-56. [邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 53-56.]
- [25] Shi Xiaobin, Wang Jiyang, Luo Xiaorong. Discussion on the abilities of thermal indicators in reconstructing thermal history of sedimentary basin[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2000, 43(3): 386-392. [施小斌, 汪集阳, 罗晓蓉. 古温标重建沉积盆地热史的能力探讨[J]. *地球物理学报*, 2000, 43(3): 386-392.]
- [26] Pu Boling. Analysis of the Reservoir-Forming Conditions of Shale Gas Potential in Sichuan Basin[D]. Dongying: China U-

- niversity of Petroleum, 2008; 28-30. [蒲伯伶. 四川盆地页岩气成藏条件分析[D]. 东营: 中国石油大学, 2008; 28-30.]
- [27] Huang Jinliang, Zou Caineng, Li Jianzhong, *et al.* Shale gas generation and potential of the Lower Cambrian Qiongzhusi Formation in southern Sichuan Basin, China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(1): 69-75. [黄金亮, 邹才能, 李建忠, 等. 川南下寒武统筇竹寺组页岩气形成条件及资源潜力[J]. 石油勘探与开发, 2012, 39(1): 69-75.]
- [28] Li Xianqing, Zhao Pei, Sun Jie, *et al.* Study on the accumulation conditions of shale gas from the Lower Paleozoic in the south region of Sichuan Basin[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(5): 864-869. [李贤庆, 赵佩, 孙杰, 等. 川南地区下古生界页岩气成藏条件研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(5): 864-869.]
- [29] Nie Haikuan, Zhang Jinchuan, Li Yuxi. Accumulation conditions of the Lower Cambrian shale gas in the Sichuan Basin and its periphery[J]. Acta Petrolei Sinica, 2011, 32(6): 959-967. [聂海宽, 张金川, 李玉喜. 四川盆地及其周缘下寒武统页岩气聚集条件[J]. 石油学报, 2011, 32(6): 959-967.]
- [30] Xu Yigang, Zhong Sunlin. The Emeishan large igneous province: Evidence for mantle plume activity and melting conditions[J]. Geochimica, 2001, 30(1): 1-9. [徐义刚, 钟孙霖. 峨眉山大火成岩省——地幔柱活动的证据及其熔融条件[J]. 地球化学, 2001, 30(1): 1-9.]
- [31] He Bin, Xu Yigang, Xiao Long, *et al.* Generation and spatial distribution of the Emeishan Large Igneous Province: new evidence from stratigraphic records[J]. Acta Geologica Sinica, 2003, 77(2): 194-202. [何斌, 徐义刚, 肖龙, 等. 峨眉山大火成岩省的形成机制及空间展布: 来自沉积地层学的新证据[J]. 地质学报, 2003, 77(2): 194-202.]
- [32] He Bin, Xu Yigang, Wang Yamei, *et al.* Sedimentation and lithofacies paleogeography in southwestern China before and after the Emeishan flood volcanism: new insights into surface response to mantle plume activity[J]. The Journal of Geology, 2006, 114(1): 117-132.
- [33] Rao Song, Zhu Chuanqing, Wang Qiang, *et al.* Thermal evolution patterns of Sinian-Lower Paleozoic source rocks in the Sichuan Basin, southwest China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(5): 1549-1559. [饶松, 朱传庆, 王强, 等. 四川盆地震旦系一下古生界烃源岩热演化模式及主控因素[J]. 地球物理学报, 2013, 56(5): 1549-1559.]
- [34] Mei Qinghua, He Dengfa, Wen Zhu, *et al.* Geologic structure and tectonic evolution of Leshan-Longnusi paleo-uplift in Sichuan Basin, China[J]. Acta Petrolei Sinica, 2014, 35(1): 11-25. [梅庆华, 何登发, 文竹, 等. 四川盆地乐山—龙女寺古隆起地质结构及构造演化[J]. 石油学报, 2014, 35(1): 11-25.]

## Paleo-heat Flow and Thermal Evolution of the Lower Cambrian Qiongzhusi Shale in the Southern Sichuan Basin, SW China

JIANG Qiang<sup>1,2</sup>, ZHU Chuan-qing<sup>1,2</sup>, QIU Nan-sheng<sup>1,2</sup>, CAO Huan-yu<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China;  
2. Research Center for Basin and Reservoir, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

**Abstract:** The Paleozoic marine shale in the southern Sichuan basin is one of the most favorable fields for current shale gas exploration in China. The paleo-heat flow history of 5 wells in the southern Sichuan basin were reconstructed by using the vitrinite reflectance ( $R_o$ ) data. The heat flow in the Paleozoic was relatively low, but a heat flow peak occurred during the Permian, with a maximum value of  $110\text{mW}/\text{m}^2$  in the southwestern area and  $70\text{-}90\text{mW}/\text{m}^2$  in the southeastern area. After the Triassic, the heat flow gradually reduced to the present  $55\text{-}65\text{mW}/\text{m}^2$ . Based on the thermal history results, the thermal evolution of the Lower Cambrian Qiongzhusi shale were modeled. Due to the difference in burial history and heat flow history, there are differences in the thermal evolution of the Qiongzhusi shale in different regions in the southern Sichuan Basin. In the southeast area, the Qiongzhusi shale began to generate oil during the Silurian, then it experienced a rapid thermal evolution stage and became overmature during the Permian. However, in the southwest area, the Qiongzhusi shale became mature in the Carboniferous period, and it evolved rapidly in the Permian, during which time the  $R_o$  reached 2.5%. The burial depth of the Qiongzhusi shale in the Leshan-Longnusi paleo-uplift area was relatively small during the Caledonian period, so the source rocks remained immature during that time. These source rocks didn't begin to generate oil until the Middle-Late Permian, then they began to produce gas during the Triassic and became overmature in the Jurassic.

**Key words:** Thermal evolution; Shale gas; Thermal history; Qiongzhusi Formation; Southern Sichuan Basin